

На правах рукописи

КРАСОТКИНА Анна Олеговна



**ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОЗРАСТ
АКЦЕССОРНЫХ МИНЕРАЛОВ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ИЧЕТЬЮ
И ПИЖЕМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СРЕДНИЙ ТИМАН)**

*Специальность 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков
полезных ископаемых*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук**

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, доцент

Скублов Сергей Геннадьевич

Официальные оппоненты:

Каулина Татьяна Владимировна

доктор геолого-минералогических наук, Геологический институт – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», ведущий научный сотрудник.

Старикова Елена Вячеславовна

кандидат геолого-минералогических наук, ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского», отдел региональной геологии и полезных ископаемых Урала и Западной Сибири, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация:

Институт геологии – обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук»

Защита состоится 12 октября 2018 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.04 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru

Автореферат разослан 20 июля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ГУЛЬБИН
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На севере Вольско-Вымской гряды (Средний Тиман) известно рудопоявление Ичетью, приуроченное к конглобрекчиевому горизонту, который залегает на отложениях, вмещающих Пижемское месторождение лейкоксена – одно из крупнейших титановых месторождений в России. Вопросы генезиса, возраста и источника рудного вещества этих промышленно важных объектов являются предметом научных дискуссий. Рядом исследователей рудопоявление Ичетью и Пижемское месторождение рассматриваются как коры выветривания и/или россыпи девонского возраста (Плякин, Ершова, 2010; и др.). С другой стороны, в работах А.Б. Макеева и его коллег (Макеев, Дудар, 2001; Макеев, Борисовский, 2013; и др.) развивается гидротермальная модель генезиса этих объектов.

Аргументированная поддержка той или иной гипотезы требует комплексного изотопно-геохимического исследования промышленно важных акцессорных минералов изучаемых рудных объектов (циркона, рутила, монацита) (Макеев, Скублов, 2016). Будучи одновременно минералами-геохронометрами, они несут важную информацию о геологических процессах формирования месторождений.

Цель и задачи исследования. Основной целью работы является выявление особенностей редкоземельного состава и установление возраста акцессорных минералов (циркона, рутила и монацита) из рудопоявления Ичетью и Пижемского месторождения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ химического состава и определение U-Pb возраста (SIMS метод) для циркона из рудопоявления Ичетью и Пижемского месторождения в сравнении с аналогичными данными для ниже залегающих глинистых сланцев.
2. Выделение (на основе изучения морфологии, внутреннего строения и состава элементов-примесей) разновидностей рутила, анализ взаимоотношений между ними и поведения редких элементов.
3. Установление генезиса разновидностей (Ce-Nd и La-Ce) монацита путем анализа его изотопно-геохимических особенностей.

4. Комплексная оценка возраста рутила (U-Pb система) и монацита (U-Pb и Th-Pb системы) локальным (LA-ICP-MS) и классическим (TIMS) методами.

Фактический материал. В основу диссертации положен каменный материал, предоставленный А.Б. Макеевым (ИГЕМ РАН), отобранный им при полевых исследованиях рудопрооявления Ичетью и Пижемского месторождения (20 опорных проб). Дополнительно был проанализирован циркон из подстилающих глинистых сланцев.

Содержание главных элементов в минералах (более 450 анализов) определялось на SEM JEOL JSM-6510LA с EDS JED-2200 в ИГГД РАН (аналитик О.Л. Галанкина). Состав рутила также изучен на WDS Shimadzu EPMA 1600 (135 анализов) в Университете науки и технологий Китая (аналитик Ю.-С. Чен). Определение содержания REE и редких элементов в цирконе (около 115 анализов) осуществлялось методом SIMS на ионном микрозонде Cameca IMS-4f (ЯФ ФТИАН, аналитики С.Г. Симакин и Е.В. Потапов). Методом LA-ICP-MS проанализирована геохимия рутила (102 анализа). Локальное датирование циркона U-Pb методом (107 точек в 4 пробах) выполнено в ЦИИ ВСЕГЕИ (SHRIMP-II, аналитики Н.В. Родионов и П.А. Львов). Рутит и монацит продатированы классическим U-Pb методом (TIMS, TRITON TI) в ИГГД РАН (14 проб, аналитик Н.Г. Ризванова). Локальное U-Pb датирование рутила (13 точек) выполнено методом LA-ICP-MS в Шведском музее естественной истории (аналитики Э. Койман и М. Шмитт). Геохимия монацита и датирование U-Th-Pb методом (84 зерна, LA-ICP-MS) выполнено в Геологической службе Дании и Гренландии (аналитики Т.Б. Томсен и С.Х. Серре). Для диагностики анатаза была использована рамановская спектроскопия (Renishaw InVia, Горный университет, аналитик М.М. Мачевариани).

Личный вклад соискателя заключался в организации и проведении всех этапов подготовительных работ и непосредственном участии в большинстве лабораторных исследований, обработке и интерпретации полученных аналитических данных.

Научная новизна. Впервые проведено изотопно-геохимическое исследование циркона из рудопрооявления Ичетью и Пижемского месторождения, установившее единый тренд обогащения

циркона неформульными элементами в результате гидротермальных процессов. Показано, что по U-Pb возрасту и геохимии циркон из изучаемых месторождений принципиально отличается от циркона из подстилающих глинистых сланцев.

В рудопроявлении Ичетью обнаружены зерна циркона, которые в краевых зонах замещаются сростаниями бадделеита и рутила. Такие взаимоотношения крайне редки и не превышают единичных достоверно зафиксированных случаев. Сделан вывод, что наиболее вероятным механизмом преобразования циркона в бадделеит было воздействие на циркон высокотемпературных щелочных флюидов, переносящих HFSE.

В результате впервые проведенного изотопно-геохимического исследования рутила из рудопроявления Ичетью установлено, что поступивший из различных источников разновозрастный рутил претерпел общее для всех его разновидностей термальное воздействие в результате процесса с возрастом около 580 млн. лет.

Установлен гидротермальный генезис Ce-Nd- и La-Ce-монацита из рудопроявления Ичетью по особенностям состава и значительному расхождению значений U-Pb- и Th-Pb-возрастов (для Ce-Nd-монацита).

Практическая значимость. Полученные результаты могут служить дополнительными изотопно-геохимическими (оценки времени образования и перекристаллизации минералов) и минералого-геохимическими (особенности состава минералов по редким элементам) критериями для оценки перспектив титановых объектов Среднего Тимана по запасам редких металлов (Zr, Y, REE), а также использоваться в качестве поисковых признаков аналогичных объектов.

Результаты комплексного изотопно-геохимического исследования акцессорных минералов могут быть использованы в материалах лекций в рамках специализированных учебных курсов (изотопная геохимия, поисковая минералогия и прикладная геохимия).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Содержит 216 страниц, 85 рисунков и 26 таблиц. Список литературы включает 181 источник.

Во введении обсуждается актуальность работы, ее цели и задачи, фактический материал, перечислены методы исследования и защищаемые положения. Глава 1 содержит общую информацию о

геологическом строении региона исследования и объектов исследования (рудопоявление Ичетью и Пижемское месторождение). В главе 2 приведена детальная информация о методах исследования, использованных в данной работе. В главе 3, основной главе диссертационной работы, приведены результаты комплексного изотопно-геохимического исследования минералов (циркона, рутила и монацита): обсуждается внутреннее строение, анализ минеральных включений, химический состав изучаемых минералов по главным, редким и редкоземельным элементам, а также изотопно-геохимическая характеристика и возраст минералов. Глава 4 посвящена обзору существующих гипотез и точек зрения на происхождение исследуемых объектов, а также результатам изотопно-геохимического исследования циркона из подстилающих глинистых сланцев в контексте дискуссии по поводу генезиса месторождений. Выводы диссертации представлены в заключении. Обоснование защищаемых положений в основном приведено в главе 3 и частично в главе 4.

Апробация. Результаты исследований отражены в 19 публикациях, включая 4 статьи в журналах из перечня ВАК, тезисы и материалы конференций: «Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования» (Москва, 2015), «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения)» (Сыктывкар, 2016, 2018), Юбилейный съезд РМО «200 лет РМО» (Санкт-Петербург, 2017), и др.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность А.Б. Макееву за предоставленный материал и поддержку на протяжении всего исследования. Автор глубоко благодарен научному руководителю С.Г. Скублову за всестороннюю помощь в работе.

Автор признателен за проведение аналитических работ и обсуждение результатов О.Л. Галанкиной, Н.Г. Ризвановой и Н.М. Королеву (ИГГД РАН), С.Г. Симакину, Е.В. Потапову (ЯФ ФТИАН), Н.Г. Бережной, П.А. Львову и Н.В. Родионову (ЦИИ ВСЕГЕИ), Ю.-С. Чену (Китай), Э. Койман (Швеция), Т.Б. Томсену и С.Х. Серре (Дания), М.М. Мачевариани, А.Е. Мельнику (Горный университет).

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение. Циркон из рудопроявления Ичетью подобен циркону из Пижемского месторождения по повышенному содержанию неформульных элементов (Y, REE, P, Nb, Ti и Ca) и наличию значений U-Pb возраста около 600 млн. лет, но отличается от циркона из подстилающих глинистых сланцев, минимальный возраст которого составляет около 1000 млн. лет.

Локальное датирование циркона из проявления Ичетью U-Pb методом показало разброс результатов в интервале от 706 до 3283 млн. лет (рис. 1а). Можно выделить два кластера, которые соответствуют возрастным пикам с возрастом около 1750 млн. лет и 1480 млн. лет. Большая часть точек отвечает протерозойским значениям возраста.

Для циркона из Пижемского месторождения можно отметить преобладание значений возраста в интервале 900–2000 млн. лет (Макеев и др., 2016; рис. 1а). В целом значения U-Pb возраста циркона из рудопроявления Ичетью и Пижемского месторождения совпадают. Характерной чертой циркона из Пижемского месторождения является наличие датировок с возрастом около 600 млн. лет, которые соответствуют возрасту лампрофировых даек (Макеев, Дудар, 2001) и возрасту рудных минералов из Новобобровского редкометалльно-Th-REE месторождения на Среднем Тимане (Удоратина и др., 2016). В целом сравнение относительной распространенности U-Pb возрастов циркона из рудопроявления Ичетью и Пижемского месторождения подтверждает его единый источник для двух объектов.

Для циркона из рудопроявления Ичетью и Пижемского месторождения характерно наличие измененных участков и доменов, выделяющихся в BSE темным тоном окраски. Вторичные изменения представлены различными типами: дендритовидная «паутинка» на краях зерен циркона, либо темная, обогащенная U полоса, замещающая краевую часть зерен.

Домены неизмененного циркона характеризуются светло-серым оттенком в BSE изображении, спектры распределения REE в них имеют типичный для магматического циркона характер с увеличением содержания от LREE к HREE и четко выраженными положительной Ce-

аномалией (Ce/Ce^* достигает 30.1) и отрицательной Eu-аномалией (Eu/Eu^* составляет в среднем 0.34). Измененные зоны отличаются от неизмененного циркона составом, а именно повышенным содержанием REE (в среднем 4440 ppm), Y (5339 ppm), P (3032 ppm), Ca (667 ppm), Ti (202 ppm) (Макеев и др., 2017).

По сравнению с неизмененным цирконом в зонах изменения происходит выполаживание всего спектра распределения REE, редуцирование Eu- и Ce-аномалий (рис. 1б, г). Содержание тяжелых REE увеличивается примерно в 3 раза, легких REE – в 20 раз. Увеличение содержания Y в среднем от 788 до 8892 ppm коррелирует с увеличением содержания P (от 126 до 5518 ppm), что согласуется с выделенным ранее для Тимана особым геохимическим типом иттриевого циркона (Макеев, Скублов, 2016; рис. 1в).

Рядом исследователей предполагается, что кора выветривания по рифейским глинистым сланцам Среднего Тимана могла служить источником титана и других компонентов. Результаты датирования детритового циркона из подстилающего глинистого сланца (обр. SM-219, 24 зерна) дают значения возраста от 1121 до 2197 млн. лет, с двумя четкими максимумами 1100–1200 и 1450–1550 млн. лет (рис. 1а). Так же, как и по данным других исследователей (Кузнецов и др., 2010; Андреичев и др., 2014), в породах фундамента Тимана отсутствует циркон с возрастом моложе 1000 млн. лет. Спектры REE в цирконе сланцев представлены обычным дифференцированным от LREE к HREE трендом (рис. 1е) и резко отличаются от спектров в цирконе из Пижемского месторождения и рудопрооявления Ичетью. В сланцах отсутствует аномально богатый Y, P, HREE и другими редкими элементами циркон, характерный для рассматриваемых месторождений Среднего Тимана (рис. 1в, д).

С учетом особенностей редкоэлементного состава циркона из Пижемского месторождения и рудопрооявления Ичетью и наличия датировок с U-Pb возрастом около 600 млн. лет, который не характерен для циркона из подстилающих глинистых сланцев, этот возраст можно рассматривать как время интенсивных гидротермальных преобразований пород коренных источников.

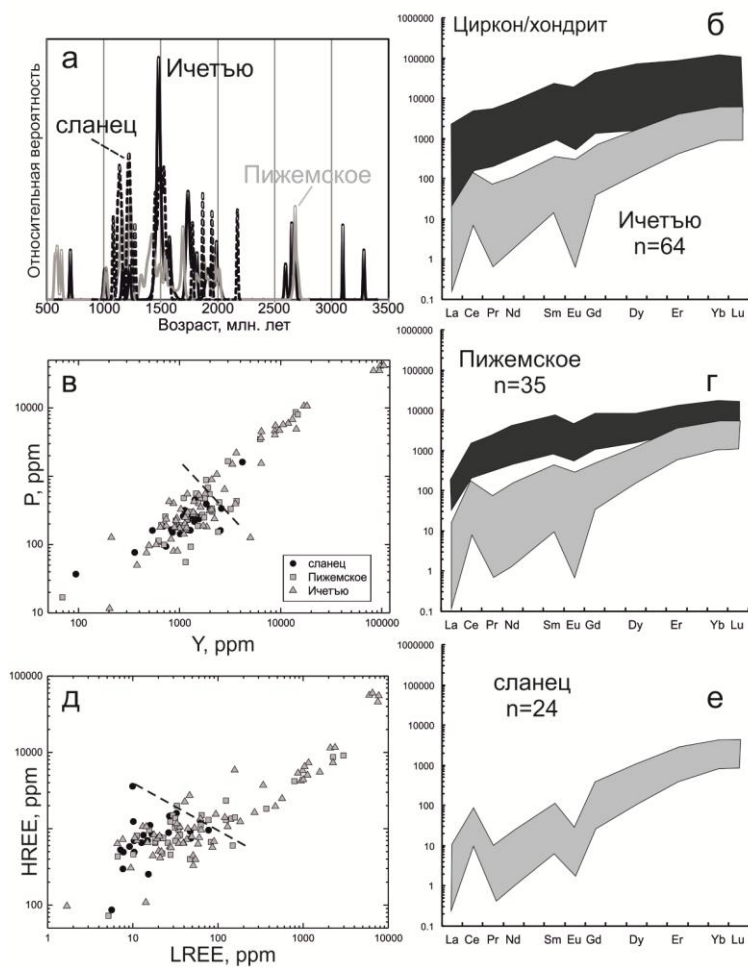


Рис. 1. Вероятностный график U-Pb возраста (а), спектры распределения REE в неизменном (серая заливка) и измененном (темная заливка) цирконе из проявления Ичетью (б), Пижемского месторождения (г) и подстилающих глинистых сланцев (е); соотношение содержания Y и P (в), LREE и HREE (д) для циркона.

Обогащенный REE и редкими элементами циркон из рудопроявления Ичетью обнаруживает значительные черты сходства с высоко-У цирконом из Пижемского месторождения (Макеев и др., 2016). Для циркона из обоих объектов характерны выположенные спектры распределения REE за счет повышенного содержания легких REE с редуцированными Ce- и Eu-аномалиями. Обнаруживается положительная корреляция У с Р и суммарным содержанием REE. При этом наблюдается практически полное совпадение полей составов циркона во всем диапазоне содержания сравниваемых элементов (рис. 1в, д). Содержание У коррелирует с содержанием Nb только в цирконе с повышенным содержанием У (более 2000–3000 ppm). Содержание легких REE положительно коррелирует с содержанием тяжелых REE во всем диапазоне. В измененном темном цирконе отношение HREE/LREE в среднем попадает в интервал 4–6, в неизменном цирконе оно значительно выше и доходит до 96. Содержание Th и содержание U в целом положительно коррелируют, однако Th/U отношение сильно варьирует в выделенных группах циркона. Содержание Ca и содержание Ti не обнаруживают положительной связи при содержании Ti менее 100 ppm; при аномально высоком содержании Ti содержание Ca также увеличивается и может превышать 1000 ppm. Эта особенность свидетельствует о закономерном вхождении этих элементов в состав циркона при наложенных гидротермальных процессах.

Для циркона из шлиховой пробы РМ-201 из рудопроявления Ичетью было установлено чрезвычайно редко встречаемое в природе замещение циркона бадделеитом с образованием микроагрегатов бадделеита, рутила и флоренсита (Скублов и др., 2018). Преобразованная кайма циркона (смесь новообразованных минералов) отличается резко повышенным содержанием REE (особенно LREE), У, Nb, Ca, Ti (рис. 2). Наиболее вероятным механизмом преобразования циркона из рудопроявления Ичетью в бадделеит в сростании с рутилом и флоренситом является воздействие на циркон высокотемпературных ($\geq 500\text{--}600^\circ\text{C}$) щелочных флюидов, транспортирующих HFSE (REE, У, Nb, Ti; Скублов и др., 2018). Это подтверждается находками циркона с аномально высоким содержанием У и REE (до 100000 и 70000 ppm соответственно; Макеев, Скублов, 2016).

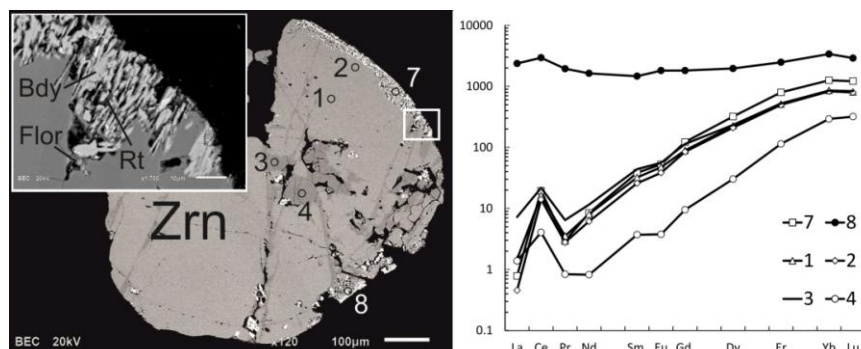


Рис. 2. BSE-изображение каймы циркона, сложенной микроагрегатами бадделеита, рутила и флоренсита (слева) и спектры распределения REE (справа) для циркона (т. 1-7) и продукта его преобразования (т. 8).

Второе защищаемое положение. Изменение состава рутила из рудопроявления Ичетью (замещение высокониибиевого рутила ниобиевым и умеренно ниобиевым вплоть до образования чистого рутила) сопровождается уменьшением содержания Fe, Mn, Cr, Th и Ag в результате гидротермального процесса с возрастом около 580 млн. лет.

Изученные зерна рутила из рудопроявления Ичетью характеризуются неоднородным внутренним строением. По содержанию Nb_2O_5 выделены следующие условные разновидности: 1) высокониибиевый рутил с содержанием Nb_2O_5 11-24 мас. % (самый светлый цвет доменов зерен в режиме BSE); 2) ниобиевый рутил с содержанием Nb_2O_5 в интервале 5-11 мас. % (светло-серый оттенок); 3) умеренно ниобиевый рутил с содержанием Nb_2O_5 от 1 до 5 мас. % (серый цвет); 4) «чистый» рутил с содержанием Nb_2O_5 менее 1 мас. % (темно-серый оттенок). В выделенных по содержанию Nb_2O_5 группах рутила содержание FeO варьирует от 0.2 до 7.6 мас. %, положительно коррелируя с содержанием Nb_2O_5 . Установлено поэтапное замещение высокониибиевого и ниобиевого рутила разновидностью с умеренным содержанием Nb и/или его отсутствием (Красоткина и др., 2017). Образование рутила, чистого от примесей, с ламелями ильменита

является наложенным процессом по отношению к рутилу, содержащему примеси Nb и Fe. Самым поздним процессом было образование прожилков высокожелезистого рутила, выделяемого как отдельная разновидность «нигрин». Также в значительном количестве наблюдается «псевдорутил», образующийся в ходе изменения ильменита (Макеев, Борисовский, 2013).

Четыре разновидности рутила, выделенные по содержанию ниобия, демонстрируют идеальную положительную корреляцию Nb_2O_5 и TiO_2 с полным перекрытием полей составов между группами в интервале до 17 мас.% Nb_2O_5 (рис. 3а). Общий тренд преобразования рутила из рудопроявления Ичетью заключается в переходе от высокониобиевых разновидностей рутила к чистому рутилу, не содержащему Nb. Точки составов железистого рутила и «псевдорутила» занимают обособленное поле. На графике соотношения $\text{TiO}_2\text{--FeO}$ (рис. 3б) составы минералов образуют два независимых тренда. Пологий тренд состоит из ниобиевых разновидностей рутила, отличающихся по содержанию Nb. По мере «очищения» рутила от примеси Nb также высвобождается и Fe. На это указывает наличие тонких ламелей ильменита в более позднем чистом рутиле. Точки составов ильменита, продукта его преобразования «псевдорутила», а также железистого рутила образуют отдельный тренд. Скорее всего, это указывает на независимость процесса превращения ильменита в «псевдорутил» и, далее, в лейкоксен (Макеев, Борисовский, 2013) и процесса «очищения» ниобийсодержащего рутила. Набор выявленных признаков указывает на гидротермальную природу таких преобразований. Экспериментальными работами была доказана высокая подвижность Nb в водном флюиде в равновесии с ниобийсодержащим рутилом в диапазоне температур 300–800°C (Tanis et al., 2015).

По-прежнему до конца нерешенным остается вопрос об источнике поступления ниобийсодержащего рутила в рудопроявление Ичетью. Из возможных источников поступления рутила однозначно можно исключить граниты и гранитные пегматиты, поскольку ниобийсодержащий рутил не содержит заметную примесь Ta. Наиболее вероятный источник поступления рутила – лампрофиры Четласского Камня (Макеев, Борисовский, 2013; Макеев, Брянчанинова, 2009).

Железистый рутил, по сравнению с другими группами, содержит большее количество HFSE – основных элементов-примесей в рутиле (Zack et al., 2004). В нем наблюдается максимальное содержание Th и U. Наблюдается положительная корреляция Fe и Mn (рис. 3в).

Содержание Ag в рутиле из проявления Ичетью демонстрирует сильную положительную корреляцию с содержанием Nb и Fe (рис. 3г). Максимальное содержание Ag (около 10–20 ppm) установлено для высокониибиевого и железистого рутила. Методом LA-ICP-MS установлено, что железистый рутил, присутствующий в виде секущих прожилков в ниобийсодержащем рутиле, отличается повышенным содержанием Mn, Cr, Zn, Al, Mg, Mo, Sb, Th, U и Zr. По мере очищения высокониибиевого рутила от примеси Nb, в нем также уменьшается содержание Fe, Mn, Cr, Th и Ag. Температура образования рутила, оцененная с помощью «Zr-в-рутиле» геотермометра (Tomkins et al., 2007), отвечает интервалу 480–630°C.

Впервые было проведено изотопно-геохимическое исследование рутила из рудопоявления Ичетью, выполненное методами LA-ICP-MS (рис. 3д) и TIMS. Наиболее близкие к конкордантным значения возраста получены для рутила с датировками около 1980 млн. лет и 1800–1850 млн. лет, указывающими на палеопротерозойский возраст источника, предположительно пород кристаллического фундамента (Красоткина и др., 2018). Точки в нижней части графика образуют единый субконкордантный кластер с возрастом 577 ± 11 млн. лет. Дискордии, построенные по совокупностям точек для разных проб рутила, полученных «классическим» и локальным методом, характеризуются верхними пересечениями со значениями возраста около 1000, 1660, 1860 и 1980 млн. лет (рис. 3е). При этом точки нижнего пересечения всех дискордий сходятся в области около 580 млн. лет. Согласно современным представлениям T_c U-Pb системы в рутиле составляет не менее 500 °C (Kooijman et al., 2010), что предполагает достаточно высокотемпературные условия гидротермальной переработки рутила в рифейское время.

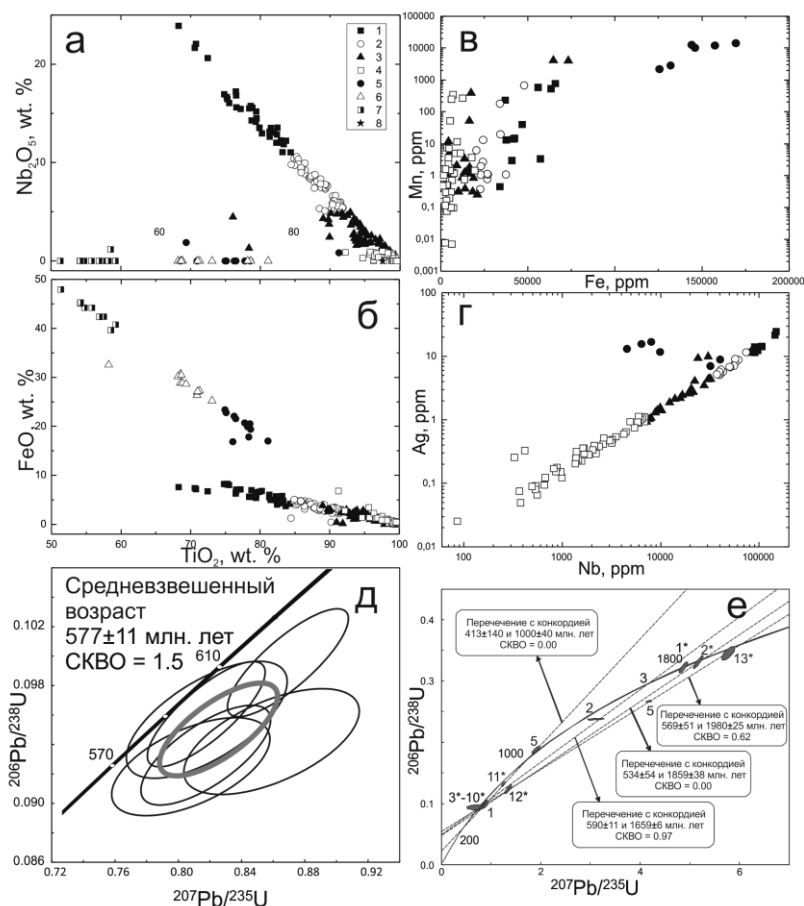


Рис. 3. Соотношение TiO_2 и Nb_2O_5 (а); TiO_2 и FeO (б); Fe и Mn (в); Nb и Ag (г) в рутиле и сосуществующих минералах. Условные обозначения: 1 – высокониибевый рутил; 2 – ниобиевый рутил; 3 – умеренно ниобиевый рутил; 4 – «чистый» рутил; 5 – железистый рутил; 6 – «псевдорутит»; 7 – ламели ильменита в рутиле; 8 – анатаз. Графики с конкордией Везерилла: д – по данным метода LA-ICP-MS; е – объединенный график с результатами TIMS и LA-ICP-MS.

Третье защищаемое положение. Монацит из рудопроявления Ичетью представлен двумя разновидностями (церий-неодимовой и лантан-цериевой), которые по особенностям состава – крайне низкому содержанию Th и ряда других редких элементов, а также отсутствию отчетливо выраженной отрицательной Eu-аномалии имеют гидротермальное происхождение. Ce-Nd глобулярный монацит (куларит) демонстрирует значительное расхождение значений ^{238}U - ^{206}Pb -возраста (1000-1100 млн. лет) и ^{232}Th - ^{208}Pb -возраста (600-700 млн. лет). Первый возраст отвечает времени кристаллизации куларита в породах фундамента, второй – времени перекристаллизации куларита и монацита в результате интенсивных гидротермальных процессов.

Методом LA-ICP-MS был изучен монацит из 20 проб рудопроявления Ичетью (84 зерна). Практически в каждой пробе выделено две разновидности монацита. Преобладает непрозрачный серый до черного глобулярный монацит, Nd-Ce по составу. Зерна этого типа часто округлой формы и линзовидные, со следами растворения на внешних границах. Характерно замещение порового пространства кварцем и флоренситом (Макеев, Вирюс, 2013). В отечественной литературе монацит с такими характеристиками называют куларитом (Некрасов, Некрасова, 1983). Монацит обычного желтого цвета (далее – монацит) играет подчиненную роль, по составу он La-Ce. Удлиненные кристаллы характеризуются однородным внутренним строением. На тройной диаграмме La–Ce–Nd точки составов обеих групп образуют единый тренд (рис. 4а). Спектры распределения REE отличаются высокой степенью дифференцированности в области HREE, в большей степени проявленной для монацита (рис. 4б). В куларите спектры распределения в области LREE практически горизонтальны. В монаците Eu-аномалия не проявлена (Eu/Eu* в среднем 0.93), а содержание почти всех REE (за исключением La и Ce) меньше, чем в куларите. В куларите слабо проявлена отрицательная Eu-аномалия (Eu/Eu* в среднем равна 0.68). Монацит, по сравнению с куларитом, характеризуется пониженными содержаниями практически всех редких элементов, за исключением La и Ce.

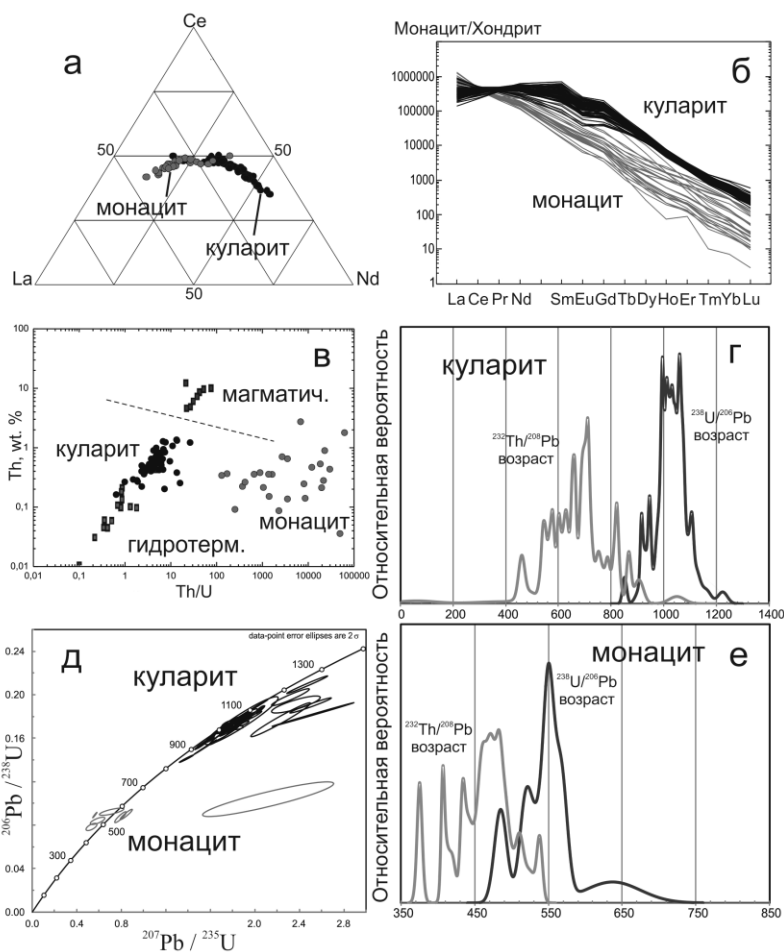


Рис. 4. Диаграммы состава (а – тройная диаграмма La–Ce–Nd; б – распределение REE; в – соотношение Th/U и Th (Taylor et al., 2015) и геохронологические диаграммы (г, е – PDP графики распределения ^{238}U – ^{206}Pb -возраста и ^{232}Th – ^{208}Pb -возраста; д – диаграмма с конкордией Везерилла) для куларита и монацита из рудопроявления Ичетью. Куларит показан черными значками, монацит – серыми значками.

Характер распределения REE в монаците является одним из информативных признаков, позволяющих судить о его генезисе (Williams et al., 2007). Особенно отличается монацит гидротермального генезиса – пониженным содержанием всех REE и отсутствием отрицательной Eu-аномалии. Для гидротермального монацита типоморфным признаком является резко пониженное содержание Th и, соответственно, низкое Th/U отношение (Schandl, Gorton, 2004). Характерной особенностью обоих типов монацита из рудопрооявления Ичетью является крайне низкое содержание Th, как правило, не превышающее 1 мас.%. В монаците содержание Th в целом меньше, чем в куларите. На диаграмме Th/U–Th (рис. 4в) и куларит, и монацит попадают в область составов гидротермального монацита. Таким образом, куларит и монацит из рудопрооявления Ичетью попадают в гидротермальную группу (Schandl, Gorton, 2004).

Возникает вопрос, является ли монацит из рудопрооявления Ичетью аутигенным или аллотигенным, поступившим в рудопрооявление из промежуточного коллектора? Статистические данные по составу монацита из россыпей Северной Америки и Индии говорят об устойчиво высоком, до 10 мас.%, среднем содержании ThO₂, что практически на порядок превышает аналогичные значения для рудопрооявления Ичетью. Напротив, аутигенный монацит характеризуется повышенным содержанием Eu, что приводит к исчезновению отрицательной Eu-аномалии (Alipour-Asll et al., 2012). Это говорит о невозможности формирования скоплений монацита обоих типов из рудопрооявления Ичетью как перемещенной россыпи.

Как для куларита, так и для монацита характерно расхождение значений ²³⁸U–²⁰⁶Pb-возраста и ²³²Th–²⁰⁸Pb-возраста (рис. 4г, е). Для куларита фиксируется четкий пик U–Pb-возраста с отметкой 1000–1100 млн. лет. Определенный в тех же точках Th–Pb-возраст дает непересекающийся с U–Pb-возрастом пик 550–700 млн. лет. Пик значений U–Pb-возраста у монацита отвечает 550 млн. лет. Th–Pb-возраст распадается на несколько пиков, из которых наиболее вероятный отвечает 450–500 млн. лет. При этом наблюдается значительное пересечение пиков ²³⁸U–²⁰⁶Pb-возраста и ²³²Th–²⁰⁸Pb-возраста. При нанесении данных для куларита и монацита на график с

конкордией (рис. 4д) заметно, что точки анализа для куларита в основном расположены субконкордантно в районе 1000–1100 млн. лет. Часть точек явно имеет более древнюю компоненту радиогенного Pb. Точки для монацита компактно расположены на графике с конкордией в районе отметок возраста 500–600 млн. лет. На диаграмме с конкордией в координатах $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ заметно, что «отставание» Th–Pb-возраста от U–Pb-возраста, особенно проявленное у куларита, обусловлено понижением $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ отношения, что объяснить достаточно сложно. Можно предположить фракционирование (привнос) Th в результате гидротермальной деятельности. В условиях незначительного содержания Th в куларите даже относительно небольшой привнос Th может оказать критическое влияние на величину $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ отношения в ходе последующего радиоактивного распада. Не исключено, что расхождение ^{232}Th – ^{208}Pb -возраста от ^{238}U – ^{206}Pb -возраста вызвано фракционированием радиогенных изотопов Pb. Дисбаланс U–Pb и Th–Pb изотопных систем в гидротермальном монаците отмечался и ранее (Seydoux-Guillaume et al., 2012).

Гидротермальное преобразование куларита произошло примерно 600 млн. лет назад. Это событие зафиксировано как Th–Pb системой куларита, так и U–Pb и Th–Pb системами монацита. Некоторое «отставание» датировок для монацита от Th–Pb-возраста по кулариту, вероятно, связано с тем, что монацит испытал более сильную переработку, чем куларит. Об этом можно судить по минимальному содержанию в монаците Th и других редких элементов. Остается открытым вопрос: где происходила гидротермальная кристаллизация монацита из рудопоявления Ичетью? Можно предполагать, что монацит является полностью перекристаллизованным монацитом из неизвестного коренного источника. В процессе интенсивной гидротермальной переработки две разновидности монацита (Ce–Nd и La–Ce) были совмещены и теперь составляют единую минеральную ассоциацию в рудоносных конглобрекциях проявления Ичетью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного комплексного изотопно-геохимического исследования циркона, рутила и монацита из рудопоявления Ичетью и Пижемского месторождения на Среднем Тимане установлены доказательства их гидротермального преобразования с возрастом около 600 млн. лет.

Изотопно-геохимическое исследование циркона из конглобрекчиевого пласта проявления Ичетью показало широкий разброс значений возраста в интервале от 3280 до 700 млн. лет. Выделены высокоиттриевая и низкоиттриевая разновидности циркона, при этом содержание Y коррелирует с содержанием HREE и P. Преобразование циркона из рудопоявления Ичетью и Пижемского месторождения сопровождается значительным увеличением содержания Y, REE, P, Nb, Ti и Ca при подчиненном росте содержания Th и U. Можно говорить о едином источнике циркона для двух объектов, при этом циркон мог поступать из разных пород кристаллического фундамента. Циркон из рифейских глинистых сланцев, которые подстилают осадочные отложения, вмещающие Пижемское месторождение, характеризуется пониженным содержанием примесей и имеет U-Pb возраст не моложе 1000 млрд. лет. Это не позволяет рассматривать сланцы в качестве источника рудных минералов для рассматриваемых объектов.

Установленные при изучении циркона, рутила и монацита геохимические свидетельства интенсивного гидротермального преобразования с единым временем протекания этого процесса (около 600 млн. лет), аутигенный генезис монацита, отсутствие значений U-Pb возраста моложе 1000 млн. лет, как и следов гидротермальных изменений в цирконе из подстилающих глинистых сланцев, входят в определенное противоречие с корово-россыпной (осадочной) гипотезой образования титановых месторождений Среднего Тимана, возраст которых принимается как раннедевонский (Плякин, Ершова, 2010). Полученные автором данные по акцессорным минералам не противоречат гидротермальной модели образования рудопоявления Ичетью и Пижемского месторождения (Макеев и др., 2016, 2017; и др.).

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. Макеев А.Б., **Красоткина А.О.**, Скублов С.Г. Геохимия и U-Pb-возраст циркона Пижемского титанового месторождения Средний Тиман) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 5. С. 38-52.

2. **Красоткина А.О.**, Мачевариани М.М., Королев Н.М., Макеев А.Б., Скублов С.Г. Типоморфные особенности ниобиевого рутила из рудопроявления Ичетью (Средний Тиман) // Записки Российского минералогического общества. 2017. № 2. С. 88-100.

3. Макеев А.Б., **Красоткина А.О.**, Скублов С.Г. Новые данные об U-Pb возрасте и составе циркона (SHRIMP-II, SIMS) из полиминерального рудопроявления Ичетью (Средний Тиман) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 11. С. 28-42.

4. Скублов С.Г., Макеев А.Б., **Красоткина А.О.**, Галанкина О.Л., Мельник А.Е. Уникальная находка преобразования циркона в бадделеит (рудопроявления Ичетью, Средний Тиман) // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2018. № 1. С. 27-35.

в прочих изданиях:

5. **Красоткина А.О.** Минералого-геохимические свидетельства флюидной переработки при образовании рудопроявления Ичетью, Средний Тиман // Материалы VII Российской молодежной научно-практической Школы «Новое в познании процессов рудообразования». М.: ИГЕМ РАН, 2017. С. 173-176.

6. **Красоткина А.О.**, Чен Ю.-С., Макеев А.Б., Скублов С.Г. Геохимия редких элементов в рутиле из рудопроявления Ичетью, Средний Тиман // Вопросы естествознания. 2018. № 1 (15). С. 106-113.

7. Скублов С.Г., **Красоткина А.О.**, Макеев А.Б., Томсен Т.Б., Серре С.Х., Абдрахманов И.А. Геохимия редких элементов (LA-ICP-MS) в монаците из рудопроявления Ичетью, Средний Тиман // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. 15. С. 338-341.