

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 551.72:549.02:550.4.08

ВОЗРАСТНЫЕ РУБЕЖИ ФОРМИРОВАНИЯ РАННЕДОКЕМБРИЙСКИХ КАРБОНАТИТОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧАРО-ОЛЕКМИНСКОГО ГЕОБЛОКА АЛДАНСКОГО ЩИТА

© 2023 г. М. В. Стифеева^{1,*}, Н. В. Владыкин², член-корреспондент РАН А. Б. Котов¹,
Е. Б. Сальникова¹, И. А. Сотникова², Е. В. Адамская¹, В. П. Ковач¹,
Ю. В. Плоткина¹, Е. В. Толмачева¹, Н. В. Алымова²

Поступило 30.08.2022 г.

После доработки 31.08.2022 г.

Принято к публикации 23.09.2022 г.

Проведены U–Pb геохронологические (ID-TIMS) исследования граната и U–Th–Pb (LA-ICP-MS) “скрининговые” геохронологические исследования циркона из пироксен-карбонатных пород массива Укдуска. Полученные U–Pb-оценки возраста гранатов (1881 ± 8 млн лет) и оболочек цирконов (1865 ± 16 млн лет) указывают на раннепротерозойский возраст образования этих пород. Результаты геохронологических исследований позволяют выделить новый этап карбонатного магматизма в пределах юго-восточной части Чаро-Олекминского геоблока.

Ключевые слова: карбонаты, Алданский щит, U–Pb возраст, LA–ICP–MS метод

DOI: 10.31857/S2686739722601880, **EDN:** GETKBE

Юго-восточная часть Чаро-Олекминского геоблока Алданского щита известна как одна из немногочисленных провинций проявления древнейшего щелочного магматизма калиевой и ультракалиевой специализации [1]. В пределах этой провинции обнаружены несколько относительно небольших массивов, сложенных калиевыми и ультракалиевыми породами, которые являются возрастными и геохимическими аналогами позднеархейских щелочных калиевых пород Канадского щита и западной части Гренландии (например, [3, 5, 11, 12] – ссылки см. Табунс и др., 2004 [1]). Массивы щелочных калиевых пород и вмещающие их породы прорывают многочисленные дайки и жильные тела шонкинитов, меласиенитов, лейкосиенитов, гранитов, оливиновых лампроитов и карбонатитов. Образование последних обычно рассматривается как результат кристаллизационной дифференциации исходных для позднеархейских щелочных калиевых пород магматических расплавов [1]. Однако, судя по геологической ситуации, не исключено, что карбонатиты имеют более молодой возраст. Для того, чтобы

оценить справедливость этого предположения, проведены U–Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования граната и U–Th–Pb (LA-ICP-MS)– “скрининговые” геохронологические исследования циркона из карбонатитов, жильные тела которых пересекают щелочные калиевые породы массива Укдуска.

Массив Укдуска, к которому приурочено одноименное крупное месторождение апатита, является наиболее типичным и хорошо изученным массивом раннедокембрийских калиевых и ультракалиевых пород юго-восточной части Чаро-Олекминского геоблока. Геологическое строение этого массива и геохимические особенности слагающих его пород детально описаны в [1–3]. Большая часть массива, размеры которого составляют 3×2 км, сложена породами расслоенной серии, представленными биотитовыми пироксенитами, шонкинитами и сиенитами с линзами карбонатитов (рис. 1). Он прорывает позднеархейские тоналит-трондьемитовые ортогнейсы олекминского комплекса с возрастом 3.0–3.2 млрд лет [4]. Для сиенитов этого массива получена оценка возраста 2719 ± 14 млн лет (U–Pb-метод по циркону (ID-TIMS) [1]). По данным [5], породы массива метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации. Возраст этого метаморфического события находится в интервале 1891–1899 млн лет (U–Th–Pb метод по циркону (SIMS) [5]).

¹Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

²Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского
отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: stifeeva.maria@yandex.ru

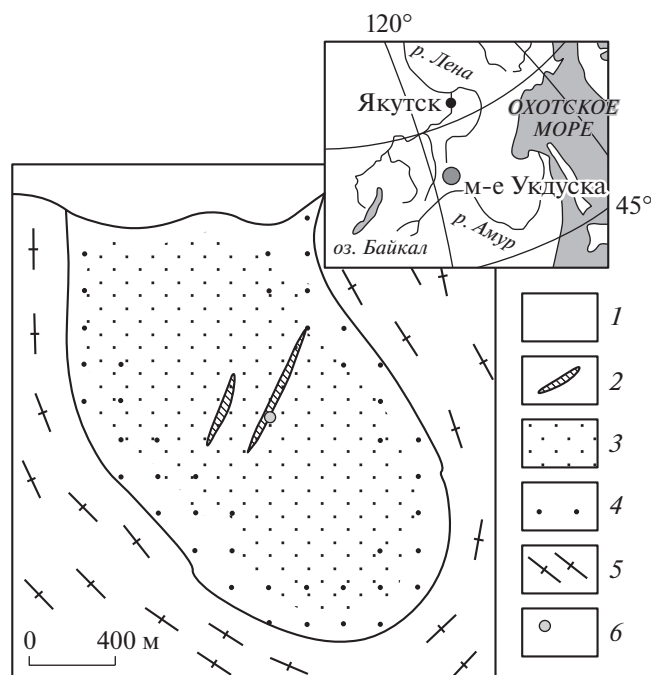


Рис. 1. Схема геологического строения массива Укдуска. 1 – аллювиальные четвертичные отложения; 2 – дайки ритмично чередующихся пироксеновых сиенитов и карбонатитов; 3 – апатит-биотитовые пироксениты и их амфиболизированные разности с малоомощными “прослоями” и линзами сиенитов, шонкинитов; 4 – щелочно-полевошпатовые сиениты, шонкиниты и их метаморфизованные разности с “прослоями” и линзами пироксенов; 5 – биотит-амфиболовые плагиогнейсы олекминского комплекса; 6 – место отбора проб ХН-205 и ХН-206.

В пределах массива Укдуска закартированы многочисленные дайки и жильные тела шонкинитов, меласиенитов, лейкосиенитов, гранитов, оливиновых лампроитов и карбонатитов [6]. В качестве объекта для геохронологических исследований выбрана “комбинированная” дайка, сложенная ритмично чередующимися тонкими “зонами” пироксеновых сиенитов и карбонатитов. Она пересекает биотитовые пироксениты рассматриваемого массива, а слагающие ее породы не обнаруживают каких-либо признаков наложенных структурно-метаморфических преобразований. Главными минералами карбонатитов являются кальцит, апатит, пироксен и гранат; акцессорные минералы представлены цирконом и монацитом [2].

Отбор микроаналитов граната для U–Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований осуществлялся вручную с визуальным контролем однородности выбранных фрагментов кристаллов граната. Предварительная подготовка микроаналитов граната для геохронологических исследований, разложение проб и последующее химическое выделение Pb и U осуществлялись в соответствии с

методиками, описанными в [7]. Определение изотопного состава Pb и U в гранате выполнено на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом или динамическом режимах (при помощи счетчика ионов). Точность определения U/Pb отношений и содержаний U и Pb составила 0.5%. Холостое загрязнение не превышало 10 пг для Pb и 1 пг для U. Обработка экспериментальных данных осуществлялась в программах “Pb-Dat” [8] и “ISOPLOT” [9]. При расчете возрастов использованы общепринятые значения констант распада урана [10]. Поправки на обычный Pb введены в соответствии с модельными величинами [11]. Все ошибки приведены на уровне 2σ .

Выделение циркона проводилось по стандартной методике с использованием тяжелых жидкостей. U–Th–Pb (LA–ICP–MS) “скрининговые” геохронологические исследования циркона выполнены с помощью системы лазерной абляции NWR-213 с камерой TwoVolumeTwo, совмещенной с ICP масс-спектрометром ELEMENT XR, по методике, описанной в [12]. Диаметр пучка лазера составлял 25 мкм, длительность измерения – 100 с (40 с – холостой по газу, 60 с – абляция). Калибровка производилась по стандартному циркону GJ-1 [13]. Для контроля качества аналитических данных использованы стандартные цирконы Harvard 91500 и Plešovice. Для них в ходе исследований были получены конкордантный возраст 1068 ± 11 (2 σ , $n = 9$, СКВО = 0.042, вероятность = 0.84), средневзвешенное значение возраста по $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 1069 ± 15 млн лет (2 σ , $n = 9$, СКВО = 0.30, вероятность = 0.96), по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 1067 ± 17 млн лет (2 σ , $n = 9$, СКВО = 0.00116, вероятность = 1) и средневзвешенное значение возраста по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 337 ± 4 млн лет (2 σ , $n = 9$, СКВО = 0.054, вероятность = 1) соответственно. Полученные для стандартных цирконов значения возраста хорошо совпадают с рекомендованными данными (Harvard 91500: $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ – 1066.01 ± 0.61 млн лет, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – 1063.51 ± 0.39 млн лет; Plešovice: $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – 337 ± 2 млн лет) [14]. U–Th–Pb изотопные отношения рассчитаны в программе GLITTER 4.0 GEMOC [15]. Поправки на обычный свинец вводились с помощью программы ComPb [16]. Расчет конкордантных возрастов производился в программе “ISOPLOT” [9]. При построении гистограмм, кривых относительной вероятности и расчете максимумов возрастов (PeakAges) [17] принимались во внимание только конкордантные оценки возраста.

Гранат из дайки карбонатитов массива Укдуска представлен зернами желто-коричневого цвета. Его состав соответствует ряду андрадит (67–95%)-гроссуляр (1–20%) с примесью титана (до 2 вес. % TiO_2) и марганца (до 1.7 вес. % MnO_2). Отмечается присутствие твердофазных карбонат-

Таблица 1. Результаты U–Pb изотопных исследований граната (проба ХН-205)

№	Навеска, мг	Pb, мкг/г	U, мкг/г	Pbc/Pbt	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	1.21	1.54	4.21	0.09	361.4	0.1125 ± 1	0.1120 ± 1	4.7699 ± 255	0.3076 ± 16	0.98	1780 ± 9	1729 ± 9	1840 ± 2
2	0.87	1.82	4.37	0.13	258.2	0.1148 ± 2	0.0337 ± 1	5.2860 ± 138	0.3338 ± 5	0.71	1867 ± 5	1857 ± 3	1877 ± 3
3	0.91	2.21	5.47	0.13	280.0	0.1143 ± 2	0.0211 ± 1	5.2058 ± 179	0.3303 ± 9	0.85	1854 ± 6	1840 ± 5	1869 ± 3

Примечание. Изотопные отношения, скорректированные на бланк, и обычный Pb; Rho – коэффициент корреляции ошибок $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$; Pbc – обычный Pb; Pbt – общий Pb. Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам после запятой.

ных, а также водно-солевых включений, расположенных преимущественно по зонам роста.

Геохронологические U–Pb (ID-TIMS) исследования проведены для трех микронавесок граната (табл. 1). Содержание урана в гранате изменяется в пределах 4.21–5.47 мкг/г, доля обыкновенного свинца не превышает 13%. Как видно на рис. 2, на диаграмме с конкордией точки изотопного состава граната располагаются на дискордии, верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 1881 ± 8 млн лет (СКВО = 0.70).

Циркон, выделенный из карбонатита, представлен субидиморфными кристаллами призматического габитуса. Скульптура граней некоторых кристаллов характеризуется блочным строением. Кристаллы циркона, как правило, трещиноваты, непрозрачны, окрашены в темно-вишневый цвет. Их строение характеризуется присутствием

зональных ядер коричневой окраски, имеющих низкое двупреломление и пониженную интенсивность люминесценции. Ядра “окружены” оболочками, которые условно можно отнести к двум генерациям. Оболочки первой генерации отличаются светло-розовой окраской, трещиноваты, слабозональны, имеют нормальное двупреломление и высокую интенсивность люминесценции. Оболочки второй генерации имеют темно-вишневый цвет, незональны и характеризуются низкой интенсивностью люминесценции (рис. 3).

U–Th–Pb (LA-ICP-MS) исследования были выполнены для центральных и краевых зон зерен циркона (Приложение 1, табл. 1). Средние значения возраста ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$) ядер составляет 2708 ± 14 млн лет (СКВО = 0.36), оболочек первой генерации – 2645 ± 17 млн лет, и, наконец, оболо-

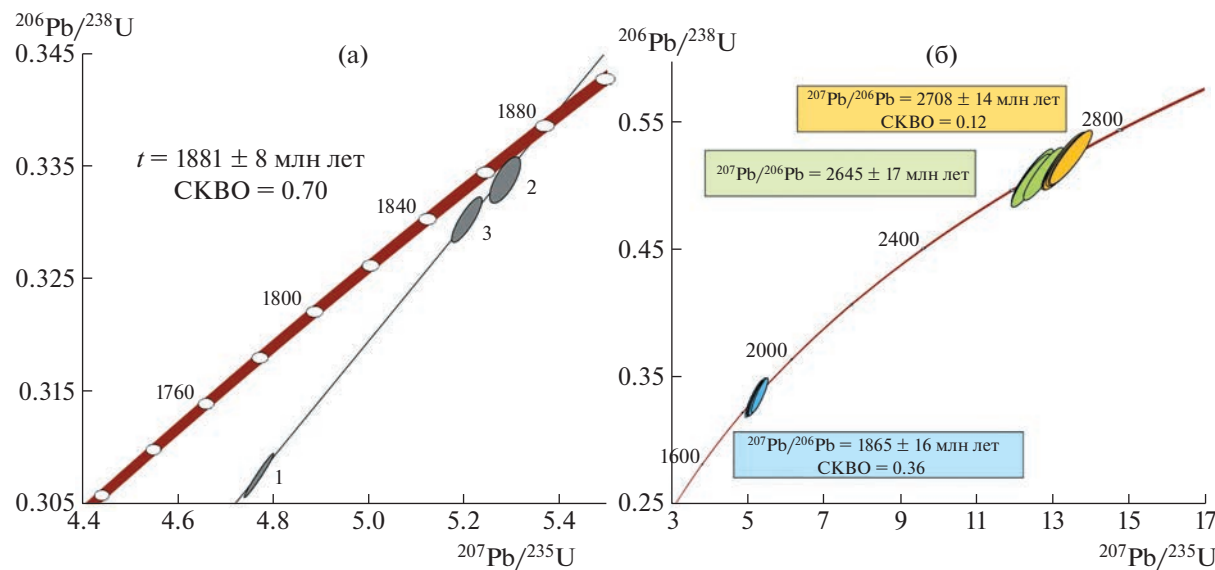


Рис. 2. Диаграммы с конкордией для граната (проба ХН-205) (а) и циркона (проба ХН-206) (б) из жильного карбонатита массива Укдуска. Номера точек (а) соответствуют порядковым номерам в табл. 1.

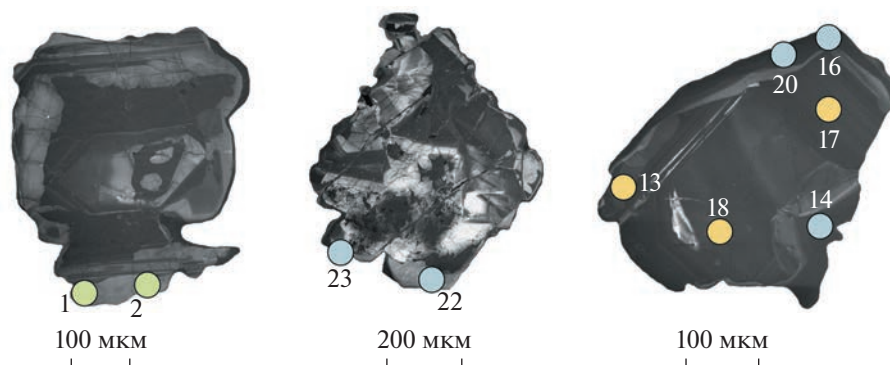


Рис. 3. Микрофотографии циркона из пробы ХН-206, выполненные в режиме катодолуминесценции на сканирующем электронном микроскопе “TESCAN” VEGA3.

чек второй генерации – 1865 ± 16 млн лет (СКВО = 0.36).

Представленные в статье результаты U–Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований граната и U–Th–Pb (LA-ICP–MS) “скрининговых” геохронологических исследований циркона из жильного тела карбонатитов, прорывающего позднеархейские щелочные калиевые породы массива Укдуска, свидетельствуют о том, что они имеют раннепротерозойский возраст – 1881 ± 8 млн лет. Ядра циркона позднеархейского возраста, присутствующего в жильных карбонатитах, очевидно, были захвачены из вмещающих пород, а непосредственно с кристаллизацией карбонатитового расплава связано образование на них оболочек с возрастом 1880–1890 млн лет.

Таким образом, в юго-восточной части Чаро-Олекминского геоблока можно выделить два этапа формирования раннедокембрийских карбонатитов. К первому из них относится образование карбонатитов, связанных с проявлениями позднеархейского щелочного магматизма калиевой и ультракалиевой специализации с возрастом 2719 ± 14 млн лет [1]. Карбонатиты второго этапа образуют дайковые и жильные тела, становление которых произошло в раннем протерозое (1881 ± 8 млн лет). Обращает на себя внимание, что возраст этих карбонатитов совпадает с возрастом карбонатитов Селигдарского месторождения апатита, расположенного в центральной части Алданского щита (1880 ± 13 млн лет, U–Th–Pb метод по циркону (SIMS) [18]. Следует также отметить, что для апатита из рудоносных пироксенитов массива Укдуска получена оценка возраста 1850 ± 20 млн лет (U–Pb метод по апатиту (ID-TIMS) [19]), что, казалось бы, противоречит данным о его позднеархейском возрасте. Однако, как известно, температура закрытия U–Pb системы в апатите находится в диапазоне $450\text{--}500^\circ\text{C}$ [20]. Это позволяет предполагать, что она могла быть “переуравновешена” в ходе проявления более поздних эндогенных процессов, например,

наложенного на щелочные породы массива Укдуска метаморфизма амфиболитовой фации с возрастом 1891–1899 млн лет [5] или еще более поздних термальных процессов, связанных с формированием раннепротерозойских карбонатитов, описанных в настоящей статье.

Электронная версия содержит дополнительные материалы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Геохронологические исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-17-00211), а геологические исследования – в рамках плановых тем ИГХ СО РАН (№ 0284-2021-0008) и ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0003).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Табунс Э.В., Сальникова Е.Б., Коваленко В.И., Ковач В.П., Котов А.Б., Яковлева С.З., Федосеев А.М., Толкачев М.Д., Плоткина Ю.В. Позднеархейский возраст инициального калиевого магматизма Алданского щита (массив Укдуска): результаты U–Pb-датирования единичных зерен циркона // ДАН. 2004. Т. 398. № 1. С. 102–105.
2. Перовская Л.К., Баринаева А.С., Кисляк А.А. и др. Отчет по предварительной разведке месторождения Укдуска Ханинского апатитового района за 1984–1986 г.г. п. Торго. 1987 г.
3. Кушнарев И.П. Генезис Ханинского апатитового месторождения // Известия высших учебных заведений // Геология и разведка. 1988. № 1. С. 66–73.
4. Котов А.Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита: Дис. в виде научного доклада на соискание учен. степени докт. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург, 2003. 79 с.
5. Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smolov A.P. The Aldan shield of Siberia, USSR: The age of its Archean components and evidence for widespread reworking in the Mid-Proterozoic // Precambrian Research. 1992. V. 54. P. 195–209.

6. Владыкин Н.В. Петрология и рудоносность К-щелочных комплексов Монголо-Охотского ареала магматизма: Дис. в виде научного доклада на соискание учен. степени докт. геол.-мин. наук. Иркутск, 1997. 80 с.
7. Стифеева М.В., Сальникова Е.Б., Арзамасцев А.А., Котов А.Б., Гроздев В.Ю. Кальциевые гранаты как источник информации о возрасте щелочно-ультраосновных интрузий Кольской магматической провинции // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 72–84.
8. Ludwig K.R. PbDat for MS–DOS, version 1.21 U.S. Geological Survey Open-File Report 88-542. 1991.
9. Ludwig K.R. Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center Special Publications. 2003.
10. Steiger R.H., Jäger E. Subcommission on geochronology: 865 convention of the use of decay constants in geo- and cosmochemistry // Earth and Planetary Science Letters. 1977. V. 36. P. 359–362.
11. Stacey J.S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // Earth and Planetary Science Letters. 1975. V. 26. P. 207–221.
12. Ковач В.П., Котов А.Б., Гладкобуб Д.П., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н., Загорная Н.Ю., Плоткина Ю.В. Возраст и источники метапесчаников Чинейской подсерии Удоканской серии (Алданский щит): результаты геохронологических (LA–ICP–MS) и изотопных U–Th–Pb– и Nd-исследований // ДАН. 2018. Т. 482. № 2. С. 1138–1141.
13. Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology // Chemical Geology. 2004. V. 211. P. 47–69.
14. Horstwood M.S.A., Košler J., Gehrels G., Jackson S.E., McLean N.M., Paton Ch., Pearson N.J., Sircombe K., Sylvester P., Vermeesch P., Bowring J.F., Condon D.J., Schoene B. Community-Derived Standards for LA–ICP–MS U–(Th–)Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting // Geostandards and Geoanalytical Research. 2016. V. 40. P. 311–332.
15. Van Achterbergh E., Ryan C.G., Jackson S.E., Griffin W.L. LA–ICP–MS in the Earth sciences – appendix 3, data reduction software for LA–ICP–MS // In: Sylvester P.J. (Ed.), Short Course Volume 29. Mineralogical Association of Canada, St. John's. 2001. P. 239–243.
16. Anderson T. Correction of common lead in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb // Chemical Geology. 2002. V. 192. P. 59–79.
17. Gehrels G.E. Detrital zircon U–Pb geochronology: current methods and new opportunities. / In: Busby, C., Azor, A. (Eds.), Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. Wiley-Blackwell. Chichester, UK. 2012. P. 47–62.
18. Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Sergeev S.A., Ernst R.E., Ponomarev J.D., Redina A.A., Chebotarev D.A., Nikolenko A.M., Dulisev V.F., Moroz T.N., Minakov A.V. Petrography, mineralogy and SIMS U–Pb geochronology of 1.9–1.8 Ga carbonatites and associated alkaline rocks of the Central-Aldan magnesiocarbonatite province (South Yakutia, Russia) // Mineralogy and Petrology. 2019. V. 113. P. 329–352.
19. Неймарк Л.А., Искандерова А.Д., Тимашков А.Н., Миронюк Е.П. Новые данные о возрасте пород и руд Ханинского апатитовоносного района // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 279. № 3. С. 713–717.
20. Schoene B., Bowring S. Determining accurate temperature-time paths from U–Pb thermochronology: An example from the Kaapvaal craton, southern Africa // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2007. 71 (1): 165–185.

AGE OF THE FORMATION OF EARLY PRECAMBRIAN CARBONATITES IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE CHARO-OLEKMINSKY GEOBLOCK, ALDAN SHIELD

**M. V. Stifeeva^{a, #}, N. V. Vladyskin^b, Corresponding Member of the RAS A. B. Kotov^a,
E. B. Salnikova^a, I. A. Sotnikova^b, E. V. Adamskaya^a, V. P. Kovach^a, Y. V. Plotkina^a,
E. V. Tolmacheva^a, and N. V. Alymova^b**

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

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

[#]*E-mail: stifeeva.maria@yandex.ru*

Presents the results of U–Pb geochronological (ID–TIMS) studies of garnet and U–Th–Pb (LA–ICP–MS) “screening” geochronological studies of zircon from pyroxene-carbonate rocks of the Ukduska massif. The U–Pb age of garnets (1881 ± 8 million years) and age of zircon rim (1865 ± 16 million years) indicate the early Proterozoic age of these rocks. The results of geochronological studies allow to identify a new stage of carbonate magmatism within the southeastern part of the Charo-Olekminsky geoblock.

Keywords: carbonatites, Aldan Shield, U–Pb age, LA–ICP–MS method