



УДК 550.42

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ (U-Pb МЕТОД, TIMS, LA-ICP-MS) РУТИЛА ИЗ ПОЛИМИНЕРАЛЬНОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ИЧЕТЬЮ, СРЕДНИЙ ТИМАН

С.Г.СКУБЛОВ¹, А.О.КРАСОТКИНА², А.Б.МАКЕЕВ², Н.Г.РИЗВАНОВА¹, Э.КОЙМАН³

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

³ Шведский музей естественной истории, Стокгольм, Швеция

В результате впервые проведенного изотопно-геохимического исследования рутила из полиминерального рудопроявления Ичетью на Среднем Тимане, выполненного локальным методом LA-ICP-MS и «классическим» методом TIMS, установлено, что поступивший из различных источников разновозрастный (предположительно с возрастом около 1000, 1660, 1860 и 1980 млн лет) рутил претерпел общее для всех его разновидностей термальное воздействие в результате процесса с возрастом около 580 млн лет. Результаты геохронологического исследования рутила согласуются с проведенным ранее U-Pb датированием циркона из проявления Ичетью и Пижемского месторождения. Согласно современным представлениям температура закрытия U-Pb системы в рутиле превышает 500 °С, что предполагает достаточно высокотемпературные условия гидротермальной переработки рутила при формировании рассматриваемых месторождений в рифейское время.

Ключевые слова: рутил; U-Pb метод; TIMS; LA-ICP-MS; проявление Ичетью; Пижемское месторождение; Средний Тиман

Как цитировать эту статью: Первые данные о возрасте (U-Pb метод, TIMS, LA-ICP-MS) рутила из полиминерального рудопроявления Ичетью, Средний Тиман / С.Г.Скублов, А.О.Красоткина, А.Б.Макеев, Н.Г.Ризванова, Э.Койман // Записки Горного института. 2018. Т. 232. С. 357-363. DOI: 10.31897/PMI.2018.4.357

Введение и постановка задачи. 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.). 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 [2, 6, 7 и др.].

В последнее время при определении возраста оруденения и гидротермальных процессов, датирование которых бывает затруднено, используется комплексный подход, заключающийся в применении ряда минералов-геохронометров (например, [10]). Наряду с цирконом, являющимся универсальным геохронометром, в этих целях широко используется рутил [9, 12, 17, 21 и др.].

В настоящей работе приводятся первые результаты датирования U-Pb методом рутила из полиминерального рудопроявления Ичетью (Средний Тиман).

Геологическая характеристика. 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. Породы рудопроявления представлены светло-серыми кварцевыми песчаниками, гравелитами, конгломератами и конглобрекчиями, залегающими между двумя мощными толщами в основании Пижемских мономинеральных кварцевых песчаников (D2pg) стекольного качества и выше ильменит-лейкоксен-кварцевой малоручейской титаносной толщи Пижемского месторождения Среднего Тимана [7, 8]. По Rb-Sr изотопным данным возраст титаносной толщи определен как позднерифейский – 685±30 млн лет [1]. Породы рудопроявления Ичетью отличаются разнообразием минерального состава, диагностировано более 50 минералов, главные из которых: кварц, рутил, анатаз, ниобиевый рутил, ильменит, циркон, монацит, колумбит, гранаты, хромшпинелиды, турмалин, ставролит, золото с примесью серебра, кривогранные алмазы уральско-бразильского типа [8].

Содержание TiO₂ в рудных песчаниках варьирует от 2 до 13,5 мас. %. Титановые минералы представлены рядом эволюционирующих фаз от ильменита через Fe-рутил, «псевдорутил» к лейкоксену (эта фаза состоит из сагенитовой решетки рутила и кварца) до игольчатого чистого рутила [7, 8]. Содержание кварца в пижемском лейкоксене изменяется от 15 до 30 %. Схематиче-

скую реакцию преобразования ильменита в лейкоксен, проходящую при высокой температуре (510 ± 35) °C (данные расчета по титан-цирконовому геотермометру [20]), можно представить в следующем виде:



В работе представлены результаты изотопно-геохимического исследования рутила из четырех проб, отобранных только в пределах южного участка рудопоявления Ичетью по меридиональной линии длиной в 3 км между крайними точками опробования: UM-212 – р. Умба, правый берег, Большой карьер; MU-08/7 – р. Умба, левый берег, карьер К-150; MU-08/4 – р. Умба, левый берег, вблизи канавы КУ-1; SM-215 – р. Средняя, правый берег, карьер К-100. Мощность рудоносного пласта в местах отбора проб разная, соответственно, 40; 30; 30; 150 см. Залегание пласта на разных абсолютных отметках по высоте различается почти на 40 м, что определяется рельефом фундамента и амплитудой разломов. Все пробы отбирались в расчистках стенок карьеров методом сплошной борозды, объем конглобрекций в каждой пробе составлял 20 л. Пробы взвешивались, расситовывались, промывались в поле до серого шлиха, затем в лаборатории разделялись в бромформе, определялся выход тяжелой фракции, проводился минералогический анализ. Выход тяжелой фракции составил, соответственно, 1245; 765; 358; 975 г/м³. Из тяжелых фракций четырех проб отбиралось по несколько десятков короткопризматических кристаллов рутила или их обломков.

Аналитическая методика. Представительные зерна рутила, отобранные вручную под микроскопом, были имплантированы в эпоксидную смолу (стандартная шайба диаметром 2,5 см), затем сошлифованы приблизительно на половину своей толщины и отполированы. Химический состав рутила на уровне главных элементов определен методом SEM-EDS в ИГГД РАН (аналитики О.Л.Галанкина и Н.М.Королев) на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6510LA с энергодисперсионной приставкой JED-2200. Шайбы с зернами рутила напылялись углеродом. Точечные определения состава минералов выполнялись с использованием электронного луча с ускоряющим напряжением 20 кВ и током 1 нА, размер пятна составлял 3 мкм. Время накопления каждого спектра составляло 50 с, в качестве стандартов использовались природные минералы, чистые оксиды и металлы. Для коррекции матричного эффекта использовался алгоритм ZAF.

Методика LA-ICP-MS. Методом LA-ICP-MS были проанализированы зерна рутила из числа предварительно изученных методом SEM-EDS (рис.1, табл.1). Локальное U-Pb датирование рутила было выполнено в Шведском музее естественной истории (Стокгольм) при использовании мультиколлекторного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Nu Instruments Nu Plasma II, соединенного с системой лазерной абляции ESI NWR193UC (эксимерный лазер с дли-

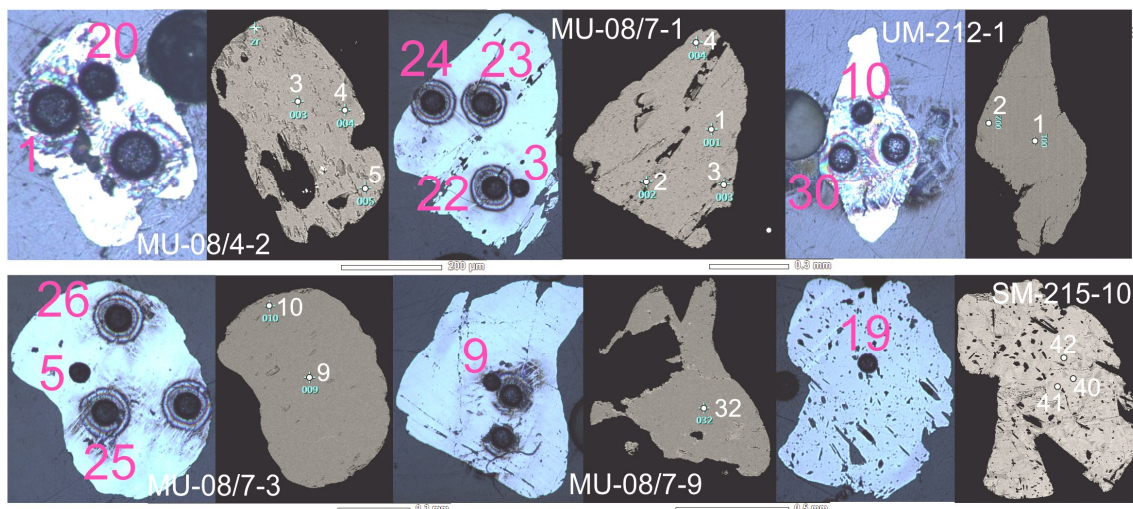


Рис. 1. Положение кратеров лазерной абляции на фотографиях зерен рутила в отраженном свете (подписаны красным цветом) и точек микрозондового анализа на фотографиях зерен рутила в обратно-отраженных электронах (BSE, подписаны белым цветом).
Номера точек анализа соответствуют табл.1 (SEM-EDS) и табл. 2 (LA-ICP-MS)



ной волны 193 нм). Массы 202, 204, 206, 207 и 208 были измерены счетчиками ионов, массы 232, 235 и 238 были измерены чашами Фарадея. Зерна рутила в препарате (шайбе) подвергались абляции с кратером диаметром 60-80 мкм в течение 30 с при энергии лазера 4 Дж/см² и частоте импульсов 8 Гц. Гелий использовался как газ-носитель (0,3 л/мин) образца из лазерной ячейки, перед входом в ICP-MS он смешивался с аргоном (0,9 л/мин).

Таблица 1

Состав рутила (мас. %) по данным SEM-EDS

Проба	Зерно	Точка	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	Nb ₂ O ₅	WO ₃	Сумма
MU-08/4	2	3	0,02	98,98	–	–	0,30	0,70	–	100,00
	2	4	–	99,31	–	–	0,51	0,18	–	100,00
	2	5	0,16	98,87	–	–	0,23	0,74	–	100,00
MU-08/7	1	1	0,31	90,99	–	3,55	0,39	4,76	–	100,00
	1	2	0,47	94,65	0,72	2,52	1,37	0,27	–	100,00
	1	3	0,64	94,30	0,70	1,02	1,26	2,07	–	100,00
	1	4	0,29	90,21	0,22	3,51	0,44	5,33	–	100,00
	3	9	–	99,62	–	–	0,38	–	–	100,00
	3	10	–	99,36	–	–	0,64	–	–	100,00
	9	32	–	99,35	–	–	0,39	0,26	–	100,00
UM-212	1	1	–	99,67	–	–	0,33	–	–	100,00
	1	2	–	99,37	–	–	0,30	–	0,33	100,00
SM-215	10	40	–	82,43	–	–	4,01	13,56	–	100,00
	10	41	0,40	83,67	–	–	3,70	12,23	–	100,00
	10	42	0,29	89,28	–	–	2,67	7,77	–	100,00

Примечания. Прочерк – содержание ниже порога чувствительности; FeO* – суммарное железо

В работе использовалась методика коррекции смещения масс и элементного фракционирования [12]. Данные были обработаны с помощью встроенной электронной таблицы Excel [13]. Стандарт рутила R10 (1091 млн лет, [18]), использованный для нормализации, показал следующую внешнюю воспроизводимость – коэффициент вариации 2,0 % ($n = 25$). Точность оценивалась путем измерения вторичного стандарта R19 (519 млн лет [18]), составившего 507 ± 29 млн лет ($n = 5$), что находится в пределах погрешности опубликованного значения. Все погрешности приведены на уровне 2σ . Всего было выполнено 36 локальных анализа рутила, из них годящимися для определения U-Pb возраста оказались 13 (табл.2).

Таблица 2

Результаты U-Pb изотопных исследований рутила (LA-ICP-MS)

Проба	Зерно	Точка	Изотопные отношения						Rho	Возраст, млн лет					
			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 2\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 2\sigma$	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 2\sigma$		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	$\pm 2\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	$\pm 2\sigma$	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	$\pm 2\sigma$
MU-08/4	2	1 (1*)	0,1098	0,0017	4,857	0,144	0,3209	0,0082	0,86	1794	40	1795	25	1796	28
	2	20 (2*)	0,1134	0,0014	5,156	0,164	0,3298	0,0097	0,92	1837	47	1845	27	1855	22
MU-08/7	1	3 (3*)	0,0633	0,0014	0,868	0,032	0,0995	0,0030	0,82	612	18	635	18	717	46
	1	22 (4*)	0,0616	0,0015	0,815	0,032	0,0960	0,0030	0,80	591	17	605	18	659	50
	1	23 (5*)	0,0618	0,0025	0,815	0,043	0,0956	0,0033	0,65	589	19	605	24	668	86
	1	24 (6*)	0,0661	0,0030	0,858	0,047	0,0941	0,0030	0,58	580	18	629	26	810	94
	3	5 (7*)	0,0602	0,0013	0,729	0,026	0,0880	0,0024	0,77	543	14	556	15	609	48
	3	25 (8*)	0,0634	0,0019	0,814	0,035	0,0932	0,0028	0,71	574	17	605	20	722	64
	3	26 (9*)	0,0632	0,0028	0,805	0,042	0,0924	0,0028	0,57	570	16	599	24	714	93
9	9 (10*)	0,0534	0,0146	0,670	0,184	0,0909	0,0034	0,14	561	20	521	112	348	434	
UM-212	1	10 (11*)	0,0691	0,0015	1,226	0,043	0,1287	0,0035	0,78	781	20	812	20	900	45
	1	30 (12*)	0,0795	0,0023	1,327	0,078	0,1210	0,0062	0,87	736	36	858	34	1186	57
SM-215	10	19 (13*)	0,1215	0,0033	5,767	0,234	0,3443	0,0103	0,74	1907	50	1941	35	1978	49

Примечания. Rho – коэффициент корреляции погрешностей отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U и ²⁰⁶Pb/²³⁸U; в скобках номера со звездочкой – номера точек на рис.3, в

Методика TIMS. Выделенные монофракции рутила дочищались под бинокляром. Пробы отмывались в сильно разбавленном солянокислом растворе в ультразвуковой ванне в течение 10 мин. Разложение рутилов проводилось в тefлоновом вкладыше с металлическим корпусом в концентрированной HF с добавлением HNO₃ в термостате при температуре 220 °С двое суток. Выделение Pb и U из рутила проводилось на ионообменной смоле BioRad AG 1×8 100-200 меш в HBr-форме по методике [16] с последующим выделением U на ионообменной смоле UTEVA. Определение содержаний Pb и U выполнялось методом изотопного разбавления с использованием

смешанного трассера, обогащенного изотопами ²³⁵U-²⁰⁸Pb. Измерения изотопов Pb и U проводились в ИГГД РАН в лаборатории геохронологии и геохимии изотопов на многоколлекторном масс-спектрометре TRITON TI. Лабораторное загрязнение при исследованиях не превышало 50 пг Pb и 5 пг U. Расчеты изотопных отношений и U-Pb возраста рутила были выполнены по стандартной методике с погрешностью измерения Pb/U отношений, равной около 0,5 % (2σ) по программам К.Ладвига [14, 15].

Результаты и их обсуждение. В изученных образцах рутила присутствует большое разнообразие форм, размеров и окраски зерен – светло-коричневые, темно-коричневые, черные и темно-красные оттенки. Наряду с хорошо ограненными кристаллами с ростовой штриховкой на гранях присутствуют окатанные зерна рутила. Такое многообразие может свидетельствовать о многостадийности процессов образования (преобразования) рутила или об их различных источниках. Ранее было проведено детальное исследование (SEM-EDS) зерен рутила из шлиховых проб рудопоявления Ичетью [11]. В результате были выделены разновидности рутила в зависимости от содержания Fe и Nb. Гидротермальная переработка высокониобиевого рутила, содержащего до 24 мас. % Nb₂O₅, приводит к существенному выносу Nb, вплоть до снижения содержания Nb₂O₅ до значений, не превышающих 1 мас. %. Снижение содержания Nb сопровождается выносом Fe из железистого рутила, слагающего секущие прожилки в ниобийсодержащем рутиле. Выделяются две минеральные ассоциации: первая ассоциация представлена ниобиевым рутилом и колумбитом; во второй ассоциации ильменит замещается железистым рутилом и «псевдорутилом», который очищается от примеси Fe и преобразуется в лейкоксеновую фазу в гидротермальных условиях, на что указывает факт перехода железистого рутила в анатаз [11]. Последняя ассоциация титановых минералов совпадает по всем параметрам с такой же из нижележащего Пижемского титанового месторождения [7]. Это указывает на то, что коренным источником этих минералов в проявлении Ичетью были именно титаносодержащие песчаники малоручейской свиты Пижемского месторождения.

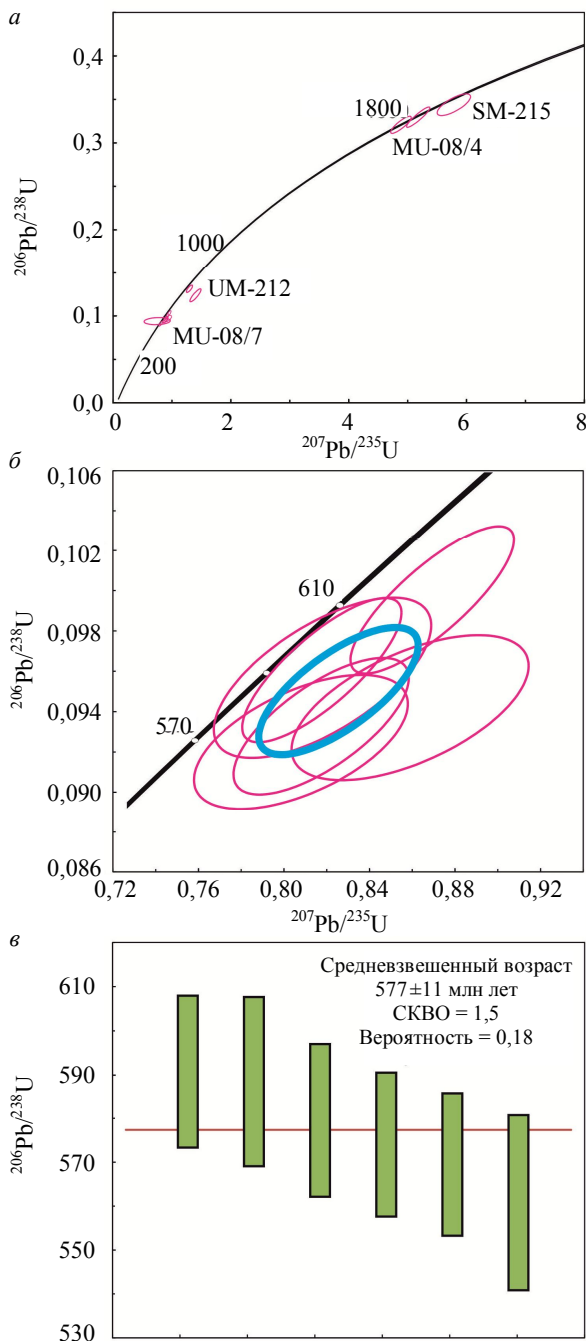


Рис.2. Результаты изотопно-геохимического исследования рутила методом LA-ICP-MS: а – график с конкордией для всех точек анализа; б – график с конкордией для субконкордантного кластера точек для пробы MU-08/7; в – расчет средневзвешенного возраста для субконкордантного кластера точек для пробы MU-08/7. Эллипсы ошибок измерения соответствуют 2σ, включая погрешность константы распада

Исследованный методом LA-ICP-MS рутил из четырех проб различается между собой по содержанию элементов-примесей (см. табл.1). Максимальное содержание Fe и Nb среди изученного рутила установлено для пробы SM-215. В рутиле из пробы MU-08/7 содержание Fe и Nb меньше, кроме того, присутствует примесь Al и Sr. В рутиле из пробы MU-08/4 содержание Fe и Nb еще меньше. Наиболее «чистым» является рутил из пробы UM-212, содержащий из примесей незначительно количество Fe и в одной точке – W. В рутиле из пробы UM-212 отсутствует примесь кремния, установленная в рутиле из остальных проб.

Исследование методом LA-ICP-MS. Было выполнено 13 локальных определений возраста рутила из четырех проб, которые разделились на несколько групп (рис.2, а). Наиболее близкие к конкордантным значения возраста получены для рутила с палеопротерозойским возрастом – около 1980 млн лет для пробы SM-215 и 1800-1850 млн лет для пробы MU-08/4 ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст). Результаты единичных анализов рутила из проб SM-215 и MU-08/4, представленные в табл.2 и на рис.2, а, указывают на палеопротерозойский возраст источника этих рутилов, предположительно, кристаллического фундамента.

Рутил из пробы UM-212 дискордантен ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст составляет 900-1185 млн лет, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст – 740-780 млн лет, табл.2). Аналитические точки, полученные в результате анализа рутила из пробы MU-08/7, образуют единый субконкордантный кластер со средневзвешенным значением возраста 577 ± 11 млн лет (СКВО = 1,5, рис.2, б, в).

Исследование методом TIMS. В изученных рутилах отмечается высокое содержание обыкновенного Pb, что отражается в низких отношениях $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (от 20,5 до 90,8, табл.3). Для трех образцов (точки 6-8) из-за очень низких значений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, не позволяющих корректно внести поправку на обыкновенный Pb, в табл.3 не приведены U-Pb отношения.

Отсутствие в составе исследуемых проб минералов, пригодных для внесения поправки на первичный Pb, осложняет построение корректных U-Pb зависимостей. Поправки на первичный Pb были внесены по модели Стейси – Крамерса [19].

Дискордия, построенная по трем точкам образца MU-08/4 (табл.3, точки 1-3), имеет две точки пересечения с конкордией с возрастом 590 ± 11 млн лет и 1659 ± 6 млн лет (СКВО = 0,97), причем значения Pb/U отношений двух из трех точек близки к конкордантным (рис.3, а). Этот результат наглядно демонстрирует наличие разновозрастных зерен рутила в одной пробе.

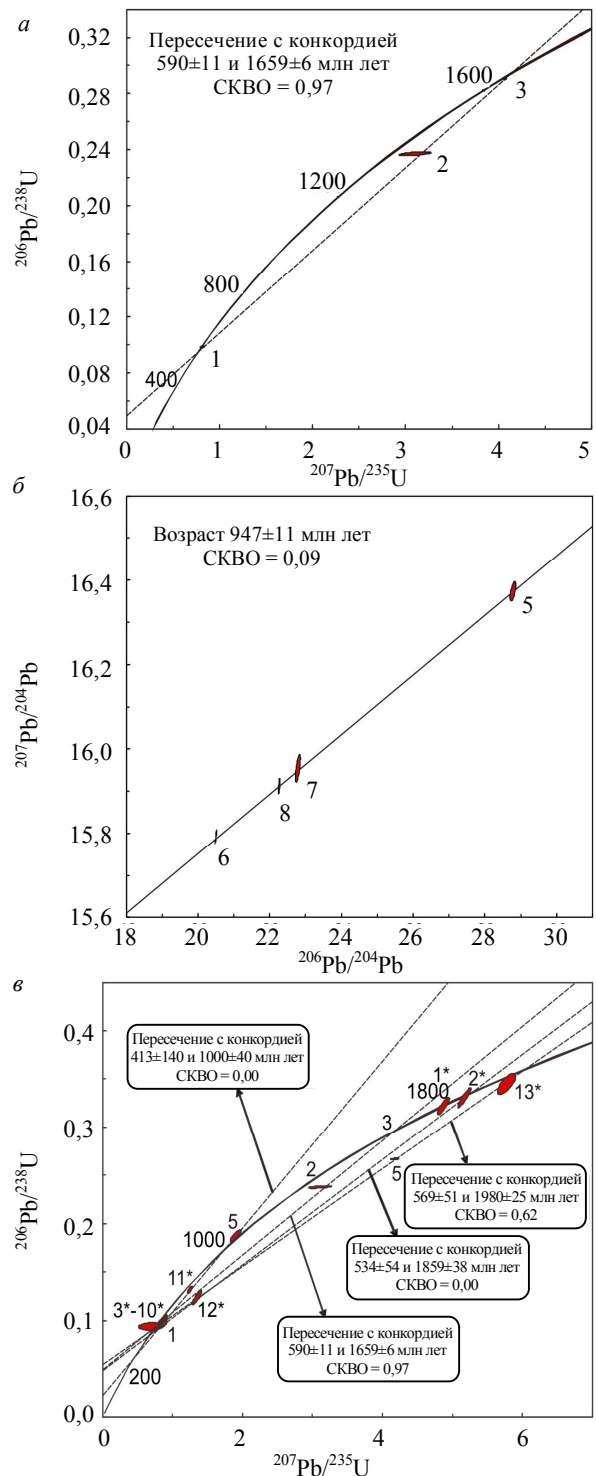


Рис.3. Результаты изотопно-геохимического исследования рутила методом TIMS (номера проб соответствуют табл. 3): а – график с конкордией для рутила из пробы MU-08/4; б – Pb-Pb изохрона для рутила из проб UM-212 и MU-08/7; в – объединенный график с конкордией совместно с результатами LA-ICP-MS (номера проб со звездочками соответствуют номерам проб в табл.2)



Таблица 3

Результаты U-Pb изотопных исследований рутила (TIMS)

Проба	Навеска, мг	Содержание, ppm		Изотопные отношения				Rho	Th/U	Возраст, млн лет			
		Pb	U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb ^a	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb ^a	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U			²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
MU-08/4	1	1,55	0,68	2,50	53,625(2,6)	17,722(0,58)	0,79629(1,7)	0,09635(0,63)	0,44	0,54	593±4	595±10	601±33
	2	4,67	7,42	5,22	28,382(0,27)	16,530(0,35)	3,0904 (4,5)	0,23603(0,47)	0,58	1,32	1366±6	1430±64	1527±80
	3	0,87	11,1	21,1	90,813(0,46)	22,961(0,23)	4,0668(0,35)	0,29010(0,23)	0,72	0,25	1642±4	1648±6	1655±5
SM-215	4	3,08	32,1	13,9	23,748(0,06)	16,175(0,09)	4,1615 (1,1)	0,26538(0,27)	0,56	3,33	1517±4	1667±19	1860±18
UM-212	5	2,04	3,97	3,03	28,777(0,22)	16,372(0,12)	1,8828 (3,2)	0,18556 (2,7)	0,87	3,15	1097±30	1075±34	1030±32
	6	1,10	23,5	3,40	20,457(0,07)	15,786(0,92)	–	–	–	–	–	–	–
MU-08/7	7	2,75	1,49	0,74	22,750(0,26)	15,949(0,17)	–	–	–	–	–	–	–
	8	3,89	3,62	1,77	22,230(0,09)	15,907(0,10)	–	–	–	–	–	–	–

Примечания. а – изотопные отношения, скорректированные на бланк и фракционирование; в скобках – погрешность измерения ($\pm 2\sigma$) в процентах

Возраст, рассчитанный по двум точкам образца UM-212 (табл.3, точки 5, 6) и двум точкам образца MU-08/7 (табл.3, точки 7, 8) в координатах $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, оценивается в 947 ± 71 млн лет (СКВО = 0.09, рис.3, б).

На рис.3, в размещены геохронологические результаты, полученные как локальным методом LA-ICP-MS (табл.2), так и «классическим» методом TIMS (табл.3). Наблюдается значительный разброс результатов определения возраста в диапазоне от примерно 600 до 2000 млн лет. Дискордии, построенные по совокупностям точек для разных проб рутилов, полученных «классическим» и локальным методом, характеризуются верхними пересечением с конкордией в точках с различными значениями возраста – около 1000, 1660, 1860 и 1980 млн лет (рис.3, в). При этом точки нижнего пересечения всех дискордий с конкордией сходятся в пределах погрешности в области, соответствующей приблизительно 580 млн лет.

Аналогичное распределение датировок было получено при изучении U-Pb возраста циркона из проявления Ичетью (проба MU-08/4), для которого был установлен широкий разброс значений возраста в интервале от примерно 700 до 3280 млн лет [5]. Эти данные согласуются с результатами исследования возраста циркона, выделенного из нижележащих титановых руд Пижемского месторождения [3]. Помимо корреляции возрастных датировок, также наблюдается сходство редкоземельного состава циркона из обоих объектов. Для циркона из проявления Ичетью и Пижемского месторождения установлены высокоиттриевые и низкоиттриевые разновидности, в которых содержание иттрия и редкоземельных элементов коррелирует с тяжелыми редкоземельными элементами и фосфором (ксенотимовая схема изоморфизма [4]). Результаты изотопно-геохимического исследования свидетельствуют о едином источнике циркона двух промышленных объектов, при этом циркон мог поступать из разных по глубине горизонтов нижележащего кристаллического фундамента.

Заключение. В результате впервые проведенного изотопно-геохимического исследования рутила из полиминерального рудопоявления Ичетью установлено, что поступивший из разных источников разновозрастный (предположительно с возрастом около 1000, 1660, 1860 и 1980 млн лет) рутил претерпел общее для всех его разновидностей термальное воздействие в результате процесса с возрастом около 580 млн лет. Результаты геохронологического исследования рутила согласуются с проведенным ранее U-Pb датированием циркона из проявления Ичетью и Пижемского месторождения [3, 5]. Согласно современным представлениям температура закрытия U-Pb системы в рутиле превышает 500 °C [12], что предполагает достаточно высокотемпературные условия гидротермальной переработки рутила при формировании рассматриваемых месторождений в рифейское время.

Благодарность. Работа выполнена в рамках тем госзадания ИГГД РАН № 0153-2018-0013 и ИГЕМ РАН № 0136-2018-0020 при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-35-5003). Авторы благодарят М. Шмитт за помощь в LA-ICP-MS измерениях. Статья является отчетной работой Вегацентра под номером #005.



ЛИТЕРАТУРА

1. Возраст титановых месторождений северо-востока Восточно-Европейской платформы: Rb-Sr-данные / И.В.Чернышев, А.Б.Макеев, Ю.В.Гольцман, Н.И. Брянчанинова // Доклады АН. 2010. Т. 435. № 3. С. 378-383.
2. *Игнатъев В.Д.* Лейкоксен Тимана: минералогия и проблемы технологии / В.Д.Игнатъев, И.Н.Бурцев. СПб: Наука, 1997. 215 с.
3. *Макеев А.Б.* Геохимия и U-Pb возраст циркона Пижемского титанового месторождения (Средний Тиман) / А.Б.Макеев, А.О.Красоткина, С.Г.Скублов // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 5. С. 38-52.
4. *Макеев А.Б.* Иттриево-редкоземельные цирконы Тимана: геохимия и промышленное значение / А.Б.Макеев, С.Г.Скублов // Геохимия. 2016. № 9. С. 821-828.
5. *Макеев А.Б.* Новые данные об U-Pb возрасте и составе циркона (SHRIMP-II, SIMS) из полиминерального рудопроявления Ичетью (Средний Тиман) / А.Б.Макеев, А.О.Красоткина, С.Г.Скублов // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 11. С. 28-42.
6. *Макеев А.Б.* Типоморфизм и источники титановых и ниобиевых минералов проявления Ичетью, Средний Тиман / А.Б.Макеев, С.Е.Борисовский // Изв. вузов. Геология и разведка. 2013. № 2. С. 30-37.
7. *Макеев А.Б.* Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения // Минералогия. 2016. № 1. С. 24-49.
8. *Макеев А.Б.* Минералогия алмазов Тимана / А.Б.Макеев, В.А.Дудар. СПб: Наука, 2001. 336 с.
9. Результаты локального исследования (LA-ICP-MS) геохимии и U-Pb возраста рутилов из пород Беломорского подвижного пояса / С.Г.Скублов, Т.Зак, А.В.Березин и др. // Геохимия. 2013. № 2. С. 180-187.
10. *Ризванова Н.Г.* Возраст гидротермальных процессов в Центрально-Иберийской зоне (Испания) по данным U-Pb датирования касситерита и апатита / Н.Г.Ризванова, С.Г.Скублов, Е.В.Черемазова // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 275-283. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.275
11. Типоморфные особенности ниобиевого рутила из полиминерального рудопроявления Ичетью (Средний Тиман) / А.О.Красоткина, М.М.Мачевариани, Н.М.Королев и др. // Записки РМО. 2017. № 2. С. 88-100.
12. *Kooijman E.* Constraints on the U-Pb systematics of metamorphic rutile from in situ. LA-ICP-MS analysis / E.Kooijman, K.Mezger, J.Berndt // Earth and Planetary Science Letters. 2010. Vol. 293. P. 321-330.
13. *Kooijman E.* U-Pb dating of zircon by laser ablation ICP-MS: recent improvements and new insights / E.Kooijman, J.Berndt, K.Mezger // European Journal of Mineralogy. 2012. Vol. 24. P. 5-21.
14. *Ludwig K.R.* Isoplot/Ex 3. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center. Special publication. 2003. N 4. 74 p.
15. *Ludwig K.R.* PbDat 1.21 for MS-dos: A computer program for IBM-PC Compatibles for processing raw PbU-Th isotope data. Version 1.07. U.S. Geological Survey, Open-File Report 88-542. 1991. 35 p.
16. *Manhes G.* Comparative uranium-thorium-lead and rubidium-strontium study of the Severin amphoterite: consequences for early Solar system chronology / G.Manhes, J.E.Minster, C.J.Allegre // Earth and Planetary Science Letters. 1978. Vol. 39. P. 14-24.
17. Microstructural, trace element and geochronological characterization of TiO₂ polymorphs and implications for mineral exploration / D.Plavska, S.M.Reddy, A.Agangi et al. // Chemical Geology. 2018. Vol. 476. P. 130-149.
18. Rutile crystals as potential trace element and isotope mineral standards for microanalysis / G.L.Luvizotto, T.Zack, H.P.Meyer et al. // Chemical Geology. 2009. Vol. 261. P. 346-369.
19. *Stacey J.S.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model / J.S.Stacey, J.D.Kramers // Earth and Planetary Science Letters. 1975. Vol. 26. P. 207-221.
20. *Watson E.B.* Crystallization thermometers for zircon and rutile / E.B.Watson, D.A.Wark, J.B.Thomas // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2006. Vol. 151. P. 413-433.
21. *Zack T.* Petrology and geochronology of rutile / T.Zack, E.Kooijman // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2017. Vol. 83. P. 443-467.

Авторы: С.Г.Скублов, д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, skublov@yandex.ru (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия), А.О.Красоткина, исполнитель проекта РФФИ, krasotkina93@mail.ru (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия), А.Б.Макеев, д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, abmakeev@mail.ru (Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия), Н.Г.Ризванова, канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник, rizng@mail.ru (Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия), Э.Койман, PhD, старший научный сотрудник и руководитель Вегацентра, ellen.kooijman@nrm.se, (Шведский музей естественной истории, Отдел наук о Земле, Стокгольм, Швеция).

Статья поступила в редакцию 23.01.2018.

Статья принята к публикации 05.04.2018.