

УДК 551.72, 552.16, 552.48

U–Pb ID-TIMS ВОЗРАСТ РУТИЛА ИЗ ЭКЛОГИТОВ СЕВЕРО-МУЙСКОГО БЛОКА (СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ) КАК ИНДИКАТОР ДЛИТЕЛЬНОСТИ ЭКСГУМАЦИИ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЫ

© 2023 г. С. Ю. Скузоватов^{1,*}, Н. Г. Ризванова², С. Г. Скублов^{2,3}, академик РАН В. С. Шацкий^{1,4,5}

Поступило 14.02.2023 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принято к публикации 12.05.2023 г.

Будучи распространенным минералом высокоградных пород, рутил используется в качестве индикатора эволюции литосферы глубинных зон орогенных поясов. Приведены новые данные ID-TIMS U–Pb-датирования и минералого-геохимические характеристики рутила из эклогитов Северо-Муйского блока Байкало-Муйского складчатого пояса с целью оценки значимости геохронологических оценок для характеристики процесса эксгумации высокоградных пород. Ассоциация минеральных включений в рутиле (преимущественно титанит, эпидот и амфибол) указывает на рост рутила на прогрессивной стадии метаморфизма за счет титанита в протолите эпидот-амфиболитовой или амфиболитовой фаций. Диапазон содержаний Zr и расчетных температур кристаллизации рутила соответствует условиям от проградных (619–638°C в расчете на 1.5 ГПа) до пиковых (659–684°C для 2.5 ГПа). Полученная возрастная оценка (605 млн лет) значительно моложе возраста высокобарического метаморфизма (630 млн лет), что указывает на продолжительную историю остывания эклогитсодержащего комплекса литосферы ниже температуры закрытия U–Pb системы рутила (~500–525°C) при тектонической денудации или эрозии континентальных комплексов.

Ключевые слова: Центрально-Азиатский складчатый пояс, Байкало-Муйский пояс, эклогиты, рутил, ID-TIMS U–Pb датирование, эксгумация литосферы

DOI: 10.31857/S268673972360025X, EDN: IHGQDC

ВВЕДЕНИЕ

Рутил – распространенный акцессорный минерал в широком спектре сред и *РТХ*-условий формирования, от древних глубинных пород (мантийных эклогитов и перидотитов) до современных осадков и россыпей, но наиболее характерен для высокоградных метаморфических пород. В метабазитах рутил является фазой повышенных давлений, а его устойчивость распространяется на пиковые парагенезисы коровых эклогитов и вы-

сокобарических гранулитов. Присутствие рутила в высокобарических и высокотемпературных породах наряду с существенным прогрессом в U–Pb-геохронологии [1] и использовании рутила как независимого геотермометра [2] определили его использование в качестве надежного индикатора эволюции литосферы глубинных зон орогенных поясов.

Недавними исследованиями высокотемпературных коровых пород неоднократно отмечена способность рутила сохранять состояние U–Pb-системы, соответствующее условиям максимального разогрева комплексов пород [3, 4]. Тем не менее существующие оценки температуры закрытия U–Pb-системы рутила находятся в диапазоне ~500–650°C [5–7], следовательно, U–Pb-система рутила должна предпочтительно отражать постпиковое охлаждение в процессе эксгумации на среднекоровые уровни. В свою очередь, рутил из средне- и высокотемпературных орогенных эклогитов из комплексов континентальной субдукции, эволюция которых зачастую предполагает разогрев до условий гранулитовой фации при эксгумации пород, может иметь смещенные U–Pb возрастные оценки в результате диффузии

¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова
Сибирского отделения Российской академии наук,
Иркутск, Россия

²Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский горный университет,
Санкт-Петербург, Россия

⁴Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

⁵Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет, Новосибирск, Россия

*E-mail: skuzovaty@igc.irk.ru

и частичной потери Pb. Данный факт с учетом систематически низких содержаний U и Pb в рутиле эклогитов [7] и чувствительности результатов измерений к поправке на нерадиогенный Pb [8], существенно влияют на надежность восстановленных трендов метаморфической эволюции.

В данной работе мы приводим новые результаты ID-TIMS U–Pb датирования и сопутствующие минералогические и редкоэлементные характеристики рутила из эклогитов Северо-Муйского блока (СМБ) Байкало-Муйского складчатого пояса (БМП) с различными *PT*-трендами эксгумации и ретроградной гидратации [9–12]. Детальные петрологические исследования показали, что в процессе вендского орогенеза (~630 млн лет; Sm–Nd-возраст эклогита и вмещающего гнейса [10]; U–Pb-возраст циркона из эклогитов, [12]) породы испытали погружение до условий ~1.8–2.7 ГПа и ~560–760°C, что отражает положение эклогитов в пределах различных коровых фрагментов. Таким образом, метаморфическая эволюция эклогитов проходила в среднетемпературных условиях, которые соответствуют диапазону существующих оценок закрытия U–Pb-системы рутила, а сам рутил является идеальным объектом для изучения поведения подвижности U и Pb на стадиях прогрессивного, пикового и регрессивного метаморфизма.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для исследования использованы семь образцов эклогитов, слагающих отдельные тела, будины и линзы размером от первых метров до десятков метров и наблюдаемых среди метаосадочных пород и метакристаллоидов в пределах пояса десятикилометровой мощности по течению р. Самокут и р. Илеир СМБ (рис. 1). Эклогиты издроблены в щековой и валковой дробилках до фракции менее 1 мм, после чего рутилы из матрикса пород выделялись из фракций менее 0.25 мм (наиболее богатых рутилом), с использованием магнитной сепарации и отделения в тяжелых жидкостях. От 50 до 90 зерен рутила из фракций 160–250 мкм каждой пробы извлечены вручную и помещены в дюймовый диск на основе эпоксидной смолы и приполированы для вскрытия центральной части зерен.

Рентгеноспектральный микроанализ (ЕРМА) минеральных включений в рутиле проведен с использованием микроанализатора “JEOL” Superprobe JXA8200 в Центре коллективного пользования “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН. Анализ проведен с помощью пяти волнодисперсионных спектрометров с пучком зонда 2 мкм при токе 15 нА и ускоряющем напряжении 20 кВ. Серия природных и синтетических стандартов для калибровки включала в себя альбит (Na), пироп (Al), калишпат (K), диопсид (Si,

Ca, Mg), оливин (Si, Mg, Fe), гранат (Si, Al, Fe, Mn), рутил (Ti), хромит (Cr, Fe). Время накопления пика и фонового сигнала для каждого элемента составляло 10 с при аналитической погрешности от 0.01 вес. % (для второстепенных элементов с содержанием, близким к пределу обнаружения) до 0.1–0.2 вес. %.

Редкоэлементный анализ 105 зерен рутила проведен методом масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) с помощью ионного микрозонда Cameca-IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института Академии наук (ФТИАН). Первичный пучок O_2^- ионов фокусировался до размера пятна ~20–25 мкм. Каждый анализ проводился в три цикла измерений. Содержание элементов рассчитывалось из нормированных интенсивностей вторичных ионов $^{47}Ti^+$ с использованием калибровочных кривых на основе анализа набора стандартных стекол. Стандартное стекло SRM NIST610 использовалось в течение аналитической сессии для контроля воспроизводимости результатов, которая составляла до 10% для содержаний выше 1 ppm и до 20% для содержаний в диапазоне 0.1–1 ppm.

ID-TIMS U–Pb-геохронологические исследования рутила проведены в Институте геологии и геохронологии докембрия (ИГГД РАН). Монофракции из наиболее прозрачных и гомогенных зерен рутила промывались в 0.5M HNO_3 при 70°C и трижды в ультрачистой воде. Химическое растворение проводилось в HF при 220°C в стальных тefлоновых бомбах при высоком давлении, после чего растворы разделялись на две аликвоты, а одна из них смешивалась с ^{235}U – ^{208}Pb -трассером. Аликвоты затем выпаривались, переводились в бромидную форму для выделения Pb и U ионно-обменной хроматографией, а фракция U дополнительно очищалась в HNO_3 на смоле UTEVA. Изотопный анализ проведен с помощью термоионизационного (TIMS) многоколлекторного масс-спектрометра “Triton” T1 в статическом режиме. Холостое загрязнение составило 25 пг для Pb и 0.5 пг для U. Результаты обработаны в ПО PbDAT [13] и ISOPLOT [14]. Все ошибки приводятся на уровне 2σ .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рутил в свежих и ретроградно измененных эклогитах представлен идиоморфными призматическими зернами размером до 300 мкм и более мелкими (не более 20–30 мкм) включениями в порфиробластовом и среднезернистом гранате (рис. 2). Рутил в матриксе представлен отдельными зернами или сегрегациями зерен вытянутой формы, подвержен замещению титанитом в амфиболитизированных эклогитах и — чаще — ильменитом в симплектитовых эклогитах с малым ко-

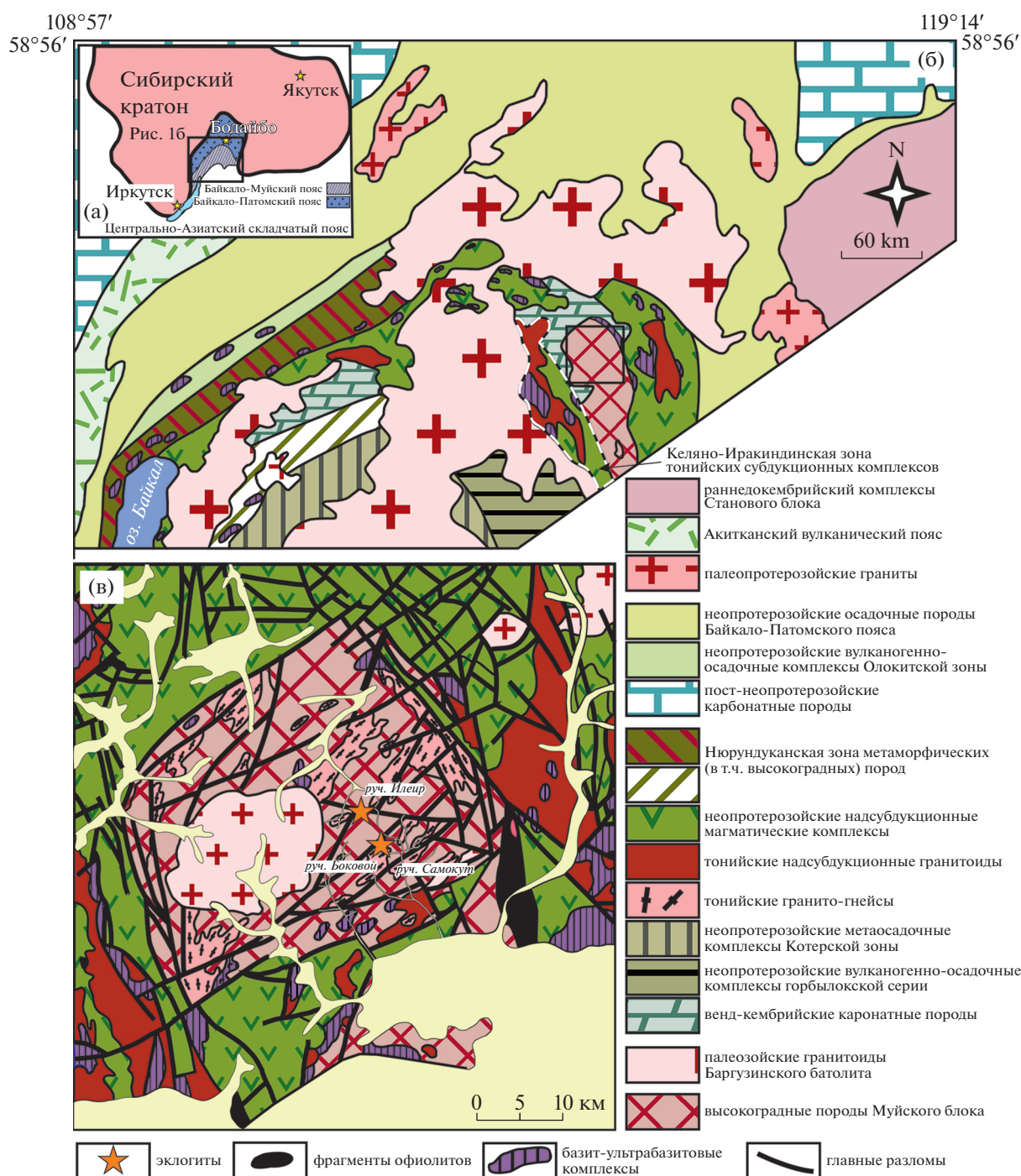


Рис. 1. Схематическая карта расположения Байкало-Муйского пояса (БМП) в структуре Центрально-Азиатского складчатого пояса относительно Сибирского кратона (а), упрощенная структура БМП с ключевыми слагающими комплексами пород (б), и схема строения Северо-Муйского блока высокоградных пород (в) (не показаны перекрывающие кембрийские карбонатные и более молодые отложения).

личеством ретроградных водосодержащих фаз. В порфиробластовых эклогитах Му-93-53, Му-93-90 и Му-93-93, где ядра граната богаты включениями водосодержащих фаз (эпидот, амфибол), включения рутила характерны для внешних зон граната.

Исследованные зерна рутила (около 30 зерен на каждую пробу) из матрикса содержат твердофазные включения размером преимущественно 1–10 мкм, расположенные главным образом в центральных зонах рутила (рис. 3). Перечень наблюдаемых фаз включений довольно выдержан и

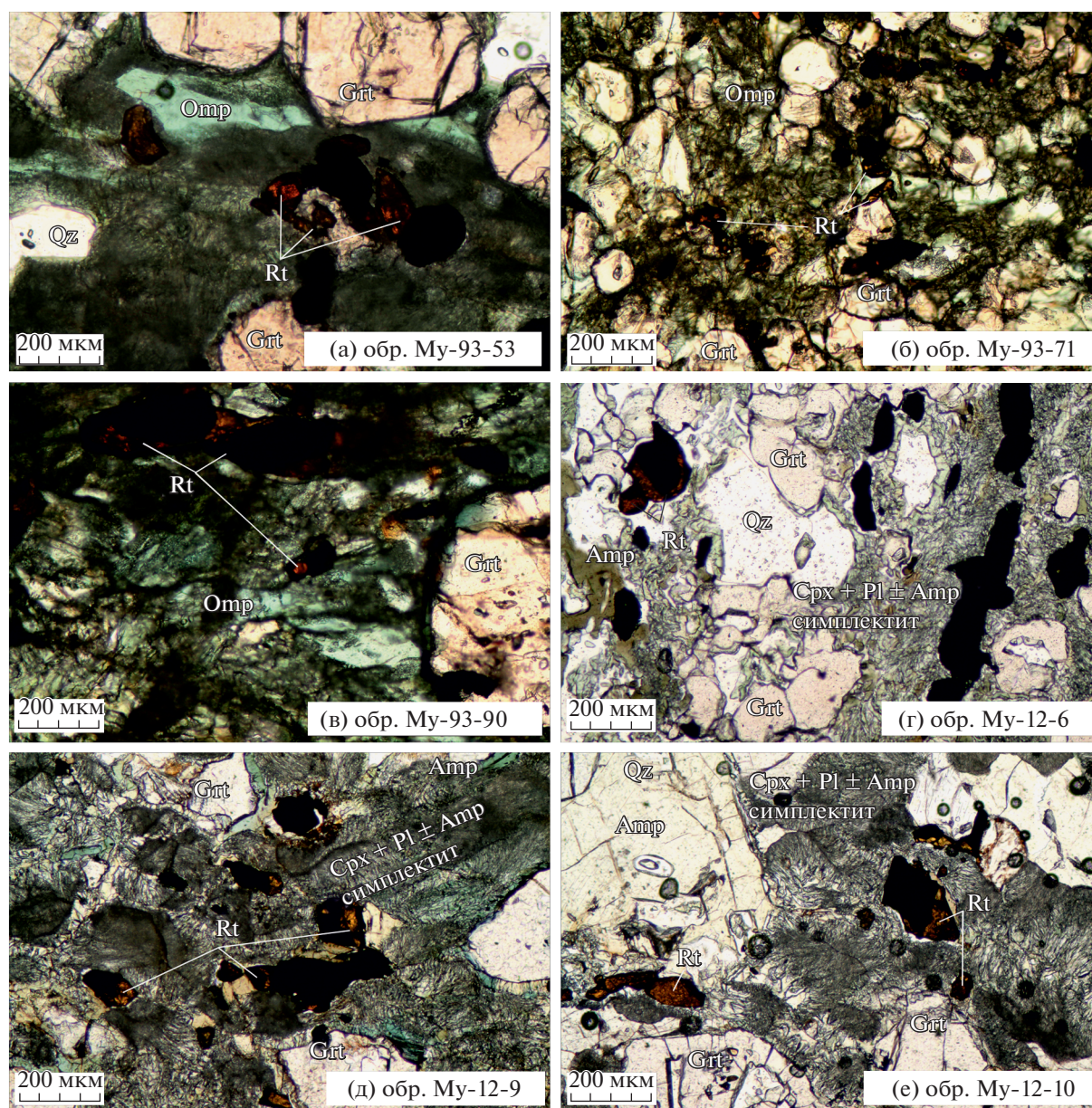


Рис. 2. Петрографические особенности исследованных эклогитов Северо-Муйского комплекса с указанием основных породообразующих, второстепенных и акцессорных фаз. Принятые аббревиатуры: Grt – гранат, Omp – омфациит, Qz – кварц, Rt – рутил, Cpx – бедный Na и Al клинопироксен, Pl – плагиоклаз. Микрофотографии в проходящем свете.

включает в себя титанит, апатит, Са- и Са-Na-амфиболы, минералы группы эпидота, редкие циркон, кварц и единичные находки клинопироксена, биотита, карбонатов и граната. Из около 200 проанализированных включений более половины представлены титанитом (Al_2O_3 0.55–2.49 вес. %). Амфибол присутствует в рутиле всех образцов, однако количественная характеристика его кристаллохимических формул исключена в силу малого размера включений и распространенной контаминации анализа Ti из матрицы рутила. Ввиду обычно низкотитанистой природы

метаморфических амфиболов, наблюдаемых в виде включений в порфиробластах граната (преимущественно ниже 1 мас. % TiO_2) [11], произведен пересчет состава амфиболов на безтитанистой основе, которые в большинстве случаев соответствуют паргаситу. Включения минералов группы эпидота, обнаруженные в трех образцах эклогитов, имеют железистость $X_{\text{Fe}^{3+}}$ в диапазоне 0.15–0.24 и в большинстве случаев относятся к эпидотам. Большинство включений слюд выявлено в рутиле эклогита Му-93-93, где слюды представлены биотитом. Единичные включения кар-

бонатных фаз диагностированы в трех образцах, в двух из которых карбонат представлен анкеритом (около 7 вес. % FeO) и в одном — кальцитом. Короткопризматические включения апатита размером 1–5 мкм с 1.56–3.18 вес. % F распространены в рутилах из эклогита Му-93-71 и редки — в рутилах симплектитовых эклогитов Му-12-6 и Му-12-9. Циркон встречается в виде мельчайших (менее 5 мкм) изометричных зерен, неравномерно распределенных в рутиле-хозяине. Кроме того, рутил систематически содержит ламели ильменита, наиболее распространенные в трех образцах симплектитовых эклогитов. Лишь пять проанализированных в рутиле включений (4 — клинопироксен, и 1 — гранат), представлены минеральными фазами, которые могут рассматриваться как высокобарические. Клинопироксен в рутиле эклогитов из района р. Илеир (Му-93-90, Му-93-53 и Му-93-71) представлен омфацитом с низким и высоким содержанием жадеита ($X_{Jd} = 0.10–0.38$) и вариативной железистостью $\#Fe$ (0.26–0.40), тогда как богатые жадеитом клинопироксены близки по составу к таковому матрикса. Единственное включение граната имеет алмадин-гроссуляр-пироповый состав ($Alm_{52}Grs_{24}Prp_{19}Sps_4$). Включений высококремнистых слюд (фенгита) не выявлено.

Рутилы систематически содержат малые количества 0.1–0.3 мас. % FeO, тогда как общее содержание редких элементов обычно не превышает 0.3–0.5%. Систематика рутилов по содержанию Nb и Cr указывает на типично эклогитовую (метабазитовую) природу рутила (рис. 4 а). Лишь состав высоко-Nb рутила из эклогита Му-93-93 соответствует рутилу из метаосадочных пород. Наблюдается две различных тенденции обогащения рутила W-Ta-Nb и Cr-Mo. Для всех семи эклогитов наблюдаются положительная корреляция Zr и Hf (рис. 4 б), тогда как в некоторых случаях высокий уровень содержания обоих элементов может указывать на присутствие микровключений циркона. Данный факт согласуется с отсутствием корреляции Nb–Zr и спорадически повышенным содержанием Nb в единичных рутилах из всех образцов эклогитов (рис. 4 в). Соответствующие значения содержаний исключены из дальнейших расчетов.

Расчеты температур кристаллизации/перекристаллизации, основанные на содержании Zr в рутиле, по [2], принимая параметры $a_{TiO_2} = 1$ и $a_{SiO_2} = 0.5$ (ввиду малой распространенности кварца в проградных/пиковых парагенезисах эклогитов), с учетом наблюдаемых фаз-включений и условий эволюции эклогитов [9, 12] проведены для давлений 1.5 ГПа с целью сравнения с расчетными данными гранат-клинопироксеновой Fe^{2+} –Mg-геотермометрии [10] и для 2.5 ГПа — для экстраполяции в область пиковых значений давления. Рутилы из четырех эклогитов района

р. Илеир имеют близкие содержания Zr (рис. 4 г) и дают близкие средние оценки температуры для 1.5 ГПа в $619 \pm 12^\circ C$ (Му-93-53), $623 \pm 21^\circ C$ (Му-93-71), $638 \pm 27^\circ C$ (Му-93-90) и $637 \pm 22^\circ C$ (Му-93-93) (здесь и далее оценки приводятся на уровне воспроизводимости $\pm 1SD$ и не содержат компонента ошибки от инструментальной неопределенности). Эти оценки в различной степени сопоставимы с результатами традиционной гранат-клинопироксеновой Fe^{2+} –Mg-геотермометрии для той же величины давления ($680 \pm 12^\circ C$, $620 \pm 26^\circ C$, $650 \pm 31^\circ C$ и $660 \pm 30^\circ C$, соответственно, по [10], а отклонения могут быть обусловлены вариациями в реальных значениях давления. Схожие и единообразные оценки получены по расчетам для трех симплектитовых эклогитов района р. Самокут: $616 \pm 13^\circ C$ для Му-12-6, $617 \pm 7^\circ C$ для Му-12-9 и $614 \pm 11^\circ C$ для Му-12-10. Оценки температур, полученные для давления 2.5 ГПа, соответствующего в случае роста рутила на пике метаморфизма, систематически выше на $\sim 45^\circ C$ и находятся в диапазоне $659–684^\circ C$.

Для оценки U–Pb возраста были проанализированы навески рутилов из 6 эклогитов, для которых получены отношения $^{206}Pb/^{204}Pb$ от 22 до 88. Для минералов-геохронометров со значительным компонентом нерадиогенного свинца ($^{206}Pb/^{204}Pb < 100$) неопределенности в оценке изотопного состава первичного свинца могут вызвать значительные ошибки в получившемся возрасте. Для минералов с низкими отношениями U/Pb и количеством радиогенного свинца наиболее приемлемо применение трехмерной линейной (“total-Pb/U”) изохроны [15] для расчета возраста когенетичных образцов с предполагаемым одинаковым изотопным составом первичного Pb. Трехмерные методы не требуют знания изотопного состава общего (первичного) свинца, используемого для коррекции, поэтому возраст “total-Pb/U”-изохроны, построенной в координатах $^{238}U/^{206}Pb$ – $^{207}Pb/^{206}Pb$ – $^{204}Pb/^{206}Pb$, является более точным, чем возраст, полученный с использованием модели Стейси-Краммера для поправки на первичный Pb. По результатам анализа U–Pb-изотопной системы рутила в образце эклогита Му-93-53 (табл. 1), наиболее богатого U и радиогенным Pb ($^{206}Pb/^{204}Pb$ в диапазоне 62–88), получена надежная возрастная оценка по конкордии в 605 ± 2 млн. лет (рис. 6). Ряд датировок, полученных по рутилу из других образцов, являются менее точными и/или в различной степени дискордантными в силу низких содержаний радиогенного Pb. Следствием последнего является также расхождение дат, полученных по отношениям $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{206}Pb$. Стоит отметить, однако, что по возрасту пересечения с конкордией некоторые из дат эквивалентны в пределах ошибки полученному для Му-

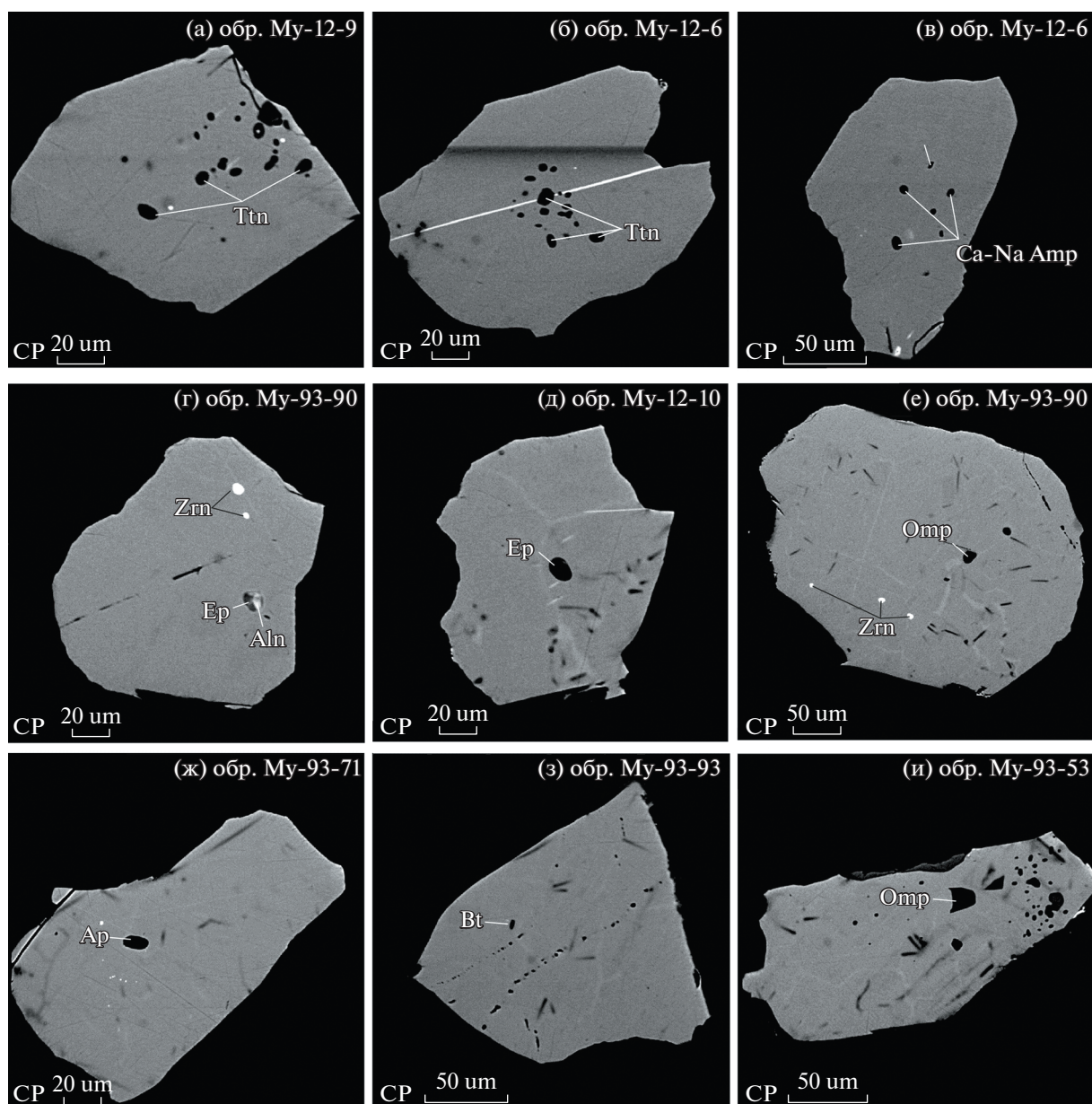


Рис. 3. Представительные микрофотографии отдельных зерен рутила с характерными твердофазными включениями преимущественно силикатного состава. Фото в обратно-рассеянных электронах (BSE).

93-53 значению, к примеру, расчетный возраст в 604 ± 13 млн лет для эклогита Му-93-90.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ассоциация минеральных включений в рутиле (прежде всего титанит, эпидот и амфибол) указывает на преимущественный рост рутила на прогрессивной стадии метаморфизма за счет титаниита в протолите эпидот-амфиболовой или амфиболовой фаций. Подтверждением этому выступает также распространенность включений водосодержащих минералов в ядрах гранатов

большинства изученных эклогитов [10, 12]. Конкретные условия перехода титанит–рутил зависят от химизма пород, в том числе известковистости, магнезиальности, а также содержания SiO_2 . Для среднего состава базитов типа COX появление рутила при температурах $500\text{--}700^\circ\text{C}$ характерно при относительно низких давлениях 7–8 кбар [16], тогда как собственно термобарометрия рутилсодержащих эпидот-клиноцоизитовых амфиболитов указывает на довольно широкую область устойчивости основного парагенезиса ($\sim 500\text{--}780^\circ\text{C}$, 0.7–1.2 ГПа) [17]. Образование рутила за счет титаниита, к примеру, согласно реак-

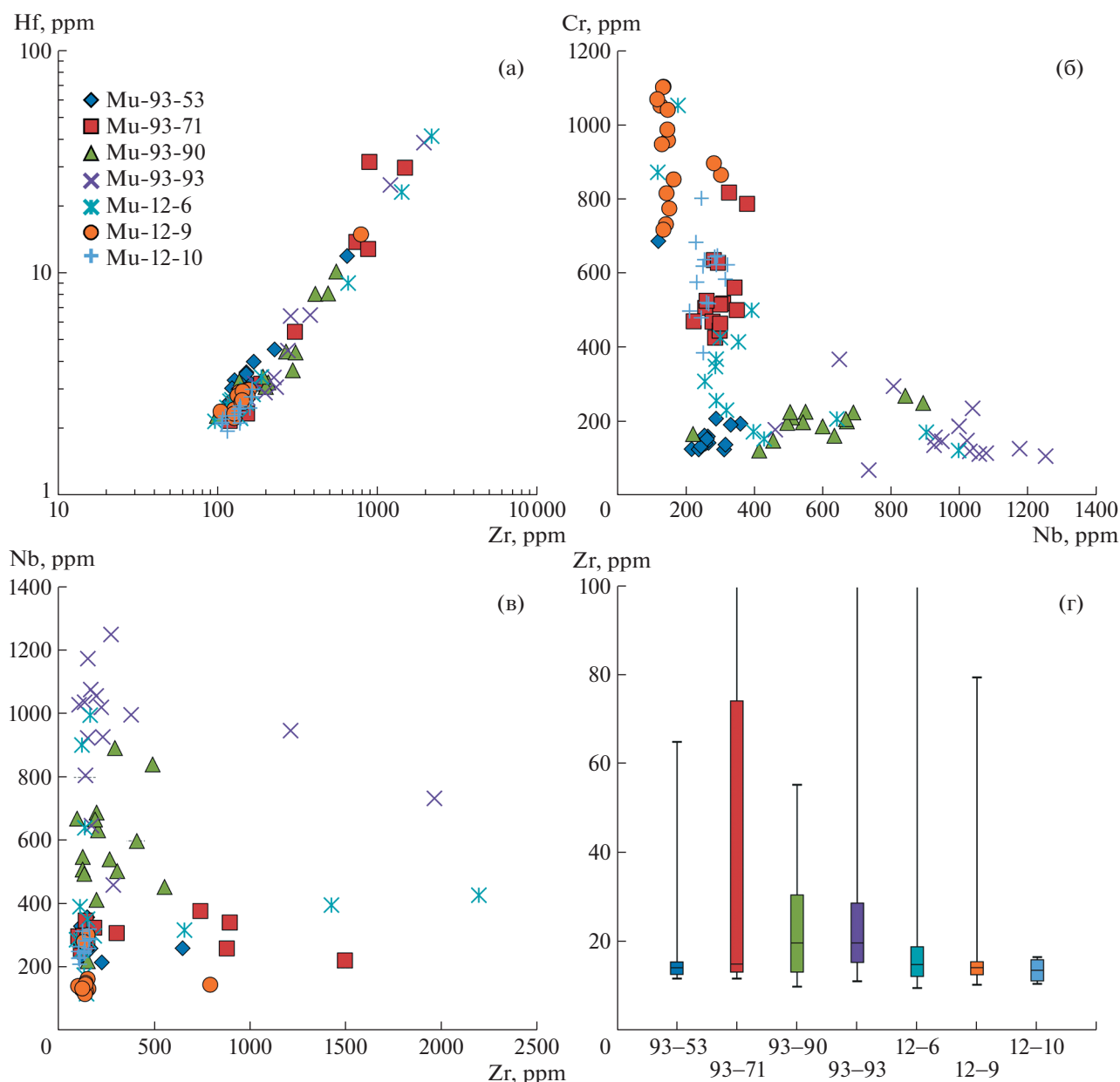


Рис. 4. Корреляционные диаграммы для ключевых редких элементов в рутиле из эклогитов (а–д) и диапазоны содержаний Zr в рутилах из отдельных образцов (е). На планках погрешностей концевыми отрезками показаны максимальные и минимальные содержания в диапазонах. Границы заштрихованных планок соответствуют первому и третьему квартилю, отрезки внутри планок — медианным значениям.

ции $An + 2Ttn = Grs + 2Rt + Qz$, могло быть таким образом инициировано в условиях эпидот-амфиболитовой или амфиболитовой фаций при давлениях существенно меньше пиковых. Нельзя исключать, однако, что проградный рост рутила мог продолжаться вплоть до достижения пика метаморфизма. Следовательно, наблюдаемый диапазон содержаний Zr и расчетных температур кристаллизации рутила может соответствовать условиям от проградных (средние оценки 619–638°C в

расчете на 1.5 ГПа) до пиковых (659–684°C для 2.5 ГПа).

Диффузия Zr в рутиле существенно более медленный процесс в сравнении с таковой для Pb и ряда катионов переменной валентности (Co, Fe, Mn, Sc) [18]. По расчетным данным [19] при пиковой температуре метаморфизма в диапазоне ~650°C для рутила с радиусом зерен менее 80 мкм переуравновешивание исходных уровней Zr в полном объеме зерен возможно при эксгумации, сопровождаемой охлаждением мед-

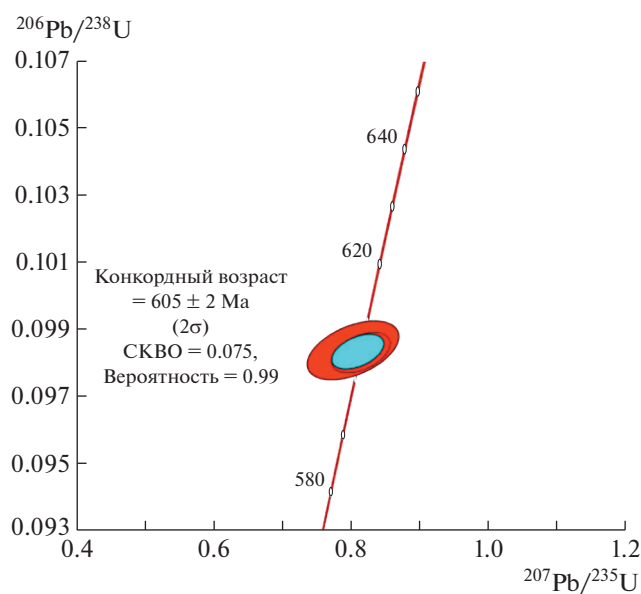


Рис. 5. ^{207}Pb – ^{235}U – ^{206}Pb – ^{238}U -диаграмма для рутила из эклогита Му-93-53 по данным ID-TIMS.

леннее $\sim 10^\circ\text{C}/\text{млн лет}$. Согласно преобладающим в настоящее время моделям эксгумации ультра-высокобарических пород, охлаждение и декомпрессия пород до среднекоровых уровней происходит значительно быстрее (менее 10 млн лет). Однако для некоторых континентальных высокобарических комплексов характерен ограниченный рост температуры, связанный с наращиванием мощности литосферы на коллизионной стадии. Согласно данным классической термобарометрии и PT -моделирования [10–12], пиковые значения температуры для эклогитсодержащего комплекса СМБ могли достигать ~ 750 – 770°C [9, 11, 12]), что способствовало постростовой диффузии Zr. Как результат, вариации содержания малоподвижного Zr в рутиле отдельных образцов (рис. 4 г) могут

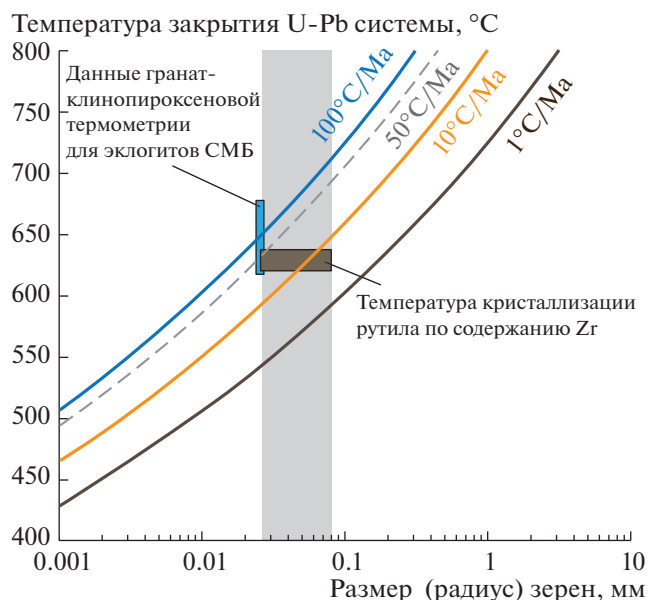


Рис. 6. Расчетные кривые для температуры закрытия U–Pb-изотопной системы рутила при различных величинах скорости охлаждения (по [19]). Серой областью отмечен диапазон характерного размера зерен рутила в эклогитах. Голубой и темно-серый прямоугольники соответствуют диапазону рассчитанных температур пикового равновесия эклогитов по данным гранат-клинопироксеновой термометрии [10] и содержанию Zr в рутиле (данная работа).

быть следствием лишь частичной его мобилизации, что согласуется с существенными вариациями по таким более мобильным элементам, как Sr, Fe и Mn. Близость полученных температур для семи образцов в таком случае может свидетельствовать о едином процессе проградного метаморфизма пород.

В сравнении с диффузией высоkozарядных элементов скорость таковой для Pb в структуре рутила примерно на порядок выше, и, следова-

Таблица 1. Результаты U–Pb-датирования рутила из эклогита Му-93-53 Северо-Муйского блока

№	Номер пробы	Навеска (мг)	Содержание, мкг/г		Изотопные отношения				Rho	Возраст, млн лет		
			Pb	U	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}^a$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^b$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1	Му-93-53	9.5	0.64	3.0	67.68	0.05946	0.80632	0.09836	0.46	605 ± 4	600 ± 36	584 ± 33
2	Му-93-53	12.2	0.37	1.6	61.68	0.05918	0.80285	0.09839	0.47	605 ± 4	598 ± 41	574 ± 37
3	Му-93-53 (>150 мкм)	5.4	0.49	2.7	88.23	0.06007	0.81437	0.09832	0.46	605 ± 3	605 ± 26	606 ± 4.9

а — изотопные отношения, скорректированные на бланк и фракционирование; б — изотопные отношения, скорректированные на бланк, фракционирование и обычный Pb; Rho — коэффициент корреляции погрешностей отношений $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$.

тельно, процесс диффузии Pb существенно более чувствителен к температурному режиму, чем диффузия Zr [5]. Важно отметить, что полученная возрастная оценка (~605 млн лет) существенно моложе возраста высокобарического метаморфизма (630 млн лет) [9, 12], что указывает на продолжительную историю остывания эклогитосодержащей литосферы комплекса ниже температуры закрытия U–Pb системы рутила [5–7]. На потенциальную роль длительного охлаждения указывает продолжительная позднедокембрийская термальная эволюция литосферы северо-восточного БМП с формированием как минимум до ~590–570 млн лет гранитоидных батолитов и кислых вулканитов, связанных с орогенным коллапсом и постколлизийным растяжением [20]. Величины температуры закрытия для рутила с радиусом зерен 25–80 мкм, рассчитанные по классической модели [19] с использованием скорректированных коэффициентов диффузии [5], для единой скорости остывания пород могут варьировать в диапазоне вплоть до ~50°C. К примеру, для рутила с указанным выше радиусом зерен для темпов охлаждения 1 и 10°C/млн лет величины температуры закрытия находятся в диапазоне ~540–590°C и ~590–650°C соответственно (рис. 6 а), что соответствует диапазону эмпирически установленных величин температуры закрытия U–Pb-изотопной системы рутила [1, 6, 7].

Согласованность данных гранат-пироксеновой и Zr-рутиловой термометрии по крайней мере для четырех из семи эклогитов указывает на отсутствие сколь-либо значимого разогрева пород после роста рутила, следовательно, рост рутила должен был происходить уже выше температуры закрытия U–Pb-системы с ее последующей консервацией при охлаждении пород. Исходя из размера исследованных зерен и данных геотермометрии (рис. 6), представляется маловероятным, таким образом, что остывание при эксгумации эклогитизированных пород происходило быстрее ~10°C/млн лет, а максимальные темпы могут быть оценены в ~5–6°C/млн лет. Подобная скорость остывания в совокупности с полученной датировкой (605 млн лет) позволяют ограничить возможную температуру закрытия U–Pb-изотопной системы для рутила выбранных размеров в ~500–525°C. Столь медленное охлаждение характерно для гранулит-гнейсовых комплексов [1, 6, 7], а также второй (внутрикоровой) стадии эксгумации высокобарических комплексов, в течение которой эксгумация контролируется эрозией и/или тектонической денудацией.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках проекта Российского научного фонда (№ 21-77-10038).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mezger K., Hanson G.N., Bohlen S.R.* High-precision U–Pb ages of metamorphic rutiles: application to the cooling history of high-grade terranes // *Earth and Planetary Science letters*. 1989. V. 96. P. 106–118.
2. *Tomkins H.S., Powell R., Ellis D.J.* The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer // *Journal of Metamorphic Geology*. 2007. V. 25. P. 703–713.
3. *Baldwin J.A., Brown M.* Age and duration of ultrahigh-temperature metamorphism in the Anapolis–Itaucu complex, Southern Brasilia belt, central Brazil – constraints from U–Pb geochronology, mineral rare earth element chemistry and trace-element thermometry // *Journal of Metamorphic Geology*. 2008. V. 26. P. 213–233.
4. *Kooijman E., Smit M.A., Mezger K., Berndt J.* Trace element systematics in granulite facies rutile: implications for Zr geothermometry and provenance studies // *Journal of Metamorphic Geology*. 2012. V. 30 (4). P. 397–412.
5. *Cherniak D.J.* Pb diffusion in rutile // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2000. V. 139. P. 198–207.
6. *Kooijman E., Mezger K., Berndt J.* Constraints on the U–Pb systematics of metamorphic rutile from in situ LA-ICP-MS analysis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2010. V. 293 (3–4). P. 321–330.
7. *Vry J.K., Baker J.A.* LA-MC-ICPMS Pb–Pb dating of rutile from slowly cooled granulites: confirmation of the high closure temperature for Pb diffusion in rutile // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2006. V. 70. P. 1807–1820.
8. *Zack T., Stockli D.F., Luvizotto G.L., Barth M.G., Belousova E., Wolfe M.R., Hinton R.W.* In situ U–Pb rutile dating by LA-ICPMS: ²⁰⁸Pb correction and prospects for geological applications // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2011. V. 162. P. 515–530.
9. *Шацкий В.С., Ситникова Е.С., Томиленко А.А., Рагозин А.Л., Козьменко О.А., Ягоуц Э.* Эклогит-гнейсовый комплекс Муйской глыбы (Восточная Сибирь): возраст, минералогия, геохимия, петрология // *Геология и геофизика*. 2012. Т. 53. № 6. С. 657–682.
10. *Шацкий В.С., Скузоватов С.Ю., Рагозин А.Л., Дриль С.И.* Свидетельства неопротерозойской континентальной субдукции в Байкало-Муйском складчатом поясе // *ДАН*. 2014. Т. 459. № 2. С. 228–231.
11. *Skuzovatov S.Yu.* Differential fluid activity in a single exhumed continental subduction unit from local P–T–M(H₂O) records of zoned amphiboles (North Muya, Eastern Siberia) // *Minerals*. 2022. V. 12(2). P. 217.
12. *Skuzovatov S.Yu., Shatsky V.S., Wang K.-L.* Continental subduction during arc-microcontinent collision in the southern Siberian craton: constraints on protoliths and metamorphic evolution of the North Muya complex eclogites (Eastern Siberia) // *Lithos*. 2019. V. 342–343. P. 76–96.
13. *Ludwig K.R.* PbDat for MS-DOS, version 1.21. U.S. Geological Survey Open-File Report, 1991, p. 88–542.
14. *Ludwig K.R.* ISOPLOT 3.0—a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. — Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 74 p.

15. Ludwig K.R. On the treatment of concordant uranium-lead ages // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998. V. 62(4). P. 665–676.
16. Starr P.G., Pattison D.R.M. Equilibrium and disequilibrium processes across the greenschist – amphibolite transition zone in metabasites // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2019. V. 174(2). P. 1–18.
17. Kapp P., Manning C.E., Tropper P. Phase-equilibrium constraints on titanite and rutile activities in mafic epidote amphibolites and geobarometry using titanite–rutile equilibria // *Journal of Metamorphic Geology*. 2009. V. 27. P. 509–521.
18. Cherniak D.J., Manchester J., Watson E.B. Zr and Hf diffusion in rutile // *Earth and Planetary Science Letters*. 2007. V. 261. P. 267–279.
19. Dodson M.H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1973. V. 40. P. 59–274.
20. Срывцев Н.А., Халилов В.А., Булдыгеров В.В., Перелеев В.И. Геохронология гранитоидов Байкало-Муйского пояса // *Геология и геофизика*. 1992. № 9. С. 92–78.

U-Pb ID-TIMS AGE OF RUTILE FROM THE NORTH MUYA BLOCK ECLOGITES (NORTHEASTERN TRANSBAIKALIA) AS A TRACER OF DURATION FOR OF THE CONTINENTAL LITHOSPHERE EXHUMATION

S. Yu. Skuzovatov^{a, #}, N. G. Rizvanova^b, S. G. Skublov^{b, c}, and Academician of the RAS V. S. Shatsky^{d, e}

^a*Vinogradov Institute of Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Irkutsk, Russian Federation*

^b*Institute of Precambrian geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation*

^c*Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation*

^d*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Novosibirsk, Russian Federation*

^e*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

[#]*E-mail: skuzovatov@igc.irk.ru*

Being an abundant mineral phase of high-grade rocks, rutile is used as a tracer of lithospheric evolution for deep zones of orogenic belts. This study presents the new ID-TIMS U–Pb geochronological, mineralogical and geochemical data for rutile from the North Muya block (Baikal-Muya Foldbelt) eclogites in order to examine the applicability of its age estimates relative to the exhumation process of high-grade rocks. The assemblage of mineral inclusions in rutile (mainly titanite, epidote and amphibole) indicate rutile growth through titanite breakdown reactions during prograde metamorphism epidote-amphibolite or amphibolite-facies rocks. The range of Zr contents and estimated Zr-in-rutile crystallization temperatures correspond to conditions from prograde (619–638°C at 1.5 GPa) till peak ones (659–684°C for 2.5 GPa). The U–Pb age estimate (604 Ma) is notably younger than that of peak eclogitic metamorphism (630 Ma), and highlight the protracted cooling history of eclogite-bearing complex during its evolution below closure temperature of the U–Pb isotope system (~500–525°C) during tectonic unroofing or erosion of continental complexes.

Keywords: Central Asian Orogenic belt, Baikal-Muya belt, eclogites, rutile, ID-TIMS U–Pb geochronology, lithospheric exhumation