

УДК 550.93

**СООТНОШЕНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ, МЕТАМОРФИЧЕСКИХ
И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРЕДЕЛАХ
БАЙКАЛО-МУЙСКОГО ТЕРРЕЙНА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ):
ДАННЫЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ
КЕДРОВСКОГО ГРАНИТОИДНОГО МАССИВА**

**А. В. Чугаев^{1,*}, академик РАН И. В. Чернышев¹, Е. Ю. Рыцк², Е. Б. Сальникова²,
А. А. Носова¹, А. В. Травин^{3,4}, А. Б. Котов², А. М. Федосеенко², И. В. Анисимова²**

Поступило 09.07.2019 г.

При определении возраста главных этапов корообразования в различных блоках континентальной коры ключевое значение имеет высокоточное датирование гранитоидов. В настоящей работе оно проведено на примере Кедровского диорит-гранодиоритового массива, локализованного в пределах Южно-Муйского блока Байкало-Муйского аккреционного террейна (Восточная Сибирь) среди неопротерозойских габброидов кедровского комплекса и метаосадочных пород кедровской свиты. Рассматриваются результаты геохронологического U–Pb (ID TIMS)- и ³⁹Ar/⁴⁰Ar-изучения Кедровского массива. Становление массива (781 ± 3 млн лет назад) произошло на раннем этапе образования протерозойской континентальной коры БМТ при аккреции байкалит с окраинной Сибирского кратона. Более позднее термальное событие (626 ± 11 млн лет назад), имевшее место в истории БМТ в эдиакарское время, нашло отражение в формировании в гранитоидах Кедровского массива серии секущих жил биотит-кварц-полевошпатового состава. Полученные данные позволяют исключить гранитоиды Кедровского массива из числа потенциальных рудогенерирующих магматических комплексов, с которыми пространственно ассоциируется золоторудная минерализация одноименного месторождения, имеющего возраст 273 ± 4 млн лет.

Ключевые слова: неопротерозой, гранитоиды, U–Pb-возраст, Байкало-Муйский террейн.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893292-297>

При расшифровке истории формирования континентальной коры в докембрии, относящейся к числу наиболее важных вопросов в современной геологии [1], ключевое значение имеет высокоточное датирование гранитоидов, позволяющее определить возраст главных этапов корообразования и наличие временной связи кислого магматизма с процессами рудообразования. Байкало-Муйский аккреционный террейн (БМТ), расположенный на границе Центрально-Азиатского орогенного пояса и Сибирского кратона [1], является областью широкого развития гранитоидов, возраст и происхождение которых являются дискуссионными. К их числу относятся гранитоиды Кедровского массива,

аналоги которых распространены в пределах Южно-Муйского блока БМТ. Свежий облик и отсутствие гнейсовидности в породах, а также штокообразная форма Кедровского массива служили основанием для их отнесения к позднепалеозойским интрузивным образованиям конкудеро-мамаканского комплекса [2]. С ним пространственно ассоциируются золотокварцевые жилы месторождения Кедровское, которые локализованы как в приконтактных, так и во внутренних зонах массива среди гранодиоритов и диоритов [3, 4]. Это считается свидетельством генетической связи руд золота минерализации с позднепалеозойским гранитоидным магматизмом в БМТ ([3, 5] и др.).

В настоящей работе впервые показано, что становление гранитоидов Кедровского массива происходило на одном из наиболее ранних этапов (около 800–780 млн лет назад) неопротерозойской истории БМТ, задолго до формирования золоторудной минерализации региона.

Кедровский гранитоидный массив площадью 10 км² приурочен к региональной зоне сдвигов, которая с востока ограничивает раннекембрийский Южно-Муйский блок. Он прорывает неопротеро-

¹ *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской Академии наук, Москва*

² *Институт геологии и геохронологии докембрия Российской Академии наук, Санкт-Петербург*

³ *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет*

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

*E-mail: vassachav@mail.ru

зойские габброиды кедровского комплекса и метасадочные породы кедровской свиты [6] (рис. 1) и пересечён жилами биотит-кварц-полевошпатовых пород, а также дайками долеритов и лампрофиров предположительно позднепалеозойского возраста. В составе массива преобладают гранодиориты, которым подчинены кварцевые диориты и диориты [7].

Изучены гранодиориты и биотит-кварц-полевошпатовые жильные породы, вскрытые скважинами в южной части Кедровского массива. Биотитовые и амфибол-биотитовые гранодиориты обладают средне-крупнозернистой гипидиоморфозернистой

структурой, сложены кислым плагиоклазом (до 55%), калиевым полевым шпатом (до 10%), кварцем (до 25%), биотитом и подчинённым амфиболом (до 10%), акцессорными апатитом, магнетитом, цирконом, титанитом. Граниты — метаглинозёмистые ($A/CNK = 0,73-0,74$), с довольно высокой магнезиальностью ($Mg\# = 0,44-0,46$), существенным преобладанием Na над K ($Na_2O = 3,87-4,49$ мас.%, $K_2O = 1,86-2,05$ мас.%) и умеренными содержаниями Ti ($0,51-0,54$ мас.% TiO_2) и P ($0,17$ мас.%, P_2O_5). В них установлены высокие содержания Ba (до 1700 мкг/г), умеренные концентрации Sr (600 мкг/г), Rb (50–60 мкг/г) и Zr (200 мкг/г) и низкие концентрации Nb (≤ 6 мкг/г). Распределение PЗЭ отличается умеренным фракционированием ($(La/Yb)_n = 10$) при более значительном обогащении лёгкими PЗЭ ($(La/Sm)_n = 4$), чем тяжёлыми PЗЭ ($(Gd/Yb)_n = 1,7-1,8$). Аномалия Eu отсутствует. По соотношениям Nb–Y ($Y/Nb = 0,3-0,5$), Ta–Yb–Rb ($Yb/Ta = 0,3-0,8$), высокому LILE/HFSE отношению (например, Ba/Nb до 300) гранодиориты принадлежат к типу гранитоидов островных вулканических дуг и/или активных континентальных окраин [8].

Применены геохронологические методы U–Pb (ID–TIMS)-датирования для циркона из гранодиоритов и $^{39}Ar/^{40}Ar$ -датирования для биотита из мало-мощной (3–4 см) кварц-плагиоклазовой жилы в гранодиоритах. С помощью электронного микроскопа в режимах катодолюминесценции (CL) и обратно-рассеянных электронов (BSE) проведено изучение морфологии и строения зёрен циркона. Химическая подготовка проб циркона проведена согласно методике [9]. Суммарный уровень фона химической процедуры по U и Pb не превышал соответственно 1 и 15 пг. Для определения содержаний U и Pb использован смешанный изотопный трассер $^{235}U + ^{202}Pb$. Измерения выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI. Погрешность определения изотопных отношений $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{235}U$ не превышала $\pm 0,5\%$. Обработка изотопных данных проводилась с помощью программы PbDAT [10] и ISOPLOT [11].

$^{39}Ar/^{40}Ar$ -датирование биотита проведено с использованием методик, изложенных в работе [12]. В качестве монитора использовался стандартный образец биотита MCA-11 (ОСО № 129–88) с возрастом $311,0 \pm 1,5$ млн лет, аттестованный по международным стандартным образцам мусковита Bern-4M и биотита LP-6. Измерение изотопного состава Ar в облучённых образцах проводилось на масс-спектрометре Noble Gas 5400, “Micromass”.

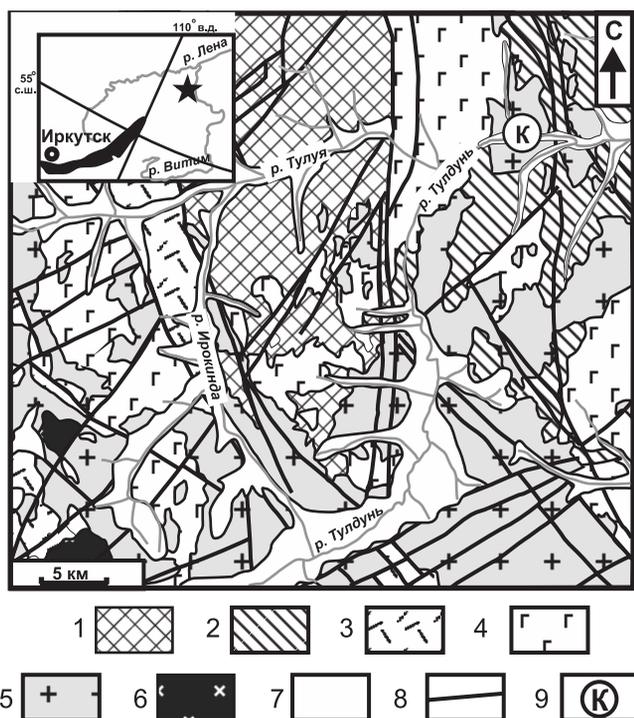


Рис. 1. Схема геологического строения района Кедровского гранитоидного массива (Восточная Сибирь) (составлена по материалам ГРП ООО “Артель старателей Западная” и [4]). 1 — гнейсы, кристаллические сланцы, мраморы, кальцифиры киндиканской свиты ($AR(?) - PR_1$); 2 — метасадочные породы (метапесчаники, биотитовые и двуслюдяные сланцы, серицит-хлоритовые сланцы, известняки, углеродистые сланцы) кедровской и усть-тулдуновской свит (без расчленения) (PR_2); 3 — ортосланцы, слюдисто-кварцевые сланцы, метаэффузивы, туфоконгломераты усть-келянская толщи (PR_2) и молассоидные (конгломераты, гравелиты, песчаники, сланцы) отложения аматканской свиты (PR_2); 4 — габброиды (габбро, оливинные габбро, габбро-диориты, габбро-нориты) кедровского комплекса (PR_2); 5 — гранитоиды (граниты, гранодиориты, плагиограниты) бамбукойского и илеирского комплексов (PR_2); 6 — гранитоиды конкудеро-мамаканского комплекса (PZ_2); 7 — аллювиальные отложения (Q); 8 — тектонические нарушения; 9 — Кедровский массив.

Выделение газовых фракций и анализ изотопных отношений аргона в них осуществлялись в температурном интервале от 500 до 1200 °С. Поправка на масс-дискриминацию вводилась по результатам систематических анализов изотопных отношений воздушного Ar. Суммарный фон по ^{40}Ar не превышал $5 \cdot 10^{-10}$ нсм³.

Циркон из гранодиоритов представлен прозрачными, призматическими и длиннопризматическими кристаллами светло-розового цвета (рис. 2, I–III). Их размер изменяется от 50 до 350 мкм, а коэффициент удлинения составляет 2,0–3,0. Зёрна циркона проявляют хорошо выраженную зональность в своём строении (рис. 2, IV–VI), что указывает на его магматическое происхождение. В некоторых зёрнах циркона встречаются трещиноватые унаследованные ядра неправильной формы (рис. 2, VI).

Изучены три микронавески циркона (20–25 зёрен), отобранные из размерных фракций <50 и 50–75 мкм (табл. 1). Точки их изотопного состава располагаются на дискордии (рис. 3), верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 783 ± 8 млн лет (СКВО = 0,56), а нижнее

636 ± 1200 млн лет. При этом одна из точек (№ 3, табл. 1) находится на конкордии (рис. 3). Возраст циркона из этой микронавески составляет 781 ± 3 млн лет (СКВО = 1,0; вероятность конкордантности 0,31). Он принимается в качестве возраста гранодиоритов Кедровского массива.

Распределение значений $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -возраста (рис. 4), полученных по данным анализа 12 фракций аргона, имеет форму протяжённого плато (около 95% выделенного ^{39}Ar). Ему соответствует значение возраста 626 ± 11 млн лет. Характер этого распределения позволяет предположить, что $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -возраст отвечает эдиакарскому времени закрытия изотопной K–Ar-системы биотита. Данный возраст может быть интерпретирован как возраст жильной серии биотит-кварц-полевошпатовых пород, секущих гранодиориты Кедровского массива, или как возраст более позднего термального события, проявленного в регионе после образования жильных пород.

Полученный U–Pb-возраст циркона показывает, что гранитоиды Кедровского массива (781 ± 3 млн лет) образовались в раннем неопротерозое и одновозрастны с гнейсо-гранитами илеирского ком-

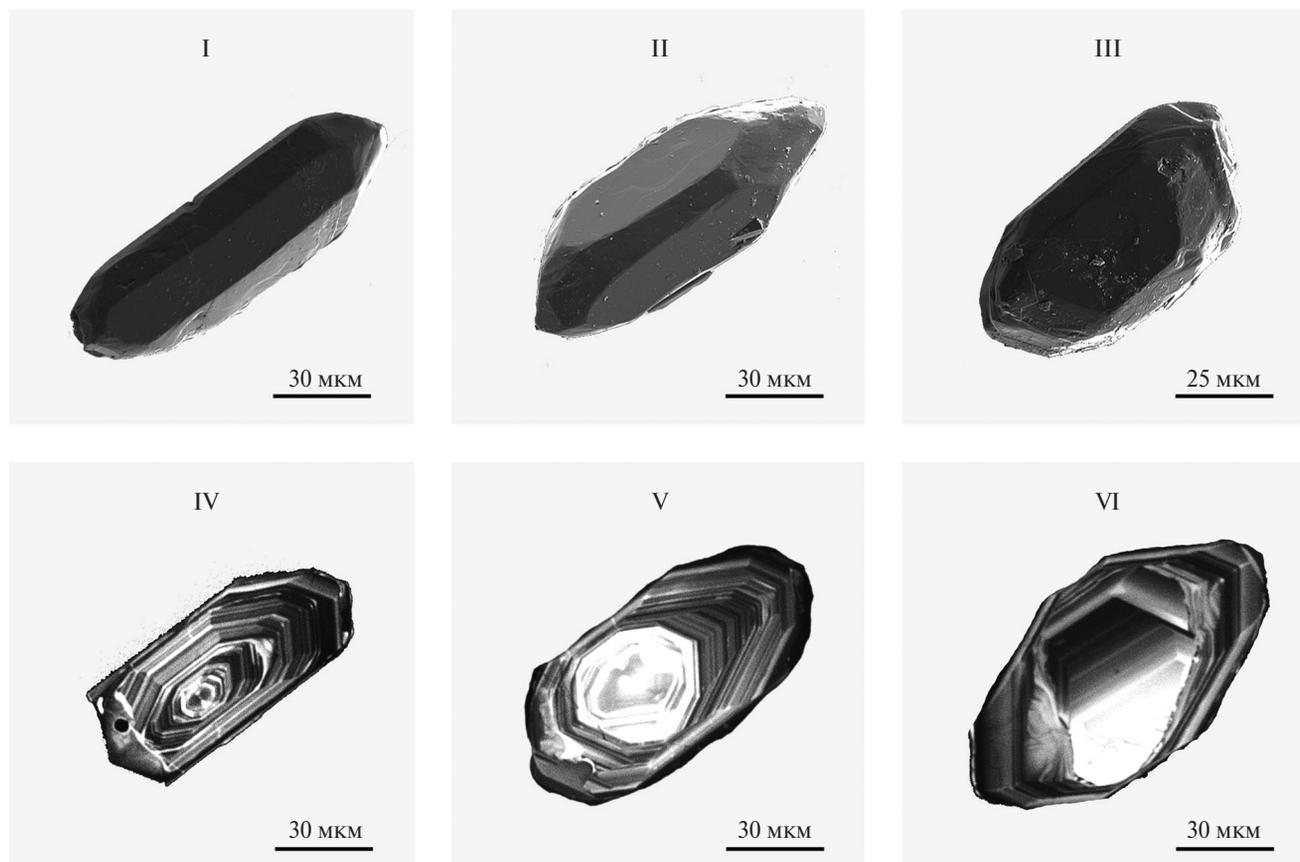


Рис. 2. Микрофотографии кристаллов циркона из гранодиоритов Кедровского массива (образец С-54-56-15), выполненные на сканирующем электронном микроскопе АВТ-55: I–III — в режиме вторичных электронов; IV–VI — в режиме катодоллюминесценции.

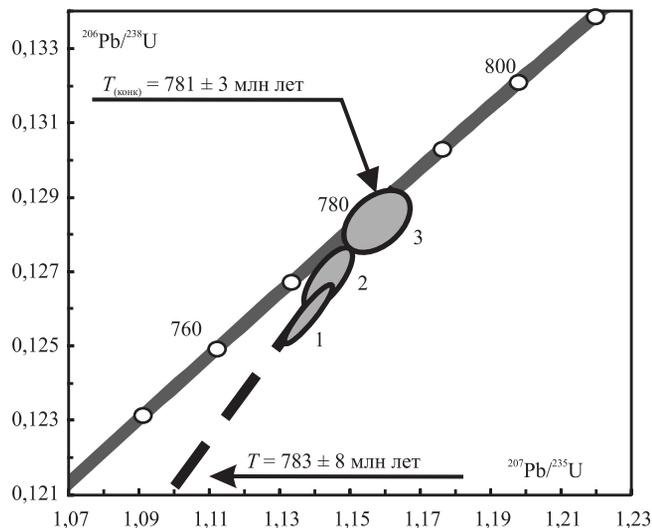


Рис. 3. U–Pb-диаграмма с конкордией для циркона из гранодиоритов Кедровского массива (образец С 56-54-15). Номера точек на диаграмме соответствуют порядковым номерам проб в табл. 1.

плекса (784 ± 6 и 786 ± 9 млн лет [13]). Последние маркируют метаморфическое событие, связанное

с аккрецией Анамакит-Муйского террейна ранних байкалит БМТ с южной окраиной Сибирского кратона [13, 14]. Геохимические и Sr–Nd-изотопные ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 = 0,704$, $\epsilon_{\text{Nd}(T)} = -1,3$, $T_{\text{DM}} = 1,6$ млрд лет) характеристики гранодиоритов Кедровского массива свидетельствуют о том, что источником их материнских расплавов являлась палеопротерозойская континентальная кора Анамакит-Муйского террейна. $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -возраст (626 ± 11 млн лет) биотита из жильной серии совпадает с периодом времени проявления позднебайкальских метаморфических событий, имевших место около 640–610 млн лет назад в БМТ [13, 14].

Полученный U–Pb-методом возраст гранитоидов Кедровского массива (781 ± 3 млн лет) оказался несколько древнее изохронного Sm–Nd-возраста (735 ± 26 млн лет [6]) прорываемых ими габбро-норитов расслоенной серии кедровского комплекса. Причинами этого расхождения могут быть:

1) нарушение замкнутости Sm–Nd-системы габбро-норитов под воздействием более поздних тер-

Таблица 1. Результаты изотопных U–Pb-исследований циркона из гранодиоритов (образец С-56-54-15) Кедровского массива (Восточная Сибирь, Россия)

№	Размерная фракция (мкм) и количество зёрен в навеске	Навеска, мг	Pb, мкг/г	U, мкг/г	Изотопные отношения					Rho	Возраст, млн лет		
					$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^a$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^a$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1	50–75, 20 шт.	0,07	28,0	206	2582	$0,0656 \pm 1$	$0,1762 \pm 1$	$1,1393 \pm 21$	$0,1260 \pm 1$	0,90	772 ± 1	765 ± 1	791 ± 2
2	<50, 30 шт.	0,15	22,70	166	2858	$0,0654 \pm 1$	$0,1813 \pm 1$	$1,1450 \pm 26$	$0,1270 \pm 1$	0,65	775 ± 2	771 ± 1	787 ± 4
3	50–75, 25 шт.	0,07	30,50	147	1622	$0,0654 \pm 4$	$0,1744 \pm 2$	$1,1585 \pm 75$	$0,1285 \pm 2$	0,38	781 ± 5	779 ± 2	787 ± 13

Примечание. ^a – значения изотопных отношений Pb, скорректированные на бланк и обыкновенный свинец; Rho – коэффициент корреляции ошибок для отношений $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ и $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам.

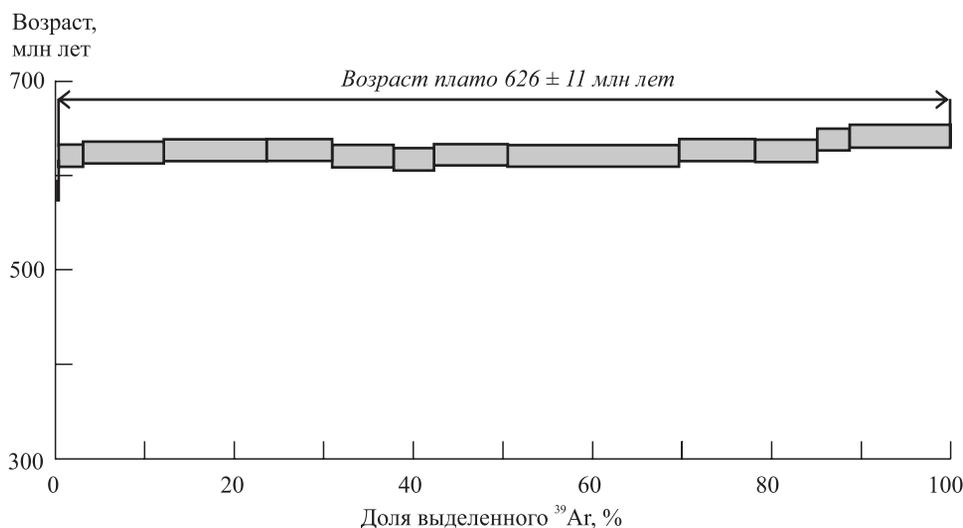


Рис. 4. График распределения значений $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -возраста для биотита из биотит-кварц-полевошпатовой жилы Кедровского массива.

мальных и гидротермальных событий эдиакарского и позднепалеозойского времени;

2) возможное совмещение в пределах Кедровского габбро-анортозитового плутона пород, которые относятся к различным по составу и возрасту дифференцированным сериям базитов [15].

Приведённые выше результаты позволяют по-новому взглянуть на историю процессов БМТ. Они указывают на широкое развитие в его Южно-Муйском блоке интрузий тонийского возраста, подтверждая наличие двух термальных событий в истории БМТ. С ранним событием, совпадающим по времени с основным этапом (около 800–780 млн лет назад) образования протерозойской континентальной коры БМТ, связано становление гранитоидов Кедровского массива и, возможно, их петрографических аналогов в пределах Южно-Муйского блока. Формирование биотит-кварц-полевошпатовых жил по возрасту коррелирует с эдиакарским (640–610 млн лет) финальным этапом аккреции континентальных блоков БМТ, сопровождавшейся высокобарическим метаморфизмом [13, 14]. Полученные результаты существенным образом меняют представление о происхождении гидротермальной минерализации известного Кедровского месторождения золота, ассоциирующегося с изучавшимся нами одноимённым верхнепротерозойским массивом. Родоначальные гранитоидные расплавы и их возможные дериваты явно не имеют отношения к формированию флюидов, служивших источником золотоносной минерализации месторождения Кедровское. Её возраст согласно вполне надёжным датировкам [4] составляет 273 ± 4 млн лет.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 0136–2014–0006). $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -измерения проведены по государственному заданию (№ 0330–2016–0013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kröner A., Kovach V., Rytisk E., Belousova E., Hegner E., Armstrong R., Dolgoplova A., Seltmann R., Alexiev D.V., Degtyarev K.E., Hoffmann J.E., Wong J.,

Sun M., Cai K., Wang T., Tong Y., Wilde S.A. // *Gondwana Research*. 2014. V. 25. № 1. P. 103–125.

2. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист N-50 — Сретенск. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 377 с.
3. Кучеренко И.В. // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2006. Т. 309. № 2. С. 41–45.
4. Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Лебедев В.А., Белогуб Е.В., Гольцман Ю.В., Ларионова Ю.О., Олейникова Т.И. // Геол. рудн. месторождений. 2017. Т. 59. № 4. С. 281–297.
5. Попов Г.Г., Попов Б.Г., Муратшин Х.Х., Мизиряк Д.Г. // Разв. и охрана недр. 2017. № 9. С. 27–32.
6. Рыцк Е.Ю., Амелин Ю.В., Ризванова Н.Г., Крымский Р.Ш., Митрофанов Г.Л., Митрофанова Н.Н., Переляев В.И., Шалаев В.С. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2001. Т. 9. № 4. С. 3–15.
7. Кучеренко И.В. // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2004. Т. 307. № 1. С. 49–57.
8. Pearce J.A., Harris N.B., Tindle A.G. // *J. Petrol.* 1984. V. 25. № 4. С. 956–983.
9. Krogh T.E. // *Geochim et Cosmochim Acta*. 1973. V. 37. P. 485–494.
10. Ludwig K.R. // *US Geol. Survey Open. File Rept.* 88–542. 1991. 35 p.
11. Ludwig K.R. // *Berkeley Geochronology Center Spec. Publ.* 2003. № 4. 71 p.
12. Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотиллина Т.Б. // *Геохимия*. 2009. № 11. С. 1181–1199.
13. Рыцк Е.Ю., Ковач В.П., Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Богомолов Е.С., Котов А.Б. // *Геотектоника*. 2011. № 5. С. 17–51.
14. Skuzovatov S., Wang K.-L., Drila S., Leeb H.-Y., Iizuka Y. // *Precambrian Research*. 2019. V. 321. P. 34–53.
15. Государственная геологическая карта РФ. 1:200 000. Муйская серия. Лист О-50-XXXII. Объяснительная записка / Под ред. В.Г. Окорочков, И.В. Четвертаков и др. М.: МФ ВСЕГЕИ, 2013.

**RELATIONSHIP BETWEEN MAGMATIC, METAMORPHIC
AND HYDROTHERMAL PROCESSES WITHIN THE BAIKAL—MUYA
TERRANE (EASTERN SIBERIA): CONSTRAINTS FROM A HIGH-PRECISION
GEOCHRONOLOGICAL STUDY OF THE KEDROVSKY GRANITOID MASSIF**

**A. V. Chugaev¹, Academician of the RAS I. V. Chernyshev¹, E. Y. Rytsk², E. B. Salnikova²,
A. A. Nosova¹, A. V. Travin^{3,4}, A. B. Kotov², A. M. Fedoseenko², I. V. Anisimova²**

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,
Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

³*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

⁴*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

Received July 9, 2019

High-precision dating of granitoids is significant for identification the ages of the main stages of crust formation in various blocks of the continental crust. In this work, we dating the Kedrovskiy diorite-granodiorite massif localized within the South Muya block of the Baikal—Muya accretion terrane (BMT) (Eastern Siberia) among the Neoproterozoic gabbroids of the Kedrovskiy complex and metasedimentary rocks of the Kedrovskaya Formation. The results of U—Pb (ID TIMS) and ³⁹Ar—⁴⁰Ar geochronological studies of the Kedrovskiy massif are discussed. The formation of the massif (781 ± 3 Ma) occurred at an early stage formation of the Proterozoic continental crust of BMT during accretion of Baikals with the Siberian craton. A later thermal event (626 ± 11 Ma) of the Ediacaran stage evolution BMT is reflected in the formation of of biotite-quartz-feldspar veins that cut through the granitoids of the Kedrovka massif. The obtained geochronological data show that the gold mineralization of the Kedrovskiy deposit (273 ± 4 Ma) was not generated by the Kedrovskiy massif granitoids.

Keywords: Neoproterozoic, granitoids, U—Pb age, Baikal—Muya terrane.