



НОВЫЕ ДАННЫЕ О U-Pb-ВОЗРАСТЕ И СОСТАВЕ ЦИРКОНА (SHRIMP-II, SIMS) ИЗ ПОЛИМИНЕРАЛЬНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ИЧЕТЬЮ (СРЕДНИЙ ТИМАН)

А. Б. Макеев¹, А. О. Красоткина², С. Г. Скублов^{3, 2}

¹Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ РАН), Москва
abmakeev@igem.ru

²Горный университет, Санкт-Петербург

³Институт геологии и геохронологии докембрая (ИГГД РАН), Санкт-Петербург

Впервые проведено локальное датирование и определен состав REE (U-Pb-метод, SHRIMP-II и SIMS) циркона из конглобрекчиевого пласта проявления Ичетью. Установлен широкий разброс значений возраста в интервале от 3283 до 706 млн лет. Среди циркона установлены высокоинттриевые и низкоинттриевые разновидности, содержание иттрия коррелирует с тяжелыми редкоземельными элементами и фосфором. Эти данные согласуются с результатами исследования возраста циркона, выделенного из нижележащих титановых руд Пижемского месторождения. Результаты исследования свидетельствуют о едином источнике циркона двух промышленных объектов, при этом циркон мог поступать из разных по глубине горизонтов нижележащего кристаллического фундамента.

Ключевые слова: циркон, U-Pb-возраст, редкоземельный состав, рудопроявление Ичетью, Средний Тиман.

NEW DATA ON U-Pb-AGE AND GEOCHEMISTRY OF ZIRCON (SHRIMP-II, SIMS) FROM ICHETU OCCURRENCE (MIDDLE TIMAN)

А. Б. Makeev¹, А. О. Krasotkina², S. G. Skublov^{3, 2}

¹IGEM RAS, Moscow

²Mining University, St. Petersburg

³IPGG RAS, St. Petersburg

For the first time zircons from conglomerate-breccia bed of the Ichetu occurrence were analyzed with local dating (U-Pb-method, SHRIMP-II and SIMS). The wide range of age values within the interval from 3283 to 706 Ma was determined. The high-yttrium and mid-yttrium varieties were marked among zircons, yttrium contents correlate with heavy rare earth elements and phosphorus. The obtained material corresponds to the dating results and geochemistry of zircons selected from underlying titanium ores of Pizhemskoe deposit. This fact proves a single zircon source for both industrial sites. In addition zircon could originate from different depth levels of underlying crystal basement.

Keywords: zircon, U-Pb-age, trace element composition, Ichetu occurrence, Middle Timan.

Введение

Широко известные на Среднем Тимане (Республика Коми) Пижемское месторождение титана и полиминеральное проявление Ичетью обещают быть крайне востребованными как в отношении гигантских ресурсов титана и кварцевых песчаников стекольного качества, так и в возможном расширении перечня перспективных полезных компонентов (редкие металлы — иттрий, цирконий, ниобий, редкоземельные элементы, алмазы и др.). Стоит отметить, что прогнозные ресурсы (P_1 - P_2) циркона в полиминеральном проявлении Ичетью составляют 600 т, а в нижерасположенном Пижемском циркон-титановом месторождении ~ 1 млн т (по данным Ухтинской ГРЭ). Несмотря на то, что оба объекта на протяжении последних лет являются предметом поисково-оценочных и разносторонних преимущественно технологических и минералого-геохимических исследований, по-прежнему проблема генезиса и связанная с ней проблема возраста оруденения являются открытыми.

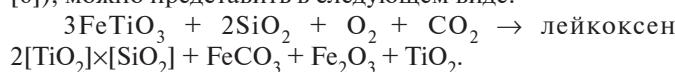
Начало изучению геологического строения севера Русской платформы, Тиманского кряжа и Печорского

Урала было положено в 1840—1841 гг. работами экспедиции Р. Мурчисона, Э. Вернейля и А. Кайзерлинга. По результатам этих работ в 1849 г. была составлена первая геологическая карта, отражающая главные структурные элементы Северо-Запада России (на карту впервые нанесен Тиманский кряж). Первые систематические геолого-разведочные работы в регионе были проведены в 50-х годах прошлого века в связи с алмазоносностью Среднего Тимана. Впервые в 1958 г. Ф. Ф. Патрикеевым был поднят вопрос о постановке специальных работ по поискам титановых россыпей, т. к. район среднего течения р. Печорской Пижмы считался перспективным в этом отношении. В 1959—60 гг. Ухтинская экспедиция [14] проводила специальные поисково-опробовательские работы на выявление титановых россыпей в бассейне рек Южного и Среднего Тимана. В результате этих работ летом 1960 г. было обнаружено два рудопроявления на правом берегу р. Умы и на р. Печорской Пижмы. Ухтинской ГРЭ в 1963—1965 гг. инициированы поисковые работы с бурением в пределах Пижемской депрессии под руководством И. С. Сидоровой и Н. И. Матюхина, в результате которых было уста-



новлено широкое распространение титаноносных пород на площади примерно 90 км², в дальнейшем толща получила название малоручейской свиты и условно отнесена к среднему девону. В 1996—2002 гг. в результате геологоразведочных и опытно-эксплуатационных работ в пределах Пижемского месторождения (рис. 1) была оценена уникальность [8] и подсчитаны прогнозные ресурсы золото-алмаз-полиминерального проявления Ичетью.

С 2009 г. в пределах Пижемской депрессии поисково-оценочные работы ведет ЗАО «РУСТИТАН», получившее лицензию на Верхнепижемский участок Пижемского месторождения на площади 35 км². Изучение керна 67 поисковых скважин и более 30 пробуренных ранее скважин не подтверждает ритмичного пятичленного строения толщи, предложенного И. С. Сидоровой. В настоящее время принято подразделять малоручейскую свиту на три толщи (рис. 1, 2): верхнюю (mr³), среднюю (mr²) и нижнюю (mr¹). Общая мощность свиты варьирует от 20 до 120 м, увеличиваясь на север и восток. Верхняя и средняя толщи — сероцветные слабосцементированные песчаники. Нижняя толща, самая мощная и крепко сцементированная, сложена переслаиванием лейкоксен-кварцевых песчаников, алевролитов, аргиллитоподобных глин и гравелитов в её основании. Цемент руд представлен сидеритом (рис. 2, a, b), гематитом (рис. 2, d), каолинитом и серицитом. Содержание TiO₂ в рудных песчаниках варьирует от 2 до 13.5 %. Титановые минералы представлены рядом эволюционирующих фаз от ильменита через Fe-рутил, «псевдорутила» к лейкоксену (эта фаза состоит из сагенитовой решетки рутила с вкраплениями кварца) до игольчатого чистого рутила [6]. Содержание кварца в пижемском лейкоксене изменяется от 15 до 30 %. Соотношение в руде титановых минералов и фаз установлено по данным мессбауэровской спектроскопии. 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 магнитном концентрате [10]. Схематическую реакцию преобразования ильменита в лейкоксен, проходящую при высокой температуре (510 ± 35) °C (данные расчета по титан-циркониевому геотермометру [6]), можно представить в следующем виде:



Проблема генезиса

На ранних этапах исследования титановых месторождений Тимана была высказана гипотеза о россыпной природе Пижемского и Яргского месторождений [2, 3 и др.]. Затем В. Г. Колокольцевым [4] была предложена альтернативная полигенетическая модель для Яргского месторождения, по которой на первично-осадочные породы накладывается гидротермально-метасоматическое титановое оруденение. При этом источник рудного вещества автор видит в нижележащих рифейских сланцах.

В последнее время установлено множество фактов, доказывающих несостоятельность россыпной точки зрения [5—10]. Среди них стоит отметить: отсутствие латеральной и фациальной зональности для рудной малоручейской толщи, которая распространена локально (6×18 км) на севере Вольско-Вымской гряды на площади 90 км², образуя Пижемскую депрессию; отсутствие классического разреза коры выветривания рифейских сланцев (которые предполагались коренным источником лейко-

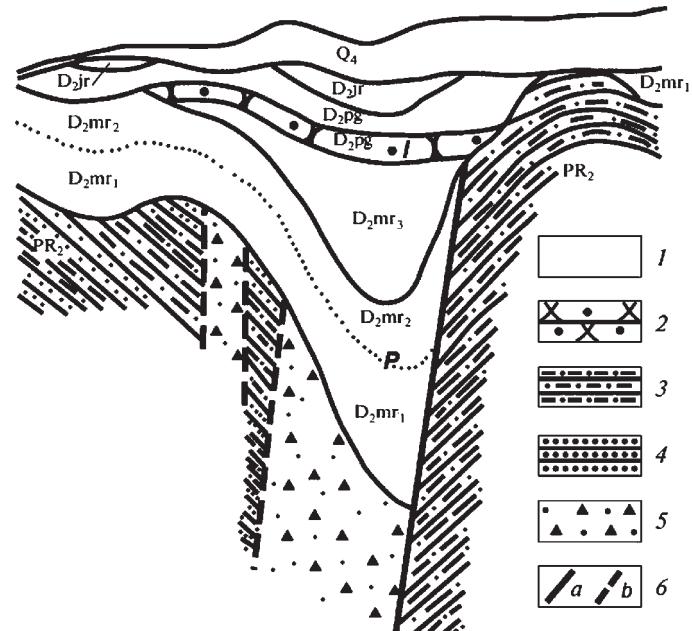


Рис. 1. Геологический разрез через девонские отложения Среднего Тимана [11, 13]. Масштабы: горизонтальный 1 : 10000, вертикальный 1 : 2000. Условные обозначения: 1 — девонские и четвертичные песчаники, пески, алевролиты и глины; 2 — металлоносные конглобрекции D₂pg проявления Ичетью, мощность горизонта дается вне масштаба, чтобы показать место проявления в разрезе; 3 — сланцы кварц-мусковит-каолинит-хлоритовые; 4 — алевролиты кварц-мусковит-хлоритовые; 5 — рыхлые тектонические брекчии, представленные алевропсаммитовым материалом пород рифея с щебнем и дресвой этих же пород; 6 — разломы: a — установленные, b — предполагаемые. Знаками на разрезе отмечено положение проявления Ичетью (I) и Пижемского месторождения (P)

Fig. 1. Geological section through Devonian sediments of Middle Timan region [11, 13]. Scales: horizontal 1 : 10000, vertical 1 : 2000. Symbols: 1 — Devonian and Quaternary sandstone, sand, siltstone, and clay; 2 — metalliferous conglomerations D₂pg of the Ichetu occurrence; 3 — quartz-muscovite-kaolinite-chlorite schist; 4 — quartz muscovite chlorite siltstone; 5 — loose tectonic breccias represented by aleuropsmmitic material of the Riphean rocks with detritus and gruss of the same rocks; 6 — proved (a) and inferred (b) faults. Icons on the section is marked the Ichetu occurrence (I) and the Pizhemsky deposit (P)

ксена); несоответствие уровня содержания Ti в породах рифейского фундамента и в руде Пижемского месторождения, исключающее аккумуляцию Ti в таких масштабах при образовании коры выветривания по сланцам. Из минералогических критериев следует упомянуть остроугольность и неокатанность кварца в песчаниках Пижемского месторождения (рис. 2); игольчатую форму новообразованного рутила (рис. 2, b), исключающую его россыпное происхождение; признаки гидротермального образования сидерита *in situ* (многочисленные секущие прожилки (рис. 2, a) мощностью 1—2 мм). Изотопный состав углерода сидерита пижемских руд такой же, как углерода алмаза проявления Ичетью [1, 11], — из этого следует, что углерод сидерита глубинного генезиса, а не корового осадочного происхождения. По мнению авторов, Пижемское циркон-титановое месторождение и полиминеральное проявление Ичетью имеют эндогенное происхождение, а именно фрагментомагматическое. Пижемское месторождение по форме

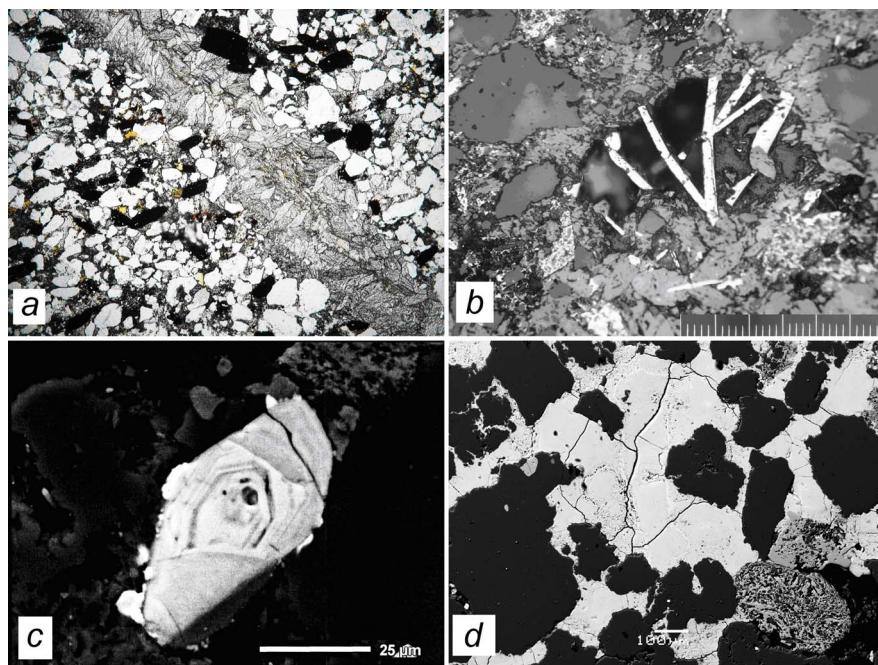


Рис. 2. Изображения препаратов лейкоксен-кварцевых титановых руд Пижемского месторождения (*a* — в шлифе, *b—d* — электронно-микроскопические BSE-изображения): *a* — изображение шлифа лейкоксен-кварцевого мелкозернистого песчаника с прожилком сидерита (0.7—1.0 мм) и сидеритом в поровом цементе (обр. 2/35.5). Чёрное — лейкоксен, серое — сидерит, белое — кварц. Николи параллельны. Размер поля 2.4×3.2 мм; *b* — лейкоксен-кварцевый песчаник с сидеритовым цементом, видны новообразованные на месте игольчатые двойники рутила. Аншлиф обр. 1/67-7-20. Керн скважины ГТС-1, нижняя малоручейская толща mtr^1 ; *c* — кристалл циркона с пленкой ксенотима в титаноносной породе, свидетельство перекристаллизации циркона и выноса из него Y, HREE, P в гидротермальных условиях; *d* — гематитовый (светлое) цемент лейкоксен-кварцевого песчаника, кварц — чёрный, лейкоксен — серый. Аншлиф обр. МТУ-7-2. Во всех препаратах виден только дробленый нерегенерированный кварц, вероятно имеющий происхождение из кварцитовых протерозойских пород фундамента

Fig. 2. Images of leucoxene-quartz titanium ores of the Pizhemsky deposit (*a* — in thin section, *b—d* — electron microscopy BSE images): *a* — image of the leucoxene-quartz fine-grained sandstone with siderite vein (0.7—1.0 mm) and siderite in the pore cement (sample 2/35.5). Black — leucoxene, grey — siderite, white — quartz. Analizator parallel. The field size 2.4×3.2 mm; *b* — leucoxene-quartz sandstone with siderite cement and visible newly formed needle-shaped twins of rutile. Sample 1/67-7-20. Borehole GTS-1, lower Belorucheysky unit mtr^1 ; *c* — crystal of zircon with xenotime thin plate in titanium-bearing rocks, evidence of recrystallization of zircon and the removal from it of Y, HREE, and P in hydrothermal conditions; *d* — hematite (light) cement of leucoxene-quartz sandstone, quartz — black, leucoxene — gray. Sample MTU-7-2

рудных тел, имеющих пространственную связь с глубинными разломами, напоминает кальдеру, заполненную песчано-глинистым материалом по типу грязевых вулканов. Инициатором и движущим фактором образования месторождения могли быть глубинное внедрение неопротерозойских базальтоидов, или собственно лампрофиров (аналоги которых керсантит-спессартитового ряда широко распространены в соседней Четласской гряде), и их взаимодействие с метеорными водами. Последние, образуя агрессивный водяной пар, разрушали лампрофирные аналогичные по составу четласские (предполагаемому источнику титана Пижемского месторождения), нахождение которых предполагается на некоторой глубине под Пижемским месторождением, и выносили продукты их разрушения в кальдеру. Доказательством того, что протолитом титановых руд были именно лампрофирные, а не сланцы, являются результаты изучения типоморфных особенностей породообразующих и акцессорных минералов обоих объектов [6, 8]. Отсутствие дальнего переноса материала доказывается формой кластогенного остроугольного совершенно неокатанного кварца, слагающего всю массу титановых руд (рис. 2), а также хрупкостью лейкоксена, не выдерживающего переноса более чем на 2 км.

Проблема возраста

Предыдущими исследованиями Rb-Sr-методом по глинистой составляющей и лейкоксену титаноносной толщи Пижемского месторождения был получен изохронный возраст (685 ± 30) млн лет [18], который рассматривается авторами как соответствующий сопряженному возрасту формирования и титанового оруденения и вмещающих его песчано-глинистых пород. Следует отметить, что ранее пижемские титановые руды считались среднедевонскими. Возраст глинистых сланцев, подстилающих Пижемское месторождение, определен ранее по серийцу K-Ag-методом, около 635 млн лет [18]. Получается, что древняя титаноносная толща возрастом (685 ± 30) млн лет залегает на более молодых глинистых сланцах. Так как возраст сланцев на 50 млн лет меньше возраста титаноносной толщи, то они не могли служить материалом для образования титановых руд. Наиболее вероятным источником рудного вещества являются высокотитанистые четласские лампрофирные и щелочные базальты Четласского Камня и Вольско-Вымской гряды [7, 8]. Из них самые известные и изученные — Косьюсское, Бобровское и Октябрьское дайковые поля. По Rb-Sr-изотопным данным, наиболее многочисленная совокупность проб лампрофиров образует изохрону с позднепротерозой-



ским возрастом (819 ± 19) млн лет [6]. Кроме того, есть лампрофировые дайки с возрастом около (606 ± 10) млн лет, одновозрастные с четласскими карбонатитами. Возраст рудных минералов (торита, монацита и тантало-ниобатов) из Новобобровского комплексного редкометалльно-торий-редкоземельного месторождения на Среднем Тимане был определен Sm-Nd-методом как (581 ± 47) млн лет [16]. Все это свидетельствует о длительном периоде генерации лампрофировской магмы на Среднем Тимане, охватывающем около 200 млн лет [7, 18].

Сравнительно недавно было выполнено локальное изотопно-геохимическое исследование циркона из Пижемского месторождения [9]. Впервые были получены данные по геохимии и U-Pb-возрасту циркона Пижемского титанового месторождения и проведен сравнительный анализ этих данных с аналогичными для циркона из лампрофиров Четласского Камня Среднего Тимана, предполагаемого источника рудного вещества для Пижемского месторождения. Было установлено, что материалом и коренным источником рудного вещества были не только лампрофиры, но и породы тиманского фундамента с большой глубины. В изученной выборке присутствуют зерна циркона с возрастом не менее 591—572 млн лет. Есть несколько зерен пижемских цирконов с датировками около 300 млн лет, но так как эти зерна циркона — как раз те, уникальные, с высоким содержанием Y, HREE, P, U, Th, то они обладают нарушенными U-Pb-изотопными отношениями, поэтому они нами в общий расчет не берутся. Отсутствие циркона с доказанным фанерозойским возрастом свидетельствует о том, что сама титаноносная толща более древняя, чем считалась ранее (средний девон), а ее возраст следует считать докембрийским [9].

Для циркона из проявления Ичетью U-Pb-датирование ранее проводилось только для ограниченной выборки (9 зерен) классическим методом TIMS (ссылки в [12]). Установлено, что U-Pb-возраст циркона проявления Ичетью широко варьирует от 2247 до 1478 млн лет, а источником циркона являются породы фундамента Среднего Тимана. Исследование особенностей редкоэлементного состава циркона из рудопроявления Ичетью показало, что примерно для 10 % индивидов характерны внутренние участки и зоны с необычно высокими содержаниями Y и HREE, а также четкая корреляция их с содержанием P. Такая схема изоморфного замещения в минерале (цирконовой компоненты на ксенотитовую), делают цирконы Среднего Тимана уникальными, что исключает их латеральный перенос из других регионов. Проведенные геохронологические и минералого-геохимические исследования позволяют предположить, что фундамент Среднего Тимана (наиболее вероятный источник циркона проявления Ичетью) сложен породами палеопротерозойского возраста и, вероятно, является продолжением под Мезенскую синеклизу и Средний Тиман палеопротерозойской коллизионной структуры, с которой пространственно связана Архангельская алмазоносная провинция [12].

В настоящем сообщении приводятся результаты локального изотопно-геохимического исследования двух проб циркона из проявления Ичетью (проба MY08-4, отобранныя в левом борту реки Умбы, вблизи канавы КУ-1, и проба ПМС-239 из расчистки в левом борту реки Пижмы, участок «Сидоровский»). Расстояние между точками отбора 14 км.

Геологическая характеристика рудопроявления Ичетью

Полиминеральное алмаз-золото-редкометалльно-редкоземельно-титановое рудопроявление Ичетью представляет собой горизонт конглобрекчиевых пород со сложной пятнисто-струйчато-линзовидной морфологией тел и выдержанной мощностью от 0.2 до 1.5 м (рис. 1, 3). Породы рудопроявления представлены светло-серыми кварцевыми песчаниками, гравелитами, конгломератами и конглобрекциями, залегающими между двумя мощными толщами в основании Пижемских мономинеральных кварцевых песчаников (D_2pg) стекольного качества и выше ильменит-лейкоксен-кварцевой титаноносной толщи Пижемского месторождения Среднего Тимана [6, 8]. Впервые золотоносность горизонта Ичетью была установлена А. А. Черновым в сороковых годах XX столетия, а алмазоносность — В. А. Дударом в восьмидесятых годах.

На рис. 3 изображены особенности залегания конглобрекчевого полиминерального горизонта проявления Ичетью в основании песчаников пижемской свиты (D_2pg) на контакте с верхней толщей (mr^3) кварц-каолинитовых рыхлых песчаников малоручейской свиты (Пижемского титанового месторождения): *a* — расчистка продуктивного алмазоносного конглобрекчевого горизонта проявления Ичетью (мощность — 1.5 м). Контакт малоручейских титаноносных слоев и пижемских песчаников (D_2pz). Длина вешки — 3.0 м. Титаноносные слои представлены здесь мелкозернистыми каолинизированными кварцевыми песчаниками верней части малоручейской свиты (mr^3). Карьер К-100 на правом берегу р. Средней; *b* — осветленная будина (толщиной 0.6 м) песчаника, облекаемая конглобрекчевым горизонтом, — свидетельство его термального воздействия на песчаники и более позднего внедрения (обнажение в скале «Золотой Камень», правый берег р. Пижмы); *c* — основание конглобрекчевого горизонта (вид сверху), видны обломки пород (сланцев-полосатиков, углистых черных сланцев, кварцитов), вынесенных вместе с конглобрекчией с большой глубины через нижезалегающую толщу рифейских пород. Такие виды пород на поверхности не встречаются, а вмещающие рифейские глинистые сланцы залегают в этом месте в 100 м ниже титаноносных пород (обнажение в левом борту р. Умбы); *d* — кварц-каолинитовые породы верхней малоручейской толщи (mr^3) с вихревыми складками фестончатой текстуры, выше на них залегает конглобрекчевый горизонт. Фестончатая текстура породы свидетельствует о термомассопереносе в вертикальном направлении, видна мелкая галька и обломки кварцита в вертикальных трещинах породы, прорывающиеся вверх (обнажение в правом берегу р. Умбы).

Породы рудопроявления отличаются разнообразием минерального состава. В их составе диагностировано более 50 минералов, главные из которых: кварц, рутил, антаз, ниобиевый рутил, ильменит, циркон, монацит, колумбит, гранаты, хромшпинелиды, турмалин, ставролит, золото с примесью серебра, кристаллические алмазы уральско-бразильского типа [8]. Среди этого минерального разнообразия в ряде шлиховых проб во фракции (+0.10...—0.25 мм) циркон составляет более 50, а во всей пробе — от 10 до 60 мас. % от минерального состава тяжелого шлиха и представляет промышленный интерес.

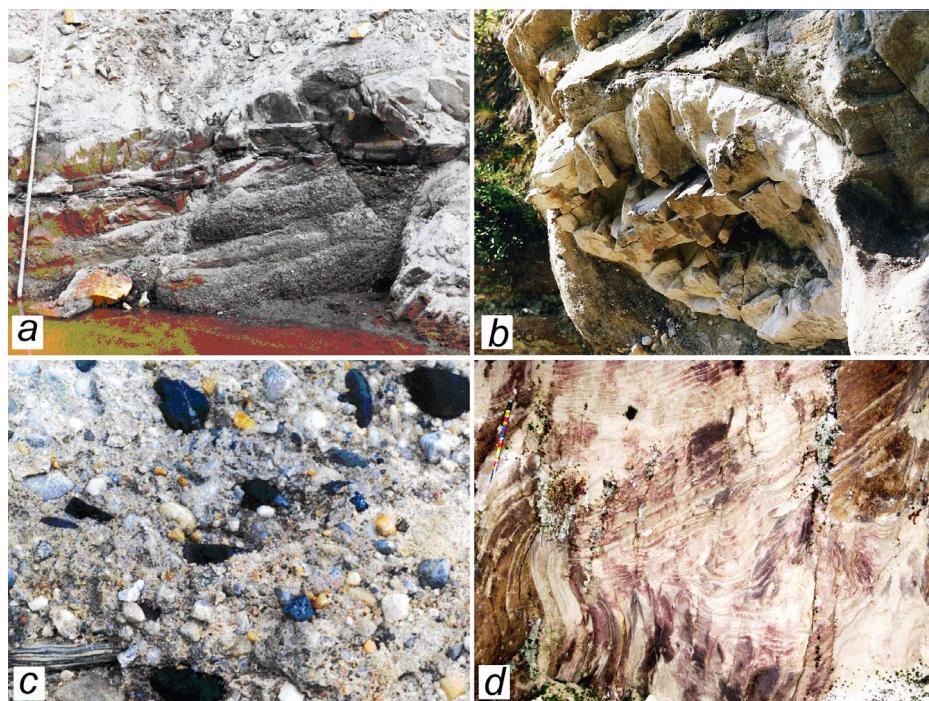


Рис. 3. Особенности залегания конглобрекчевого полиминерального горизонта проявления Ичетью в основании песчаников пижемской свиты (D_2pg) на контакте с верхней толщей (mr^3) кварц-каолинитовых рыхлых песчаников малоручейской свиты (Пижемского титанового месторождения): *a* — расчистка продуктивного алмазоносного конглобрекчевого горизонта проявления Ичетью (мощность — 1.5 м). Контакт малоручейских титаноносных слоев и пижемских песчаников (D_2pz). Длина вешки — 3.0 м. *b* — осветленная будина (толщина 0.6 м) песчаника, облекаемая конглобрекчевым горизонтом, *c* — основание конглобрекчевого горизонта (вид сверху); *d* — кварц-каолинитовые породы верхней малоручейской толщи (mr^3)

Fig. 3. Images of the outcrops, describing the features of the polymineral horizon of the Ichetu occurrence at the base of Pizhemsky unit (D_2pg) in contact with the upper layer (mr^3) quartz-kaolinite sandstone of Malorucheyskiy unit (Pizhemsky titanium deposit): *a* — clearing productive diamondiferous horizon of Ichetu occurrence (thickness — 1.5 m). Contact Malorucheyskiy titanium-bearing layers and Pizhemsky sandstones (D_2pz); *b* — clearing (thickness 0.6 m) of sandstone; *c* — base conglomerate horizon (top view); *d* — quartz-kaolinite rocks of the upper Malorucheyskiy unit (mr^3)

Методы исследования

Циркон из пробы MY08-4 был продатирован U-Pb-методом в ЦИИ ВСЕГЕИ на ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II по стандартным методикам [27]. Для выбора точек анализа использовались изображения зерен циркона в проходящем свете, в режиме катодолюминесценции (CL) и в обратноотраженных электронах (BSE). Содержание редкоземельных (REE) и редких элементов в цирконе в тех же кратерах, где выполнялось датирование, определялось на ионном микрозонде Cameca IMS-4f в ЯФ ФТИАН (аналитики С. Г. Симакин, Е. В. Потапов) по приведенным методикам [17]. Кроме того, было исследовано распределение редких и редкоземельных элементов в цирконе из пробы ПМС-239, датирование и CL-исследование для которой не проводилось. Размер исследуемого на ионном микрозонде участка циркона не превышал в диаметре 15—20 мкм; относительная ошибка измерения для большинства элементов составляла 10—15 %; порог обнаружения элементов в среднем равнялся 10 ppb. При построении спектров распределения REE состав циркона нормировался на состав хондрита CI [24]. Оценка температуры кристаллизации циркона выполнена с помощью геотермометра «Ti-в-цирконе» [26].

Результаты и их обсуждение

Характеристика циркона. Проба MY08-4. Примерно половина зерен имеет изометричные очертания, другие

слабоудлиненные ($K_{уд.} 1 : 3$). Зерна умеренно или слабоокатаны, часть зерен представляет собой обломки кристаллов (рис. 4, *a*). Цвет кристаллов циркона варьирует от прозрачного до бледно-желтого и розового. Удлиненные кристаллы циркона, как правило, демонстрируют в CL магматическую осцилляционную зональность, заключающуюся в чередовании светлых и темных серых полос. В целом осцилляционная зональность проявлена неконтрастно, местами она сменяется мозаичной зональностью или зональность вообще отсутствует. По характеристике циркона в CL его можно условно разделить на две группы: первая, преобладающая, с цирконом преимущественно темной окраски и вторая — с цирконом светло-серых тонов в CL. В единичных зернах циркона в CL-изображении можно выделить тонкие, не более 20 мкм по ширине, каймы черного цвета вокруг центральной части зерен светло-серого оттенка (например, зерна 12, 20, 31, рис. 4, *a*).

Проба ПМС-239. В этой пробе детально были исследованы зерна циркона, демонстрирующие следы наложенных изменений появлением участков более темного оттенка в BSE-изображении (рис. 4, *b—d*). Эти зерна имеют изометричные очертания с частично корродированными краями. Вторичные изменения разнообразны по морфологии проявления. Они могут быть проявлены в виде дендритовидной «паутины», приуроченной к краевой части зерна и равномерно покрывающей до 20 % площади циркона (рис. 4, *b*). Другая форма проявления изменений —

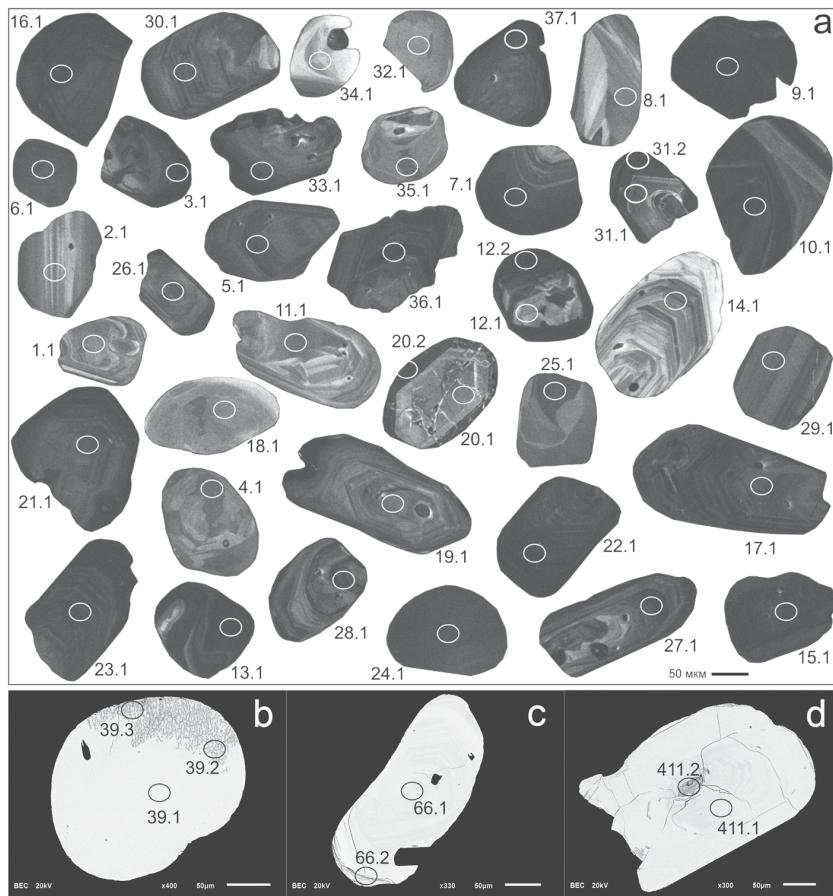


Рис. 4. Изображение циркона из проявления Ичетью, пробы MY08-4 в CL (а) и пробы ПМС-239 в BSE (б—д). Размер поля анализа равен ~ 20 мкм. Номера анализов совпадают с табл. 1, 2

Fig. 4. Images of zircons from the Ichet'yu occurrence, sample MY08-4 in CL (a) and sample PMS-239 in BSE (b—d). The size of the field of the analysis is equal ~ 20 microns. Numbers of analyses coincide with Table 1, 2

это замещение краевой части зерна, сложенной более темной высокоурановой полосой осцилляционной зональности (рис. 4, с). Помимо замещения краевых частей циркона также возможно замещение центральной части зерна, возникающей тогда, когда гидротермальный раствор проникает в глубь зерна по системе трещин, пронизывающих все зерно целиком (рис. 4, д).

Возраст циркона

Локально было продатировано 37 зерен циркона из пробы MY08-4 полиминерального рудопроявления Ичетью (рис. 5, табл. 1). Подавляющая часть аналитических точек является конкордантными. Дискордантность проявлена в темных в CL высокоурановых доменах циркона (точки 13.1 и 36.1, рис. 4, а), в каймах черного цвета (точки 12.2 и 31.2), а также в сильнотрещиноватом зерне (№ 20). Следует отметить, что U-Pb-возраст каём значительно не отличается от возраста центральной части этих же зерен (табл. 1).

Результаты определения U-Pb-возраста циркона показали широкий разброс индивидуальных значений $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возраста от 706 до 3283 млн лет (рис. 5, табл. 1). Самое молодое измеренное значение $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возраста — (706 ± 13) млн лет — получено для зерна циркона с секториальной зональностью типа «елочки» (точка 35.1, рис. 4, а). Наиболее древний субконкордантный кластер образован четырьмя точками (4.1, 6.1, 18.1 и 29.1) и имеет возраст (2635 ± 31) млн лет по верхнему пересечению дискордии с конкордией (рис. 5).

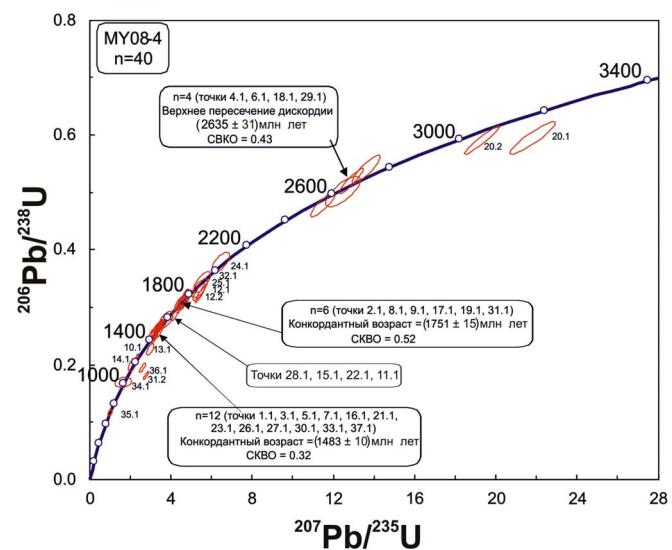


Рис. 5. График с конкордией с результатами датирования циркона из проявления Ичетью

Fig. 5. Plot with concordia for zircons from the Ichet'yu occurrence

Таблица 1. Результаты датирования циркона из проявления Ичетью (проба MY08-4)

Table 1. Results of dating of zircons from the Ichetu occurrence (sample MY08-4)

| Точка анализа Point of analysis | Характеристика в CL Characteristics in CL | $^{206}\text{Pb}_c$, % | U, ppm | Th, ppm | $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}^*$, ppm | Возраст / Age $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, млн лет / Ma | D, % |
|------------------------------------|---|-------------------------|--------|---------|----------------------------------|---------------------------|---|----------|
| 13.1 | темная зона / dark zone | 0.62 | 732 | 148 | 0.21 | 144 | 1531 | ± 34 |
| 31.2 | темная кайма / dark margin | 0.10 | 1004 | 627 | 0.64 | 157 | 1817 | ± 14 |
| 36.1 | темная зона / dark zone | 0.38 | 674 | 588 | 0.90 | 113 | 1568 | ± 23 |
| 12.2 | темная кайма / dark margin | 0.05 | 598 | 75 | 0.13 | 166 | 1988 | ± 13 |
| 3.1 | темная краевая зона / dark marginal zone | 0.11 | 568 | 242 | 0.44 | 123 | 1477 | ± 15 |
| 1.1 | светлый центр / light center | 0.58 | 54.4 | 65.7 | 1.25 | 12.0 | 1459 | ± 62 |
| 2.1 | светлый центр / light center | 0.09 | 122 | 39.8 | 0.34 | 33.4 | 1744 | ± 23 |
| 4.1 | темная зона / dark zone | 0.14 | 80 | 90.9 | 1.17 | 37.3 | 2681 | ± 16 |
| 5.1 | темный центр, слабая зональность / dark center, weak zonality | 0.13 | 284 | 144 | 0.52 | 62.7 | 1470 | ± 23 |
| 6.1 | темный центр / dark center | 0.06 | 182 | 101 | 0.57 | 81.6 | 2649 | ± 11 |
| 7.1 | темная зона / dark zone | 0.07 | 304 | 282 | 0.96 | 68.6 | 1476 | ± 20 |
| 8.1 | светлый центр / light center | 0.00 | 113 | 77.4 | 0.71 | 29.6 | 1742 | ± 26 |
| 9.1 | темный центр / dark center | 0.30 | 303 | 194 | 0.66 | 82.6 | 1788 | ± 20 |
| 10.1 | темный центр / dark center | 0.05 | 548 | 181 | 0.34 | 98.5 | 1197 | ± 20 |
| 11.1 | светлый центр / light center | 0.40 | 60.4 | 75.4 | 1.29 | 14.5 | 1595 | ± 56 |
| 12.1 | светлый центр / light center | 0.32 | 349 | 151 | 0.45 | 98.1 | 1955 | ± 23 |
| 14.1 | светлый центр, зональный / light center, zonal | 0.49 | 164 | 63.2 | 0.40 | 28.1 | 1079 | ± 62 |
| 15.1 | темный центр / dark center | 0.11 | 420 | 147 | 0.36 | 100 | 1512 | ± 21 |
| 16.1 | темный центр, слабозональный / dark center, weak zonality | 0.21 | 487 | 266 | 0.57 | 111 | 1484 | ± 23 |
| 17.1 | темный центр, слабозональный / dark center, weak zonality | 0.43 | 240 | 76.8 | 0.33 | 64.5 | 1736 | ± 29 |
| 18.1 | светлый центр / light center | 0.47 | 53.3 | 38.3 | 0.74 | 23.1 | 2657 | ± 31 |
| 19.1 | светлый центр, слабозональный / light center, weak zonality | 0.07 | 145 | 65.9 | 0.47 | 38.6 | 1775 | ± 29 |
| 20.1 | светлый центр / light center | 0.19 | 104 | 133.4 | 1.33 | 53.1 | 3283 | ± 13 |
| 20.2 | темная кайма / dark margin | 0.10 | 350 | 104 | 0.31 | 178 | 3098 | ± 9 |
| 21.1 | темный центр, слабозональный / dark center, weak zonality | 0.57 | 184 | 114 | 0.64 | 41.3 | 1459 | ± 42 |
| 22.1 | темная зона dark zone | 0.05 | 348 | 97.3 | 0.29 | 81.5 | 1579 | ± 20 |
| 23.1 | темный центр, зональный / dark center, zonal | 0.03 | 357 | 191 | 0.55 | 81.7 | 1491 | ± 20 |
| 24.1 | темный центр dark center | 0.64 | 201 | 108 | 0.55 | 65.8 | 2011 | ± 37 |
| 25.1 | темная зона dark zone | 0.62 | 123 | 30.1 | 0.25 | 35.5 | 1920 | ± 34 |
| 26.1 | темный центр, слабозональный / dark center, weak zonality | 0.00 | 188 | 91.1 | 0.50 | 42.9 | 1495 | ± 27 |
| 27.1 | темный центр, зональный / dark center, zonal | 0.12 | 448 | 224 | 0.52 | 100 | 1489 | ± 21 |
| 28.1 | темный центр, зональный / dark center, zonal | 0.13 | 301 | 167 | 0.57 | 75.1 | 1728 | ± 27 |
| 29.1 | светлый центр / light center | 0.00 | 116 | 131 | 1.16 | 47.9 | 2595 | ± 18 |
| 30.1 | темный центр, слабозональный / dark center, weak zonality | 0.06 | 178 | 173 | 1.01 | 38.0 | 1478 | ± 31 |
| 31.1 | светлый центр, зональный / light center, zonal | 0.22 | 240 | 138 | 0.60 | 63.4 | 1732 | ± 32 |
| 32.1 | светлый центр / light center | 0.16 | 56.0 | 3.80 | 0.07 | 16.6 | 1902 | ± 41 |
| 33.1 | темная зона / dark zone | 0.23 | 214 | 95.4 | 0.46 | 46.7 | 1464 | ± 33 |
| 34.1 | светлый центр / light center | 0.85 | 61.9 | 26.1 | 0.44 | 9.07 | 1007 | ± 21 |
| 35.1 | темная зона / dark zone | 0.33 | 183 | 157 | 0.89 | 18.3 | 706 | ± 13 |
| 37.1 | темная кайма / dark margin | 0.33 | 379 | 103 | 0.28 | 87.6 | 1485 | ± 26 |

Проба MY-08/4 / Sample MY-08-4/4

Примечание. Номер аналитической точки соответствует номеру зерна и кратера в пределах этого зерна. Ошибки для интервала 1σ ; Pb_c and Pb^* — нерадиогенный и радиогенный свинец соответственно. Ошибка калибровки стандарта — 0.56% (1σ). Изотопные отношения скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D, % — Дискордантность: $D=100*{[\text{Возраст } ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}]/[\text{Возраст } ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}]-1}$. Курсивом отмечены значения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возраста.

Note. Number of analytical point corresponds to number of grain and crater within this grain. Errors for interval 1σ ; Pb_c and Pb^* — radiogenic and non-radiogenic lead accordingly. Calibration error 0.56% (1σ). Isotope relations are corrected by ^{204}Pb . D, % — Discordancy: $D=100*{[\text{Age}(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})]/[\text{Age}(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U})]-1}$. $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -values are in italic.

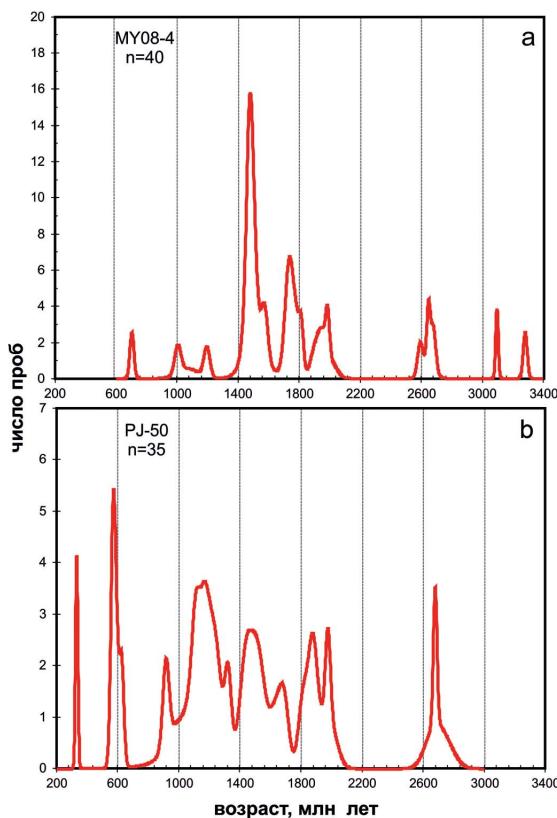


Рис. 6. Распределение значений U-Pb-возраста циркона из проявления Ичетью (а) и Пижемского месторождения (б)

Fig. 6. Distribution of U-Pb-values of age of zircons of the Ichetu occurrence (a) and the Pizhemsky deposit (b)

Основная часть фигуративных точек расположена на конкордии или вблизи нее в интервале примерно от 2000 до 1000 млн лет (рис. 5). На графике с конкордией статистически выделяются два конкордантных кластера: первый древний, с возрастом (1751 ± 15) млн лет (для 6 точек), второй более молодой, с возрастом (1483 ± 10) млн лет (для 12 точек). Менее чем 1483 млн лет возраст циркона установлен только для 4 точек циркона (35.1, 34.1, 14.1 и 10.1, табл. 1). Эти два конкордантных кластера выделяются максимальными пиками на относительной вероятности распространенности U-Pb-возраста (рис. 6, а). К ним примыкает возрастной пик с отметкой около 1930 млн лет, по цирконам которого возрастной кластер, однако, не расчитывается. Общей закономерностью распространенности значений возраста для циркона из проявления Ичетью является резкое преобладание протерозойских значений возраста (30 определений из 40, табл. 1).

Аналогичные построения для циркона из Пижемского месторождения [9] также показали преобладание отмечок возраста в интервале 900—2000 млн лет (рис. 6, б). Примечательно, что для циркона из проявления Ичетью и из Пижемского месторождения в целом совпадают отметки наиболее проявленных пиков распределения возраста как в области протерозойских значений, так и в области архейских значений (около 2650 млн лет). Циркон из Пижемского месторождения отличается наличием четко проявленного пика с возрастом около 600 млн лет (рис. 6, б). Это значение возраста хорошо коррелируется с возрастом лампрофировых даек — около (606 ± 10) млн лет [7] — и возрастом рудных минералов из Новобобровского комплексного редкometалльно-торий-редкоземельного место-

рождения на Среднем Тимане — около 580 млн лет [16].

В целом сравнение относительно распространенности значений возраста для циркона из проявления Ичетью и Пижемского месторождения подтверждает единый источник циркона для этих двух промышленных объектов. Наличие не только протерозойских, но и архейских датировок циркона свидетельствует о поступлении циркона из различных по глубине залегания пород фундамента в районе современного расположения Среднего Тимана.

Геохимия циркона

Проба MY08-4. По характеру распределения REE четко обособляются пять точек анализа, относящиеся к темным в CL зонам циркона, преимущественно находящимся в краевой части зерен (рис. 4, а). Суммарное содержание REE в них составляет в среднем 3900 ppm, достигая 7600 ppm (табл. 2). Характерными особенностями являются выпложенность спектра с сохранением его дифференцированности от легких к тяжелым REE в незначительной степени ($\text{Lu}_{\text{N}}/\text{La}_{\text{N}}$ отношение в среднем 150), практический полное отсутствие положительной Ce-аномалии (Ce/Ce^* не превышает 2.2) и редуцированная отрицательная Eu-аномалия (Eu/Eu^* в среднем равняется 0.66, табл. 2). Четыре спектра REE из пяти подобны и практически сливаются вместе на графике с логарифмическим масштабом нормированного содержания (рис. 7, а). Это свидетельствует о закономер-

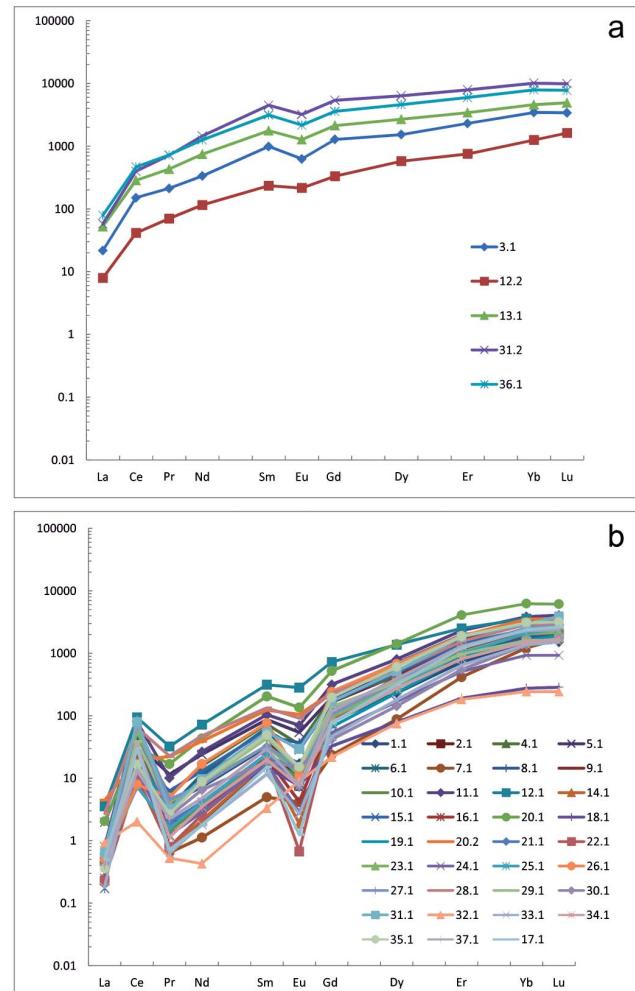


Рис. 7. Спектры REE для циркона из проявления Ичетью, проба MY08-4

Fig. 7. REE patterns in zircons from the Ichetu occurrence, sample MY08-4



Таблица 2. Содержание редких и редкоземельных элементов в цирконе из проявления Ичтюй (ppm)

Table 2. Trace and rare earth elements contents ppm for zircons from the Ichetu occu

Проба MY-08/4 / Sample MY-08/4

| Компонент Component | Темные в CL зоны и каймы Dark zones and margins | | | | | | | | | | | | Центральные части зерен циркона / Central parts of zircon grains | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|---|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|-----|
| | 13.1 | 31.2 | 36.1 | 3.1 | 12.2 | 1.1 | 2.1 | 4.1 | 5.1 | 6.1 | 7.1 | 8.1 | 9.1 | 10.1 | 11.1 | 12.1 | 14.1 | 15.1 | 16.1 | 17.1 | 18.1 | 19.1 | 20.1 | 20.2 | |
| La | 12.4 | 13.7 | 18.8 | 5.12 | 1.87 | 0.14 | 0.11 | 0.10 | 0.47 | 0.04 | 0.10 | 0.05 | 0.10 | 0.11 | 0.19 | 0.84 | 0.06 | 0.19 | 0.06 | 0.12 | 0.11 | 0.10 | 0.48 | 1.06 | |
| Ce | 174 | 244 | 287 | 92.2 | 25.3 | 47.3 | 6.15 | 26.9 | 21.2 | 30.0 | 50.7 | 22.2 | 43.4 | 58.5 | 49.0 | 57.7 | 13.8 | 11.0 | 41.6 | 18.3 | 12.1 | 18.3 | 19.0 | 11.9 | |
| Pr | 39.9 | 66.1 | 67.4 | 19.7 | 6.48 | 0.37 | 0.33 | 0.51 | 1.07 | 0.31 | 0.06 | 0.25 | 0.07 | 0.13 | 0.93 | 2.99 | 0.07 | 0.58 | 0.11 | 0.07 | 0.17 | 0.19 | 1.56 | 2.06 | |
| Nd | 340 | 665 | 571 | 152 | 52.5 | 3.35 | 4.63 | 7.18 | 11.0 | 5.28 | 0.51 | 4.93 | 0.82 | 1.67 | 12.1 | 33.0 | 1.0 | 5.94 | 1.43 | 0.80 | 1.81 | 1.65 | 19.8 | 17.8 | |
| Sm | 261 | 665 | 462 | 146 | 34.5 | 4.67 | 7.00 | 10.8 | 12.9 | 9.40 | 0.74 | 6.93 | 2.45 | 3.54 | 15.3 | 46.6 | 2.64 | 8.69 | 3.11 | 2.24 | 2.19 | 2.77 | 30.2 | 18.2 | |
| Eu | 71.6 | 181 | 121 | 35.2 | 12.1 | 0.96 | 0.43 | 1.95 | 3.05 | 0.49 | 0.23 | 2.08 | 0.42 | 0.54 | 3.95 | 16.0 | 0.10 | 1.60 | 0.24 | 0.07 | 0.43 | 0.47 | 7.61 | 5.90 | |
| Gd | 424 | 1071 | 710 | 255 | 66.0 | 16.5 | 32.7 | 38.3 | 38.8 | 44.4 | 4.67 | 25.1 | 18.8 | 21.0 | 62.8 | 145 | 16.8 | 33.1 | 16.4 | 15.2 | 6.50 | 13.2 | 104 | 46.3 | |
| Dy | 659 | 1569 | 1127 | 376 | 141 | 56.7 | 108 | 103 | 120 | 171 | 21.6 | 74.8 | 103 | 79.8 | 197 | 338 | 79.4 | 119 | 78.4 | 77.4 | 19.5 | 57.3 | 347 | 163 | |
| Er | 548 | 1267 | 949 | 368 | 120 | 1.15 | 198 | 172 | 211 | 313 | 66.2 | 145 | 264 | 192 | 369 | 402 | 181 | 229 | 179 | 194 | 30.7 | 135 | 653 | 300 | |
| Yb | 738 | 1632 | 1270 | 553 | 201 | 219 | 310 | 280 | 363 | 465 | 196 | 291 | 525 | 404 | 623 | 581 | 328 | 390 | 382 | 384 | 44.6 | 259 | 1004 | 569 | |
| Lu | 121 | 244 | 190 | 83.4 | 39.8 | 37.0 | 49.3 | 46.8 | 57.4 | 66.8 | 41.1 | 49.3 | 90.2 | 68.9 | 101 | 85.2 | 53.0 | 62.5 | 64.5 | 64.6 | 7.07 | 47.1 | 151 | 88.7 | |
| Li | 107 | 51.2 | 90.6 | 121 | 127 | 0.49 | 13.2 | 2.76 | 2.35 | 26.1 | 78.4 | 28.2 | 88.2 | 0.07 | 0.06 | 49.1 | 28.7 | 43.1 | 88.3 | 7.37 | 2.03 | 8.60 | 28.7 | 130 | |
| P | 2190 | 4627 | 3656 | 1066 | 400 | 179 | 165 | 181 | 296 | 182 | 50.0 | 80.2 | 273 | 141 | 238 | 644 | 178 | 278 | 174 | 329 | 127 | 236 | 395 | 552 | |
| Ca | 1044 | 2569 | 1686 | 502 | 117 | 6.44 | 0.45 | 7.72 | 53.9 | 0.67 | 0.45 | 0.41 | 1.14 | 0.41 | 0.45 | 87.6 | 0.59 | 12.8 | 0.22 | 1.14 | 1.64 | 5.23 | 70.3 | 84.9 | |
| Ti | 141 | 446 | 280 | 109 | 29.1 | 14.1 | 26.9 | 17.0 | 22.8 | 11.9 | 10.9 | 14.1 | 6.35 | 14.5 | 9.92 | 24.7 | 15.2 | 19.1 | 18.9 | 13.3 | 12.1 | 12.6 | 16.2 | 44.3 | |
| Sr | 6.14 | 35.72 | 10.2 | 3.59 | 0.12 | 0.23 | 0.18 | 0.29 | 0.42 | 0.33 | 0.17 | 0.33 | 0.50 | 0.11 | 0.32 | 1.01 | 0.20 | 0.38 | 0.36 | 0.42 | 0.30 | 0.23 | 1.46 | 2.97 | |
| Y | 3643 | 8775 | 6333 | 2337 | 869 | 645 | 1162 | 1078 | 1201 | 1857 | 379 | 870 | 1427 | 1104 | 2211 | 2784 | 996 | 1365 | 1000 | 1030 | 211 | 738 | 3568 | 1791 | |
| Nb | 46.6 | 151 | 69.9 | 57.3 | 9.31 | 12.3 | 8.73 | 10.5 | 17.2 | 20.1 | 28.8 | 18.7 | 19.3 | 9.91 | 9.74 | 14.5 | 6.69 | 11.8 | 13.6 | 10.3 | 59.1 | 46.4 | 53.8 | 51.5 | |
| Ba | 26.5 | 167 | 44.7 | 20.2 | 6.54 | 1.85 | 1.35 | 1.77 | 3.17 | 1.12 | 1.53 | 1.37 | 1.23 | 1.23 | 1.17 | 2.02 | 5.44 | 1.73 | 2.44 | 1.01 | 1.57 | 4.17 | 1.70 | 5.43 | |
| Hf | 17029 | 12360 | 10747 | 12175 | 11537 | 8720 | 6943 | 7506 | 9487 | 5969 | 9557 | 7507 | 9439 | 9808 | 7382 | 8997 | 8862 | 9353 | 10373 | 10700 | 8967 | 9485 | 9016 | 11660 | |
| Th | 156 | 766 | 749 | 326 | 52.8 | 87.6 | 46.6 | 115 | 149 | 117 | 290 | 99.4 | 244 | 236 | 186 | 500 | 998 | 124 | 474 | 266 | 668 | 817 | 430 | 88.4 | 242 |
| U | 1229 | 1726 | 1128 | 1044 | 837 | 89.8 | 198 | 137 | 433 | 274 | 409 | 186 | 500 | 998 | 124 | 474 | 266 | 668 | 817 | 430 | 88.4 | 242 | 190 | 620 | |
| Th/U | 0.13 | 0.44 | 0.66 | 0.31 | 0.06 | 0.98 | 0.24 | 0.84 | 0.34 | 0.43 | 0.71 | 0.54 | 0.49 | 0.49 | 0.24 | 0.92 | 0.40 | 0.27 | 0.26 | 0.40 | 0.23 | 0.53 | 0.31 | 1.18 | |
| Eu/Eu* | 0.66 | 0.65 | 0.65 | 0.56 | 0.77 | 0.34 | 0.09 | 0.29 | 0.42 | 0.07 | 0.38 | 0.48 | 0.19 | 0.19 | 0.39 | 0.59 | 0.05 | 0.29 | 0.10 | 0.04 | 0.34 | 0.24 | 0.41 | 0.62 | |
| Ce/Ce* | 1.90 | 1.96 | 1.95 | 2.22 | 1.75 | 49.5 | 7.79 | 29.3 | 7.28 | 64.9 | 158 | 48.2 | 121 | 119 | 28.2 | 8.82 | 51.7 | 8.02 | 123 | 49.8 | 21.8 | 33.2 | 5.27 | 1.95 | |
| ΣREE | 3390 | 7617 | 5772 | 2086 | 702 | 501 | 716 | 687 | 841 | 1105 | 382 | 622 | 1048 | 830 | 1434 | 1708 | 676 | 768 | 757 | 125 | 536 | 2338 | 1224 | | |
| ΣLREE | 566 | 989 | 944 | 269 | 86.1 | 51.1 | 11.2 | 34.7 | 33.7 | 51.4 | 27.4 | 44.4 | 60.5 | 62.3 | 94.5 | 14.9 | 17.7 | 43.2 | 19.3 | 14.2 | 20.2 | 40.8 | 32.9 | | |
| ΣHREE | 2491 | 5783 | 4245 | 1635 | 569 | 445 | 697 | 640 | 791 | 1059 | 329 | 585 | 1001 | 766 | 1353 | 1551 | 659 | 832 | 721 | 735 | 108 | 512 | 2259 | 1167 | |
| Lu _N /La _N | 94.4 | 172 | 97.4 | 157 | 205 | 2471 | 4277 | 4664 | 1184 | 15903 | 3894 | 9701 | 8467 | 6172 | 5104 | 979 | 8488 | 3167 | 10473 | 5230 | 624 | 4770 | 2996 | 807 | |
| Lu _N /Gd _N | 2.31 | 1.84 | 2.17 | 2.65 | 4.88 | 18.2 | 12.2 | 9.88 | 11.9 | 12.2 | 71.1 | 15.9 | 38.9 | 26.5 | 12.9 | 4.77 | 25.6 | 15.3 | 31.7 | 34.4 | 8.80 | 28.9 | 11.8 | 15.5 | |
| Sm _N /La _N | 33.7 | 78.0 | 39.3 | 45.7 | 29.5 | 51.7 | 101 | 179 | 44.1 | 372 | 11.6 | 227 | 38.2 | 52.8 | 129 | 88.9 | 73.2 | 83.9 | 30.1 | 32.1 | 46.6 | 99.8 | 27.5 | | |
| T(Ti), °C | 1047 | 1243 | 1157 | 1010 | 847 | 774 | 839 | 792 | 821 | 750 | 774 | 704 | 777 | 742 | 830 | 803 | 781 | 760 | 769 | 760 | 764 | 788 | 788 | | |

Таблица 2. Окончание
 Table 2. End

| Компонент Component | Проба MY-08/4 / Sample MY-08/4 | | | | | | | | | | | | Проба ПМС-239 / Sample ПМС-239 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------------------------------------|------|------|-------|-------|------|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-----|
| | Центральные части зерен циркона / Central parts of zircon grains | | | | | | | | | | | | Измененный циркон Altered zircon | | | | | | Неизмененный циркон Unaltered zircon | | | | | | | | | | | | |
| La | 21.1 | 22.1 | 23.1 | 24.1 | 25.1 | 26.1 | 27.1 | 28.1 | 29.2 | 30.1 | 31.1 | 32.1 | 33.1 | 34.1 | 35.1 | 37.1 | 66.2 | 39.2 | 39.3 | 39.1 | 411.2 | 411.1 | 66.1 | | | | | | | | |
| Ce | 0.08 | 0.05 | 0.13 | 0.07 | 0.12 | 0.17 | 0.64 | 0.15 | 0.08 | 0.16 | 0.22 | 0.04 | 0.09 | 0.10 | 0.10 | 14.3 | 17.6 | 6.48 | 0.31 | 1.32 | 0.42 | 0.07 | 0.64 | 16.5 | | | | | | | |
| Pr | 37.2 | 6.32 | 34.6 | 7.99 | 4.47 | 4.87 | 45.0 | 39.3 | 23.8 | 51.3 | 48.4 | 1.22 | 20.1 | 19.9 | 10.1 | 8.04 | 278 | 272 | 115 | 33.6 | 42.1 | 8.64 | 0.07 | 0.82 | 0.26 | | | | | | |
| Nd | 0.18 | 0.07 | 0.37 | 0.11 | 0.15 | 0.46 | 0.42 | 2.11 | 0.30 | 0.23 | 0.30 | 0.05 | 0.06 | 0.10 | 0.25 | 0.21 | 74.3 | 66.9 | 23.0 | 0.80 | 5.07 | 1.92 | 3.57 | 41.5 | 7.34 | 3.77 | | | | | |
| Sm | 3.59 | 2.95 | 4.88 | 2.55 | 3.53 | 11.3 | 4.94 | 19.7 | 6.40 | 2.71 | 8.05 | 0.49 | 1.72 | 2.92 | 7.31 | 4.38 | 456 | 349 | 143 | 32.7 | 40.7 | 7.07 | 8.58 | 11.8 | 41.5 | 7.34 | | | | | |
| Eu | 0.41 | 0.04 | 0.63 | 0.16 | 0.73 | 0.62 | 0.79 | 5.15 | 0.81 | 0.85 | 1.66 | 0.50 | 0.15 | 0.42 | 0.85 | 0.43 | 132 | 111 | 44.6 | 11.4 | 13.7 | 1.86 | 0.78 | 1.86 | 0.78 | 1.86 | 0.78 | | | | |
| Gd | 17.5 | 17.3 | 19.0 | 10.7 | 15.5 | 48.2 | 21.0 | 46.0 | 27.7 | 8.34 | 33.9 | 4.31 | 9.27 | 15.7 | 39.1 | 23.7 | 719 | 675 | 335 | 175 | 82.0 | 24.0 | 35.4 | 130 | 82.5 | 130 | 130 | | | | |
| Dy | 76.4 | 86.9 | 74.6 | 41.5 | 66.9 | 167 | 85.6 | 128 | 83.5 | 35.1 | 126 | 18.5 | 44.1 | 67.6 | 149 | 96.6 | 1211 | 1465 | 910 | 607 | 167 | 82.5 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | | | | |
| Er | 167 | 193 | 164 | 82.0 | 158 | 306 | 201 | 248 | 155 | 87.6 | 292 | 29.1 | 103 | 130 | 298 | 209 | 989 | 1440 | 1113 | 851 | 171 | 115 | 222 | 222 | 222 | 222 | 222 | 222 | | | |
| Yb | 335 | 367 | 333 | 148 | 336 | 474 | 409 | 463 | 259 | 220 | 475 | 39.0 | 221 | 246 | 499 | 372 | 1308 | 1560 | 1202 | 968 | 229 | 189 | 356 | 356 | 356 | 356 | 356 | 356 | 356 | | |
| Lu | 55.7 | 59.2 | 53.6 | 22.9 | 60.7 | 76.5 | 68.6 | 74.9 | 39.8 | 42.5 | 95.6 | 5.97 | 37.1 | 41.7 | 78.1 | 59.4 | 187 | 208 | 156 | 121 | 33.7 | 32.8 | 54.9 | 54.9 | 54.9 | 54.9 | 54.9 | 54.9 | 54.9 | | |
| Li | 67.6 | 8.47 | 4.79 | 84.6 | 54.1 | 0.79 | 102 | 33.2 | 7.20 | 4.52 | 35.5 | 0.12 | 3.28 | 0.56 | 0.11 | 27.5 | 12.5 | 43.4 | 56.9 | 45.5 | 13.8 | 19.9 | 1.47 | 1.47 | 1.47 | 1.47 | 1.47 | 1.47 | 1.47 | | |
| P | 244 | 251 | 179 | 96.3 | 80.7 | 311 | 202 | 428 | 224 | 76.1 | 352 | 11.6 | 99.3 | 188 | 188 | 176 | 4517 | 5518 | 1541 | 126 | 551 | 426 | 297 | 297 | 297 | 297 | 297 | 297 | 297 | | |
| Ca | 1.12 | 0.76 | 13.2 | 0.47 | 5.48 | 6.25 | 7.16 | 80.0 | 7.78 | 8.57 | 0.53 | 0.33 | 0.73 | 0.71 | 3.39 | 13.1 | 1502 | 782 | 290 | 15.0 | 93.7 | 21.7 | 15.6 | 21.7 | 15.6 | 21.7 | 15.6 | 21.7 | 15.6 | | |
| Ti | 38.0 | 15.6 | 21.9 | 57.8 | 7.46 | 27.2 | 15.2 | 22.4 | 8.25 | 17.0 | 22.2 | 4.29 | 18.0 | 34.6 | 13.1 | 11.3 | 376 | 266 | 135 | 16.6 | 28.5 | 9.57 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | 32.2 | | | |
| Sr | 0.38 | 0.28 | 0.48 | 0.21 | 0.48 | 0.40 | 0.41 | 1.22 | 0.33 | 0.35 | 0.11 | 0.05 | 0.15 | 0.32 | 0.45 | 0.50 | 7.73 | 4.38 | 2.37 | 1.21 | 2.01 | 1.12 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | 1.10 | | | | |
| Y | 938 | 1139 | 887 | 498 | 954 | 1977 | 1131 | 1388 | 922 | 470 | 1614 | 203 | 586 | 738 | 1718 | 1172 | 6438 | 8892 | 6434 | 5009 | 1193 | 788 | 1365 | 1365 | 1365 | 1365 | 1365 | 1365 | | | |
| Nb | 13.6 | 33.4 | 37.9 | 24.4 | 23.4 | 26.4 | 33.4 | 39.6 | 27.7 | 33.5 | 12.6 | 15.7 | 14.8 | 6.42 | 5.87 | 19.5 | 135 | 141 | 110 | 149 | 74.1 | 87.1 | 71.4 | 71.4 | 71.4 | 71.4 | 71.4 | 71.4 | | | |
| Ba | 2.15 | 2.13 | 2.15 | 1.83 | 1.44 | 0.90 | 1.34 | 3.48 | 1.29 | 1.87 | 1.81 | 0.99 | 1.04 | 0.99 | 1.43 | 1.05 | 44.7 | 25.3 | 9.99 | 5.61 | 10.6 | 5.43 | 4.18 | 4.18 | 4.18 | 4.18 | 4.18 | 4.18 | | | |
| Hf | 9396 | 9503 | 9916 | 7863 | 9939 | 8726 | 10092 | 10421 | 9124 | 9831 | 7981 | 8663 | 9065 | 9435 | 9673 | 10005 | 11737 | 5691 | 6046 | 5415 | 9735 | 9771 | 8268 | 8268 | 8268 | 8268 | 8268 | 8268 | 8268 | | |
| Th | 196 | 128 | 251 | 116 | 34.1 | 109 | 293 | 205 | 159 | 197 | 159 | 2.43 | 101 | 31.8 | 239 | 128 | 432 | 327 | 289 | 175 | 173 | 75.6 | 91.1 | 91.1 | 91.1 | 91.1 | 91.1 | 91.1 | | | |
| U | 403 | 604 | 629 | 311 | 222 | 321 | 843 | 550 | 205 | 297 | 403 | 89.2 | 313 | 105 | 372 | 652 | 915 | 695 | 798 | 670 | 371 | 435 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | 275 | | |
| Th/U | 0.49 | 0.21 | 0.40 | 0.37 | 0.15 | 0.34 | 0.35 | 0.37 | 0.78 | 0.66 | 0.39 | 0.03 | 0.32 | 0.30 | 0.64 | 0.20 | 0.47 | 0.47 | 0.36 | 0.26 | 0.47 | 0.17 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | | |
| Eu/Eu* | 0.16 | 0.02 | 0.20 | 0.09 | 0.30 | 0.08 | 0.24 | 0.52 | 0.19 | 0.55 | 0.31 | 1.06 | 0.12 | 0.19 | 0.15 | 0.13 | 0.70 | 0.70 | 0.62 | 0.46 | 0.72 | 0.43 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | | |
| Ce/Ce* | 72.5 | 24.2 | 37.3 | 21.2 | 8.16 | 5.03 | 41.0 | 8.21 | 27.4 | 89.9 | 53.8 | 2.85 | 97.0 | 50.9 | 16.8 | 13.7 | 2.06 | 1.92 | 2.27 | 16.4 | 3.94 | 3.57 | 30.21 | 30.21 | 30.21 | 30.21 | 30.21 | 30.21 | 30.21 | | |
| Σ REE | 695 | 734 | 689 | 318 | 648 | 1097 | 840 | 1049 | 601 | 452 | 1086 | 99.6 | 437 | 526 | 1086 | 776 | 6006 | 6681 | 4245 | 2812 | 828 | 469 | 828 | 828 | 828 | 828 | 828 | 828 | 828 | | |
| Σ RE | 39.4 | 7.62 | 39.0 | 9.49 | 6.61 | 13.1 | 49.2 | 63.7 | 28.1 | 54.5 | 53.2 | 1.68 | 21.0 | 21.7 | 14.5 | 10.5 | 1004 | 873 | 340 | 46.4 | 90.0 | 17.2 | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 | 20.6 | | |
| Σ HRREE | 652 | 723 | 644 | 306 | 637 | 1072 | 785 | 960 | 565 | 394 | 1023 | 96.9 | 415 | 501 | 1063 | 761 | 4415 | 3716 | 2721 | 683 | 443 | 798 | 798 | 798 | 798 | 798 | 798 | 798 | 798 | 798 | |
| Σ Lu _N /La _N | 6368 | 10522 | 3827 | 3014 | 4861 | 6148 | 3967 | 1134 | 2642 | 4953 | 5914 | 261 | 8393 | 4683 | 8817 | 5931 | 126 | 114 | 232 | 3767 | 246 | 760 | 7896 | 7896 | 7896 | 7896 | 7896 | 7896 | 7896 | | |
| Σ Lu _N /Gd _N | 25.8 | 27.8 | 22.8 | 17.3 | 31.7 | 12.8 | 26.4 | 13.2 | 11.6 | 41.2 | 22.8 | 11.2 | 32.4 | 21.5 | 16.2 | 20.3 | 2.10 | 2.50 | 3.76 | 5.59 | 3.32 | 11.0 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | |
| Sm _N /La _N | 68.2 | 87.0 | 58.0 | 55.8 | 47.0 | 151 | 47.5 | 49.6 | 70.6 | 52.4 | 82.8 | 3.55 | 64.7 | 54.5 | 137 | 72.6 | 51.2 | 31.8 | 35.5 | 170 | 49.5 | 27.2 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | 20.5 | |
| T(Ti), °C | 876 | 784 | 817 | 926 | 718 | 840 | 782 | 819 | 726 | 792 | 819 | 673 | 798 | 866 | 767 | 754 | 1210 | 1148 | 1040 | 790 | 845 | 739 | 858 | 858 | 858 | 858 | 858 | 858 | 858 | 858 | 858 |

ном (равновесном) характере вхождения несовместимых элементов REE в состав циркона при его изменении.

Данная группа циркона отличается от остальных точек циркона повышенным содержанием всех проанализированных элементов (табл. 2). При этом степень обогащения редкими элементами варьирует в значительной степени: для Ca превышение составляет примерно 100 раз, для P — 10 раз, для остальных элементов 2–3 раза или несколько более, для Hf различие в содержании для сравниваемых групп циркона минимально — примерно полтора раза. Величина Th/U-отношения сильно варьирует от 0.06 до 0.66, составляя в среднем 0.32 (табл. 2). Содержание Ti в среднем составляет 200 ppm при максимальном значении 446 ppm. Учитывая, что наиболее корректные определения по геотермометру [26] «Ti-в-цирконе» получаются при содержаниях Ti не более 20 ppm [19], термометр для данной группы использовать нельзя. Содержание Ti демонстрирует положительную корреляцию с содержанием Ca — элементом-индикатором метасоматического воздействия на циркон и нарушения U-Pb-изотопной системы [20].

Остальные проанализированные точки циркона из пробы MY08-4, отличающиеся как структурой и окраской в CL (рис. 4, a), так и значением U-Pb-возраста (табл. 1), характеризуются типичными для циркона магматического генезиса [22] фракционированными спектрами распределения REE ($\text{Lu}_{\text{N}}/\text{La}_{\text{N}}$ -отношение в среднем 5170) с отчетливо проявленными положительной Ce-аномалией (Ce/Ce^* в среднем 43) и отрицательной Eu-аномалией (Eu/Eu^* в среднем 0.28). На рис. 7, b спектры распределения REE сливаются в полосу шириной в один порядок нормализованных содержаний. При этом наблюдается закономерность в том, что спектры REE с максимальным их суммарным содержанием (более 1100 ppm) отличаются выложенными Eu- и Ce-аномалиями. По всей видимости, это результат воздействия на циркон гидротермальных процессов, описанных выше, приведших к образованию группы аномального по составу циркона. Две точки циркона (32.1 и 18.1, рис. 7, b), напротив, выделяются пониженным содержанием тяжелых REE, а для точки 32.1 еще и U-образным провалом в области легких REE. Такая особенность распределения REE характерна скорее для метаморфических цирконов, чем для магматических. Зерно циркона, в котором проанализирована точка 32.1, возможно, принадлежит к эклогитовому типу, учитывая характерный спектр REE с отрицательной аномалией по Nd, аномально низкое содержание Th и Th/U-отношение [15].

Содержание редких элементов в рассматриваемой популяции циркона значительно варьирует, однако не выходит за границы диапазонов содержания, характерных для циркона магматического генезиса [21]. Температура кристаллизации циркона, рассчитанная по геотермометру [26] «Ti-в-цирконе», варьирует от 670 до 926 °C, составляя в среднем 790 °C. Эти определения попадают в температурный интервал кристаллизации щелочных пород кислого и среднего состава, возможно преобладающих в составе фундамента Среднего Тимана.

Проба ПМС-239. Спектры распределения REE (рис. 8, a–c) в неизмененном цирконе, отличающемся светло-серым оттенком в BSE-изображении (рис. 4, b–d, точки анализа 39.1, 66.1, 411.1), имеют типичный для циркона магматического генезиса дифференцированный характер с увеличением содержания от легких к тяжелым REE [21, 23] и четко выраженным положительной Ce-аномалией (Ce/Ce^* достигает 30.1) и отрицательной Eu-аномалией (Eu/Eu^* составляет в среднем 0.34). Суммарное содержание REE достигает

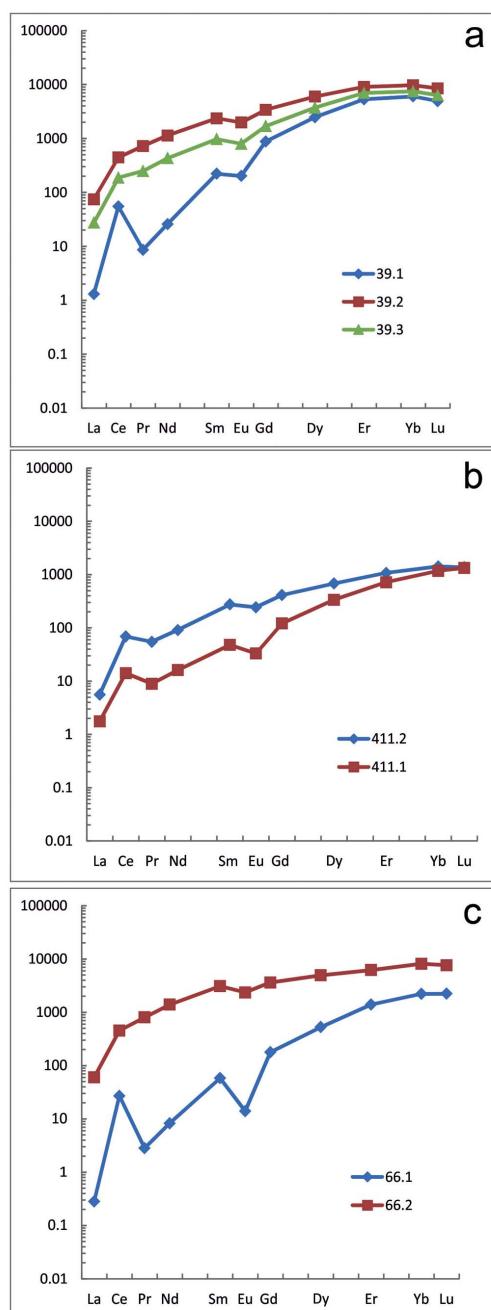


Рис. 8. Спектры REE для циркона из проявления Ичетью, проба ПМС-239

Fig. 8. REE patterns in zircons from the Ichetu occurrence, sample PMS-239

2812 ppm, содержание Y в среднем составляет 2388 ppm, P — 283 ppm, Ca — 17 ppm, Ti — 19.4 ppm (табл. 2).

Зоны изменения циркона с характерным темным оттенком в BSE приурочены к краевым участкам зерен (точки 39.2, 39.3 — дендритовидные изменения; постепенное замещение каймы — точка 66.2, рис. 4, b, c), а также к центральной части зерна (точка 411.2, рис. 4, d). В последнем случае очевидно, что изменение центральной части зерна (метамиктного ядра?) вызвано поступлением гидротермальных растворов по системе трещин, соединяющих краевую и центральную части зерна. По составу зоны изменения отличаются от неизмененного циркона повышенным содержанием REE (в среднем 4440 ppm, табл. 2), Y — 5339 ppm, P — 3032 ppm, Ca — 667 ppm, Ti — 202 ppm.



В зонах изменения содержание HREE увеличивается примерно в 3 раза, LREE в 20 раз. Происходит выполаживание всего спектра REE, редуцирование Ce- и Eu-аномалий. Следует отметить, что содержание U, увеличиваясь в 2–3 раза, в измененных участках не превышает 915 ppm (табл. 2), что отличает зоны изменения от типичного метамиктного циркона. Рост содержания Y в среднем от 788 до 8892 ppm коррелируется с увеличением содержания P—126 и 5518 ppm соответственно, что согласуется с выделенным ранее для цирконов Тимана особым геохимическим типом иттриевых цирконов [9, 12].

Сравнение цирконов проявления Ичетью и Пижемского месторождения

Обогащенные редкими и редкоземельными элементами цирконы из проявления Ичетью (первая группа в настоящей работе, рис. 7, а) обнаруживают значительные черты сходства с группой высоконитриевых цирконов из Пижемского месторождения (рис. 6, а, [9]) в характере распределения REE, отличаясь от них пониженным в пол-

тора-два раза содержанием как REE, так и Y. Для циркона из обоих объектов характерны выполаженные спектры распределения REE за счет повышенного содержания легких REE с редуцированными Ce- и Eu-аномалиями.

В сравниваемых цирконах, как несущих явные следы наложенных изменений состава, так и менее измененных, обнаруживается положительная корреляция Y с P и суммарным содержанием REE (рис. 9, а, б). При этом наблюдается практически полное совпадение полей составов циркона во всем диапазоне содержаний сравниваемых элементов. Примечательно, что Y и суммарное содержание REE демонстрируют положительную корреляцию, близкую к идеальной (рис. 9, б). Содержание Y коррелирует с содержанием Nb только в цирконе с повышенным содержанием Y (более 2000–3000 ppm), для других составов корреляция отсутствует (рис. 9, с). Содержание легких REE положительно коррелирует с содержанием тяжелых REE во всем диапазоне (рис. 9, д). При этом содержание тяжелых всегда превышает содержание легких REE: в измененных темных цирконах отношение HREE/LREE в среднем попадает в

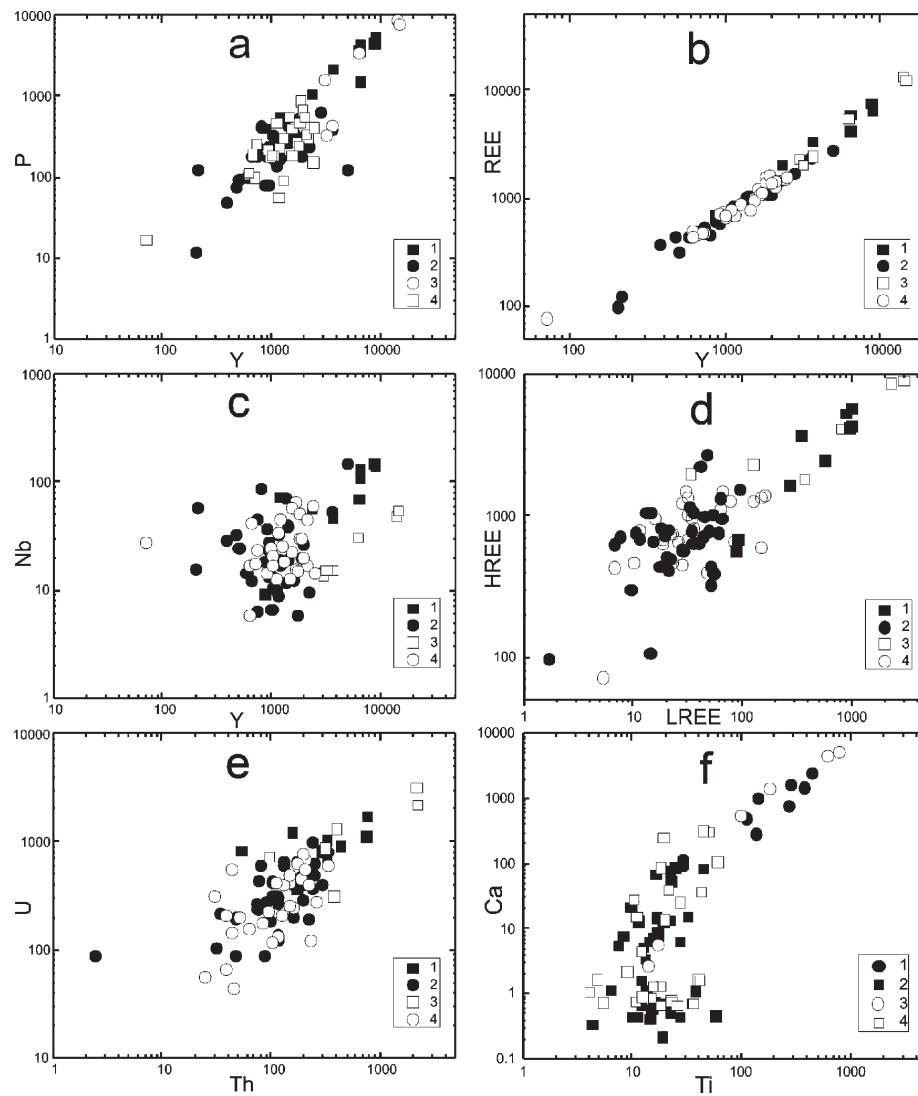


Рис. 9. Соотношение Y-P (а), Y-REE (б), Y-Nb (с), LREE-HREE (д), Th-U (е), Ti-Ca (ж) для цирконов из проявления Ичетью и Пижемского месторождения: 1 — измененный циркон; 2 — неизмененный циркон проявления Ичетью; 3 — высоконитриевый циркон, 4 — умеренно-иттриевый циркон Пижемского месторождения. Содержание всех элементов приведено в ppm

Fig. 9. Ratio of Y-P (a), Y-REE (b), Y-Nb (c), LREE-HREE (d), Th-U (e), Ti-Ca (f) for zircons of the Ichetu occurrence and the Pizhemsky deposit: 1—altered zircons; 2—unaltered zircons (the Ichetu occurrence); 3—high-Y zircons; 4—moderately Y-zircons (the Pizhemsky deposit). Contents of all trace elements are in ppm

интервал 4—6, в неизмененных цирконах оно значительно выше и доходит до 96 (табл. 2). Содержание Th и U в целом положительно коррелирует (рис. 9, e), однако Th/U-отношение значительно варьирует в выделенных группах циркона (табл. 1, 2; [9]). Содержание Ca и Ti не обнаруживает положительной связи при содержании Ti менее 100 ppm (рис. 9, f), при аномально высоком увеличении содержания Ti содержание Ca также увеличивается и может превышать 1000 ppm (табл. 2). Эта особенность подтверждает закономерное вхождение этих элементов в состав циркона при наложенных гидротермально-метасоматических процессах.

Ранее для разделения магматических и гидротермально-метасоматических цирконов было предложено использовать дискриминационные диаграммы, где метасоматические цирконы занимают фигутивное поле, характеризующееся отсутствием Ce-аномалии, пологим характером спектра в области LREE (рис. 10, a, b; [22]). Неизмененные цирконы как проявления Ичетью, так и Пижемского месторождения либо соответствуют полю магматических цирконов, либо тяготеют к нему, а измененные цирконы в поле метасоматических цирконов вообще не попадают. Особенно хорошо это заметно на диаграмме соотношения величин Ce- и Eu-аномалии (рис. 10, c). Неоднозначность выделения полей цирконов на этой диаграмме и, как следствие, возможность ее применимости отмечались в ряде работ [25].

Выводы

Проведенное впервые локальное изотопно-геохимическое исследование циркона из полиминерального проявления Ичетью и сравнение полученных данных с опубликованными нами ранее данными для циркона из сходного и территориально сопряженного Пижемского месторождения титана на Среднем Тимане [9] позволяют сделать следующие выводы.

1. Общей закономерностью распространенности значений возраста для циркона из проявления Ичетью является резкое преобладание протерозойских значений U-Pb-возраста в интервале примерно от 2000 до 1000 млн лет. Присутствуют два узких конкордантных кластера: один древний, с возрастом (1751 ± 15) млн лет, второй более молодой, с возрастом (1483 ± 10) млн лет. Они отвечают контрастным максимальным пикам на относительной вероятности распространенности U-Pb-возраста (рис. 6, a). В настоящее время недостаточно сведений, чтобы увязать эти возрастные интервалы с конкретными геологическими событиями на Тимане, это предстоит сделать в будущем по мере поступления новых данных. Аналогичные построения для циркона из Пижемского месторождения [9] также показали преобладание отметок возраста в интервале 900—2000 млн лет (рис. 6, b). Для циркона из проявления Ичетью и из Пижемского месторождения в целом совпадают отметки наиболее проявленных пиков распределения возраста как в области протерозойских значений, так и в области архейских значений. В целом сравнение относительно распространенности значений возраста для циркона из проявления Ичетью и Пижемского месторождения подтверждает единый источник циркона для этих двух сопряженных промышленных объектов. Наличие не только протерозойских, но и архейских датировок циркона свидетельствует о поступлении циркона из различных по глубине залегания пород фундамента в районе Среднего Тимана.

2. По содержанию редких и редкоземельных элементов в цирконе из проявления Ичетью выделяется группа аномальных по составу зерен циркона, отличающаяся по-

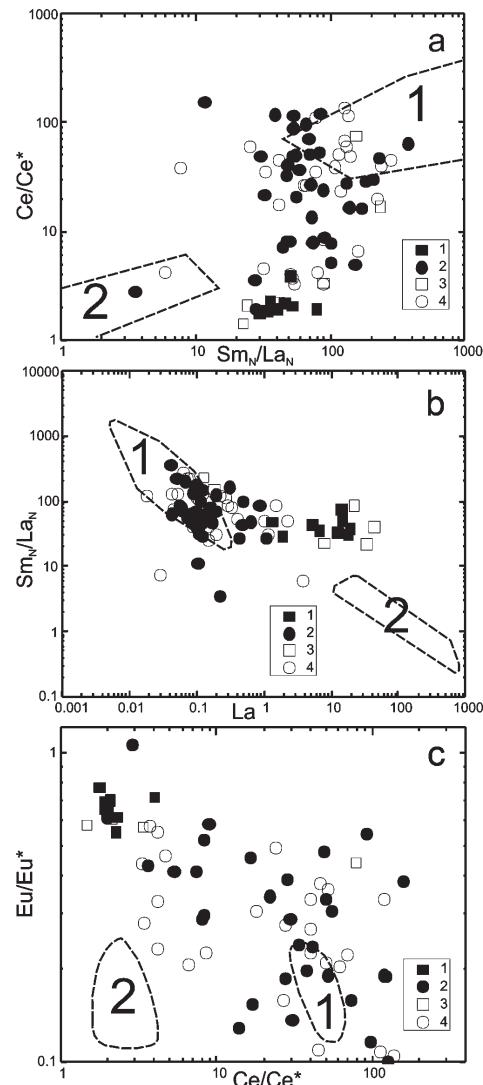


Рис. 10. Соотношение Sm_N/La_N - Ce/Ce^* (a), $\text{La}-\text{Sm}_N/\text{La}_N$ (b) и Ce/Ce^* - Eu/Eu^* (c) для циркона. Показаны поля составов магматического (1) и метасоматического (2) циркона по [21, 24]. Условные обозначения для фигутивных точек циркона совпадают с рис. 9

Fig. 10. Ratio Sm_N/La_N - Ce/Ce^* (a), $\text{La}-\text{Sm}_N/\text{La}_N$ (b) and Ce/Ce^* - Eu/Eu^* (c) for zircons. Fields of composition of magmatic (1) and hydrothermal-metasomatic zircons (2) are shown [21, 24].

Symbols for figurative points of zircon coincide with Fig. 9

вышенным содержанием практически всех проанализированных элементов и характерным выпущенным профилем распределения REE. Невошедший в эту группу циркон имеет черты геохимии циркона магматического генезиса, но в то же время демонстрирует единые тренды вариации состава вместе с измененным цирконом (рис. 7). Обнаруживается практически полное перекрытие полей составов по целому ряду несовместимых элементов-примесей циркона из проявления Ичетью и циркона из Пижемского месторождения. Рассмотренные особенности изменения состава циркона (значительный привнос Y, REE, P, Ca при подчиненном увеличении содержания Th и U) свидетельствуют о гидротермально-метасоматическом характере этого процесса, косвенно подтверждая точку зрения о флюидизатно-туффизитовом генезисе проявления Ичетью.

3. Метасоматический характер увеличения содержания Ti в цирконе вплоть до аномально высоких значений (300—400 ppm) исключает возможность использования



титанового термометра, по крайней мере для измененных разновидностей циркона. Известные более 10 лет дискриимиационные диаграммы для метасоматических и магматических цирконов требуют серьезной корректировки в части конфигурации полей составов.

Авторы благодарят С. Г. Симакина, Е. В. Потапова (ЯФ ФТИАН) и сотрудников ЦИИ ВСЕГЕИ за аналитические исследования циркона, выполненные при финансовой поддержке РФФИ (гранты 16-05-00125 и 17-35-50003). Часть исследования выполнена в рамках НИР ИГЕМ РАН № 72-8 «Эволюция россыпебобразующих систем в процессе литогенеза: от мобилизации вещества до россыпей дальнего сноса».

Литература

1. Взаимоотношение алмаза и карбонадо (по материалам исследования бразильской и среднетиманской коллекций) // А. Б. Макеев, В. Иванух, С. К. Обыден и др. / Доклады АН. 2003. Т. 393. № 3. С. 393–397.
2. Игнатьев В. Д., Бурцев И. Н. Лейкоксен Тимана: Минералогия и проблемы технологии. СПб.: Наука, 1997. 215 с.
3. Калюжный В. А. Некоторые черты ильменито-лейкоксеноносных осадочно-метаморфических фаций сланцев и связанные с ними россыпи на Тимане // Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР и севера Урала. Сыктывкар, 1965. С. 467–473.
4. Колокольцев В. Г., Лисицына М. А. О гидротермально-метасоматическом генезисе лейкоксеновых руд Яргинского месторождения (Южный Тиман) // Вулканогенно-осадочное рудообразование. СПб., 1992. С. 89–91.
5. Макеев А. Б. Пижемское титановое месторождение — флюидизатная кальдера в Пижемской депрессии (Средний Тиман) // Геохимия литогенеза: Материалы Российского совещания с международным участием (Сыктывкар, 17–19 марта 2014 г.). Сыктывкар: Геопринт, 2014. С. 86–89.
6. Макеев А. Б. Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения // Минералогия. 2016. № 1. С. 24–49.
7. Макеев А. Б., Брянчанинова Н. И. Лампрофиры Четласского Камня (Средний Тиман) // Региональная геология и металлогения. 2009. № 37. С. 51–73.
8. Макеев А. Б., Дудар В. А. Минералогия алмазов Тимана. СПб.: Наука, 2001. 336 с.
9. Макеев А. Б., Красоткина А. О., Скублов С. Г. Геохимия и U-Pb-возраст циркона Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 5. С. 38–52.
10. Макеев А. Б., Лютоев В. П. Спектроскопия в технологической минералогии, минеральный состав концентратов титановых руд Пижемского месторождения (Средний Тиман) // Обогащение руд. 2015. № 5 (359). С. 33–41.
11. Макеев А. Б., Носик Л. П. Химический и изотопный состав сидерита Пижемского месторождения (Средний Тиман) // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XV Геологического съезда Республики Коми. Т. II. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2009. С. 277–279.
12. Макеев А. Б., Скублов С. Г. Иттриево-редкоземельные цирконы Тимана: геохимия и промышленное значение // Геохимия. 2016. № 9. С. 821–828.
13. Пижемское титановое месторождение: проблемы генезиса // А. Б. Макеев, В. Т. Дубинчук, Л. З. Быховский и др. / Материалы XIV международного совещания по геологии россыпей и месторождений кор выветривания (РКВ-2010). Новосибирск, 2010. С. 417–422.
14. Плякин А. М., Ерикова О. В. История открытия и изучения Умбинско-Средненского полиминерального месторождения // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 7. С. 25–29.
15. Скублов С. Г., Березин А. В. Бережная Н. Г. Общие закономерности состава цирконов из эклогитов по редким элементам применительно к проблеме возраста эклогитов Беломорского подвижного пояса // Петрология. 2012. Т. 20. № 5. С. 470–494.
16. Удоратина О. В., Капитанова В. А. Геохронология пород субстрата и руд редкометалльно-редкоземельных месторождений и рудопроявлений на севере Урала и Тимана // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2016. № 4(28). С. 85–100.
17. Федотова А. А., Бибикова Е. В., Симакин С. Г. Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях // Геохимия. 2008. № 9. С. 980–997.
18. Чернышев И. В., Макеев А. Б., Гольцман Ю. В., Брянчанинова Н. И. Возраст титановых месторождений северо-востока Восточно-Европейской платформы: Rb-Sr-данные // Доклады АН. 2010. Т. 435. № 3. С. 378–383.
19. Fu B., Page F. Z., Cavosie A. J., Fournelle J., Kita N. T., Lackey J. S., Wilde S. A., Valley J. W. Ti-in-zircon thermometry: applications and limitations. Contrib. Mineral. Petrol. 2008. Vol. 156. P. 197–15.
20. Geisler T., Schleicher H. Improved U-Th-total Pb-dating of zircons by electron microprobe using a simple new background modeling procedure and Ca as a chemical criterion of fluid-induced U-Th-Pb discordance in zircon. Chem. Geol. 2000. Vol. 163. P. 269–285.
21. Harley S. L., Kelly N. M. Zircon Tiny but Timely. Elements. Vol. 3. P. 13–18.
22. Hoskin P. W. O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. P. 637–648.
23. Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. Rev. Mineral. Geochem. 2003. Vol. 53. P. 27–62.
24. McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth. Chem. Geol. 1995. Vol. 120. P. 223–253.
25. Pelleter E., Cheilletz A., Gasquet D., Mouttagi A., Annich M., Hakour A. E., Etienne Delouze E., Féraud G. Hydrothermal zircons: A tool for ion microprobe U-Pb-dating of gold mineralization (Tamlalt–Menhouhou gold deposit — Morocco). Chem. Geol. 2007, V. 245, pp. 135–161.
26. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. Contrib. Mineral. Petrol. 2006. Vol. 151. P. 413–433.
27. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes (Eds. M. A. McKibben, W. C. Shanks III and W. I. Ridley). Rev. Econ. Geol. 1998, V. 7, pp. 1–35.

References

1. Makeev A. B., Ivanuch V., Obyden S. K., Bryanchaninova N. I., Ivannikov P. V., Saparin G. V. *Vzaimootnoshenie almaza i karbonado (po materialam issledovaniya brazil'skoi i srednetimanskoj kollektsiy)* (Mutual relation between diamond and carbonado (on materials of Brazilian and Middle Timans collections)). Doklady Earth Sciences, 2003, V. 393A, No. 9, pp. 1251–1255.



2. Ignatiev D. V., Burtsev I. N. *Leikoksen Timana: Mineralogiya i problemy tehnologii* (The leucoxene of Timan: Mineralogy and problems of technology). St. Petersburg: Nauka, 1997, 215 p.
3. Kalyuzhny V. A. *Nekotorye cherty il'menito-leikoksenonosnyh osadochno-metamorficheskikh fatsii slantsev i syazannye s nimi rossyip na Timane* (Some features of ilmenite-leucoxene sedimentary-metamorphic facies of shales and associated deposits on the Timan). In: Geology and minerals of the North-East of the European part of the USSR and the North of the Urals. Syktyvkar, 1965, pp. 467–473.
4. Kolokoltsev V. G., Lisitsyna M. A. *O gidrotermal'no-metasomaticeskom genezise leikoksenovyh rud Yaregskogo mestorozhdeniya (Yuzhnyi Timan)* (On hydrothermal-metasomatic origin of leucoxene ore from Yarega deposit (South Timan)). In: Volcanogenic-sedimentary ore formation. St. Petersburg, 1992, pp. 89–91.
5. Makeyev A. B. *Pizhemskoe titanovoe mestorozhdenie – flyuidizatnaya kal'dera v Pizhemskoi depressii (Srednii Timan)* (Pizhemsky titanium deposit — fluidized caldera in Pizhemsky depression (Middle Timan)). In: Geochemistry of lithogenesis: Materials of Russian Symposium with international participation (Syktyvkar, 17–19 March 2014). Syktyvkar: Geoprint, 2014, pp. 86–89.
6. Makeyev A. B. *Tipomorfnye osobennosti mineralov titanovyh rud Pizhemskogo mestorozhdeniya* (Typomorphic features of minerals of titanium ores from the Pizhemskoe deposit). Mineralogija (Mineralogy). 2016, No. 1, pp. 24–49.
7. Makeyev A. B., Bryanchaninova N. I. *Lamprofiry Chetlaskogo Kamnya (Srednii Timan)* (Lamprophyres of Chetlassy Kamen (Middle Timan)). Regional Geol. Metallogeny, 2009, V. 37, pp. 51–73.
8. Makeyev A. B., Dudar V. A. *Mineralogia almazov Timana* (Diamond Mineralogy of the Timan). St. Petersburg: Nauka, 2001, 336 p.
9. Makeyev A. B., Krasotkina A. O., Skublov S. G. *Geohimiya i U-Pb-vозраст tsirkona Pizhemskogo titanovogo mestorozhdeniya (Srednii Timan)* (Geochemistry and U-Pb-age of zircon from Pizhemskoe titanium deposit (Middle Timan)). Vestnik IG Komi SC UB RAS. 2016, No. 5, pp. 38–52.
10. Makeyev A. B., Lyutoev V. P. *Spektroskopiya v tehnologicheskoi mineralogii, mineral'nyi sostav kontsentratov titanovyh rud Pizhemskogo mestorozhdeniya (Srednii Timan)* (Spectroscopy in technological mineralogy, mineral composition of concentrates of titanium ore from Pizhemsky deposit (Middle Timan)). Obogashchenie rud, 2015, No. 5(359), pp. 33–41.
11. Makeyev A. B., Nosik L. P. *Himicheskii i izotopnyi sostav siderita Pizhemskogo mestorozhdeniya (Srednii Timan)* (The chemical and isotopic composition of siderite Pizhemskoe deposit (Middle Timan)). In: Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Materials of XV Geology Congress of the Komi Republic. V. II, Syktyvkar: Institute of geology Komi SC UB RAS, 2009, pp. 277–279.
12. Makeyev A. B., Skublov S. G. *Ittirevo-redkozemel'nye tsirkony Timana: geohimiya i promyshlennoe znachenie* (Yttrium-rare-earth zircons Timan: geochemistry and industrial value). Geochemistry International, 2016, V. 54, No. 9, pp. 788–794.
13. Makeyev A. B., Dubinchuk V. T., Bykhovsky L. Z., Lalomov A. V., Makeev B. A. *Pizhemskoe titanovoe mestorozhdenie: problemy genezisa* (Pizhemsky titanium deposit: Genesis). In: Materials of XIV Intern. meeting on Geology of placers and weathered rock deposits (PWR-2010). Novosibirsk, 2010, pp. 417–422.
14. Plyakin A. M., Ershova O. V. *Istoriya otkrytiya i izucheniya Umbinsko-Srednenskogo polimineralkogo*
- mestorozhdeniya (The history of the discovery and study of the Umba-Srednenskogo polymimetallic deposit). Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2011, No. 7, pp. 25–29.
15. Skublov S. G., Berezin A. V., Berezhnaya N. G. *Obshchie zakonomernosti sostava tsirkonov iz eklogitov po redkim elementam primenitel'no k probleme vozrasta eklogitov Belomorskogo podvizhnogo poyasa* (General relations in the trace-element composition of zircons from eclogites with implications for the age of eclogites in the Belomorian Mobile Belt). Petrology, 2012, V. 20, No. 5, pp. 470–494.
16. Udaratina O. V., Kapitanova V. A. *Geohronologiya podrod substrata i rud redkometall'no-redkozemel'nyh mestorozhdenii i rudoproyavlenii na severo-Urali i Timane* (Geochronology of the rocks of the substrate and ores of rare metal — rare earth deposits and ore occurrences in the north of the Urals and Timan). Proceedings of the Komi Science Centre Ural Branch Russian Academy of Sciences, 2016, No. 4(28), pp. 85–100.
17. Fedotova A. A., Bibikova E. V., Simakin S. G. *Geohimiya tsirkona (dannye ionnogo mikrozonda) kak indikator genetika minerala pri geohronologicheskikh issledovaniyah*. (Ion-microprobe zircon geochemistry as an indicator of mineral genesis during geochronological studies). Geochemistry International, 2008, V. 46, No. 9, pp. 912–927.
18. Chernyshev I. V., Makeyev A. B., Goltsman Yu. V., Bryanchaninova N. I. *Vozrast titanovyh mestorozhdenii severo-vostoka Vostochno-Evropeiskoi platformy: Rb-Sr-dannye* (Age of titanium deposits of the Northeastern part of the Eastern European Platform: Rb-Sr data). Doklady Earth Sciences, 2010, V. 435, Part 1, pp. 1524–1528.
19. Fu B., Page F. Z., Cavosie A. J., Fournelle J., Kita N. T., Lackey J. S., Wilde S. A., Valley J. W. *Ti-in-zircon thermometry: applications and limitations*. Contrib. Mineral. Petrol. 2008, V. 156, pp. 197–215.
20. Geisler T., Schleicher H. *Improved U—Th—total Pb dating of zircons by electron microprobe using a simple new background modeling procedure and Ca as a chemical criterion of fluid-induced U—Th—Pb discordance in zircon*. Chem. Geol. 2000, V. 163, pp. 269–285.
21. Harley S. L., Kelly N. M. *Zircon Tiny but Timely. Elements*. V. 3, pp. 13–18.
22. Hoskin P. W. O. *Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia*. Geochim. Cosmochim. Acta, 2005, V. 69, pp. 637–648.
23. Hoskin P. W. O., Schaltegger U. *The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis*. Rev. Miner. Geochem. 2003, V. 53, pp. 27–62.
24. McDonough W. F., Sun S.-S. *The composition of the Earth*. Chem. Geol. 1995, V. 120, pp. 223–253.
25. Pelleter E., Cheilletz A., Gasquet D., Mouttaqi A., Annich M., Hakour A. E., Etienne Deloule E., Féraud G. *Hydrothermal zircons: A tool for ion microprobe U—Pb dating of gold mineralization (Tamlalt—Menhouhou gold deposit — Morocco)*. Chem. Geol. 2007, V. 245, pp. 135–161.
26. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. *Crystallization thermometers for zircon and rutile*. Contrib. Mineral. Petrol. 2006, V. 151, pp. 413–433.
27. Williams I. S. *U-Th-Pb geochronology by ion microprobe*. In: Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes (Eds. M.A. McKibben, W.C. Shanks III and W.I. Ridley). Rev. Econ. Geol. 1998, V. 7, pp. 1–35.