

GEOCHRONOLOGY OF THE CHADOBETS ALKALINE ULTRAMAFIC CARBONATITE COMPLEX (SIBERIAN CRATON): NEW U-Pb AND Ar-Ar DATA**I.R. Prokopyev** ^{1,2✉}, **A.G. Doroshkevich** ^{1,3}, **A.V. Malyutina**^{1,2}, **A.E. Starikova** ^{1,2},
A.V. Ponomarchuk ¹, **D.V. Semenova** ¹, **S.A. Kovalev** ^{1,2}, **I.A. Savinsky** ²

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

³ Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Buryatian Republic, Russia

ABSTRACT. The Chadobets alkaline ultramafic carbonatite complex is located on the Siberian craton within the southern boundary of the Permian-Triassic plume activity. The dating of xenogenic zircons from the weathering crust of carbonatites of the Chuktukon complex yielded four clusters with ages of 1870–1820, 495–385, 290–210 and 215–162 Ma. The first two clusters correspond to the dates of activity of Paleoproterozoic granitoid magmatism and Paleozoic alkaline-mafic tectono-magmatic activity, widely occurred in the Siberian craton and its southern framing. The age of crystallization of alkaline rocks of the Chadobets complex falls within the interval of 255–240 Ma. Ar-Ar dating of damtjernite and carbonatite minerals of the Chuktukon complex falls within the intervals of 250.5±3.7 and 247.1±5.7 Ma, respectively. The crystallization ages of the mela-aillikites and damtjernites of the Terina complex, according to the Ar-Ar dating, correspond to the intervals of 257.4±3.9, 241.1±3.7, and 240±3.6 Ma. The age interval of 215–162 Ma based on zircons from the carbonatite weathering crust of the Chuktukon complex reflects the geochronology of superimposed processes and indicates the different stages of alteration of igneous rocks of the Chadobets complex. The data obtained on the age of crystallization of alkaline rocks of the Chadobets complex are consistent with the age interval of Siberian plume activity within a large igneous province (LIP).

KEYWORDS: carbonatites; ultramafic lamprophyres; Siberian craton; Siberian plume; large igneous province; LIP; Chadobets complex; Chuktukon deposit; geochronology

FUNDING: Petrographic and geochronological studies were funded by RSF grant 19-77-10004. The geology of the region was studied under a government contract to executing base projects of IGM SB RAS (0330–2016–0013, 0330–2016–0002). The research activities involved work equipment of CCU "Geodynamics and Geochronology" at the Institute of the Earth's Crust SB RAS.

RESEARCH ARTICLE

Received: April 9, 2021

Revised: May 6, 2021

Accepted: May 12, 2021

Correspondence: Ilya R. Prokopyev, prokop@igm.nsc.ru

FOR CITATION: Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Malyutina A.V., Starikova A.E., Ponomarchuk A.V., Semenova D.V., Kovalev S.A., Savinsky I.A., 2021. Geochronology of the Chadobets alkaline ultramafic carbonatite complex (Siberian craton): new U-Pb and Ar-Ar data. *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (4), 865–882. doi:10.5800/GT-2021-12-4-0559

ГЕОХРОНОЛОГИЯ ЧАДОБЕЦКОГО ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОГО КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА (СИБИРСКИЙ КРАТОН): НОВЫЕ U-Pb И Ar-Ar ДАННЫЕ

И.Р. Прокопьев^{1,2}, А.Г. Дорошкевич^{1,3}, А.В. Малютина^{1,2}, А.Е. Старикова^{1,2},
А.В. Пономарчук¹, Д.В. Семенова¹, С.А. Ковалев^{1,2}, И.А. Савинский²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

³ Геологический институт СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Республика Бурятия, Россия

АННОТАЦИЯ. Чадобецкий щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс расположен на Сибирском кратоне в пределах южной границы активности пермско-триасового плюма. Датирование ксеногенных цирконов из коры выветривания по карбонатитам Чуктуконского массива установило четыре кластера возрастов: 1870–1820, 495–385, 290–210 и 215–162 млн лет. Первые два кластера захваченных возрастов соответствуют датировкам проявления палеопротерозойского гранитоидного магматизма и палеозойской щелочно-базитовой тектономагматической активности, широко проявленных на Сибирском кратоне и в его южном обрамлении. Время кристаллизации щелочных пород Чадобецкого комплекса ложится в интервал 255–240 млн лет. Ar-Ar датирование минералов дамтьернитов и карбонатитов Чуктуконского массива установило интервалы 250.5 ± 3.7 и 247.1 ± 5.7 млн лет соответственно. Время кристаллизации мела-айлликитов и дамтьернитов Теринского массива по данным Ar-Ag датирования отвечает интервалам 257.4 ± 3.9 , 241.1 ± 3.7 и 240 ± 3.6 млн лет. Возрастной интервал 215–162 млн лет по цирконам из коры выветривания по карбонатитам Чуктуконского массива отражает геохронологию наложенных процессов и фиксирует различные стадии преобразования магматических пород Чадобецкого комплекса. Полученные данные о возрасте кристаллизации щелочных пород Чадобецкого комплекса согласуются с возрастным интервалом деятельности Сибирского плюма в пределах крупной изверженной провинции (LIP).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карбонатиты; ультраосновные лампрофиры; Сибирский кратон; Сибирский плюм; крупная изверженная провинция; LIP; Чадобецкий комплекс; Чуктуконское месторождение; геохронология

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Петрографические и геохронологические исследования выполнены за счет средств гранта РФФ № 19-77-10004. Геология района изучена в рамках государственного задания по базовым проектам НИР ИГМ СО РАН (№ 0330–2016–0013, 0330–2016–0002). В работе задействовались оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Чадобецкий щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс расположен в юго-западной части Сибирского кратона, в пределах южной окраины Сибирского суперплюма (рис. 1, а). В административном плане комплекс находится на территории Богучанского муниципального района Красноярского края. История изучения данного района связана в первую очередь с геолого-съёмочными и поисковыми работами на алмазы, бокситы, а также с поисками и разведкой редкоземельно-ниобиевых руд Чуктуконского месторождения. Открытие Чуктуконского месторождения в коре выветривания по карбонатитам Чадобецкого комплекса состоялось в 1956–1960 гг. [Makhneva et al., 2016]. Интерес к месторождению редкоземельно-ниобиевых руд периодически возобновлялся в 1967–1997 гг., и только после оценки принципиальной возможности обогащения руд в 1997–2000 гг. геологическое изучение и доразведка Чуктуконского месторождения активизировались в сравнительно быстром темпе.

История открытия и геологического изучения Чуктуконского месторождения связана с именами таких

геологов, как М.Н. Благовещенская, А.Е. Каспарова, С.Р. Майзилис, Ю.И. Камышев, Е.П. Ширай, Н.Н. Дашкевич, Г.С. Стародубов, Е.К. Германов, А.К. Ахметшина, В.А. Ахметшин, Р.Я. Скляр, К.Ш. Яржаев, А.А. Фролов, Ю.А. Багдасаров, М.А. Амосов, Г.В. Леонов, О.В. Зонина, В.А. Зонов, В.С. Власов, Ю.Д. Сорокин, А.В. Лапин, В.В. Плошко, Л.Г. Анучин, В.И. Кузьмин, В.Г. Ломаев, Е.П. Чижова, А.С. Варганов и многих других. Современные исследования петрологии щелочных пород Чадобецкого комплекса освещены в работах: [Lapin, Lisitsin, 2004; Lomaev, Serdyuk, 2011; Kargin et al., 2017; Chebotarev et al., 2017b; Nosova et al., 2018, 2020; Prokopyev et al., 2020; Doroshkevich et al., 2019, 2021; Starikova et al., 2021; Nugumanova et al., 2021; и др.].

Согласно последним петрологическим исследованиям, Чадобецкий комплекс состоит из трех основных фаз внедрения ультраосновных лампрофиров (айлликитов, мела-айлликитов и дамтьернитов) и карбонатитов [Nosova et al., 2018, 2020; Doroshkevich et al., 2019, 2021; Prokopyev et al., 2020] (рис. 1). По ранним данным K-Ar датирования пород возраст кристаллизации щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов Чадобецкого

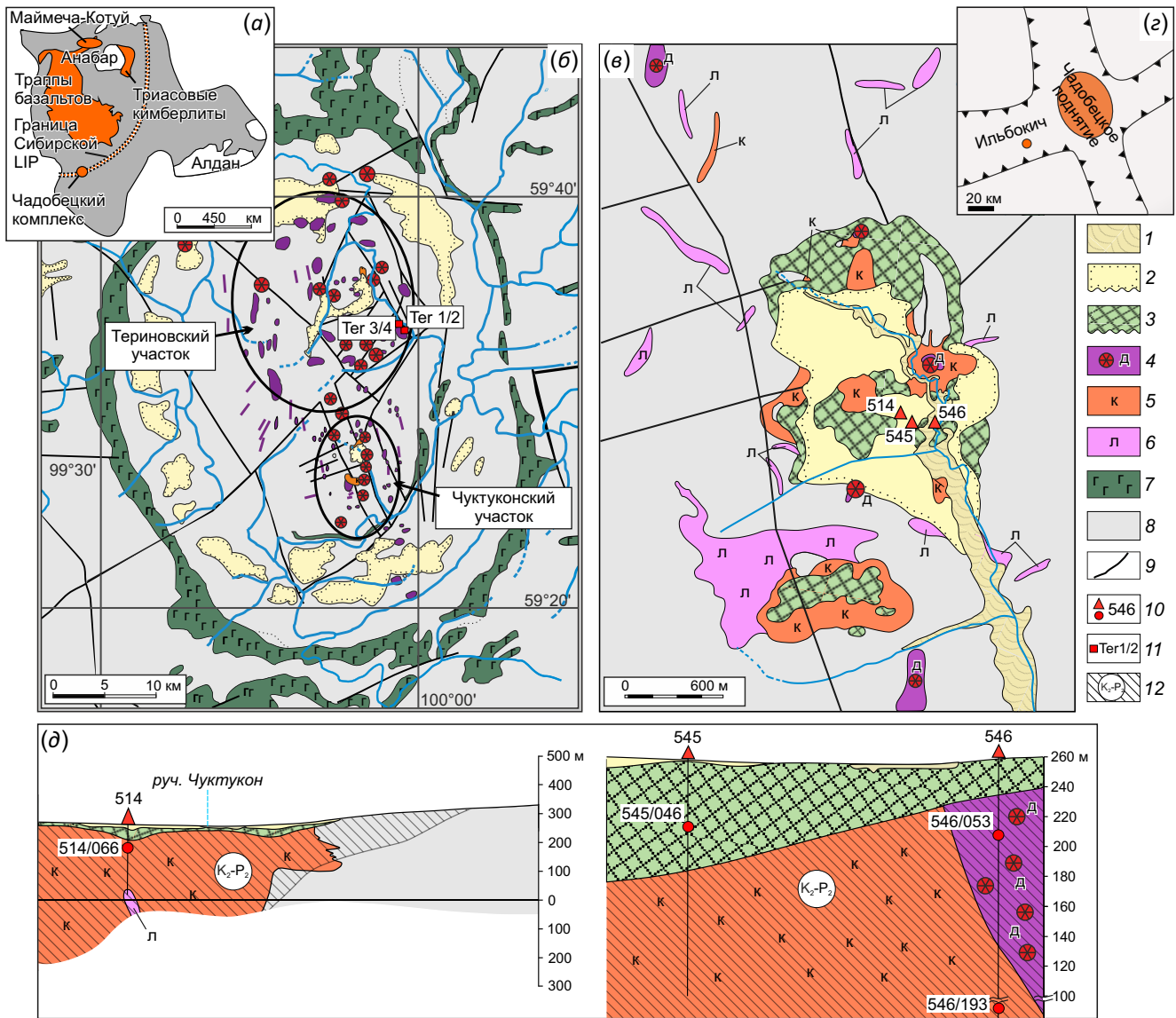


Рис. 1. Геологическое строение Чадобецкого щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса. (а) – расположение Чадобецкого комплекса в пределах Сибирской крупной изверженной провинции (LIP) на Сибирском кратоне (по [Pernet-Fisher et al., 2015]); (б) – геологическая схема Чадобецкого щелочного комплекса (по [State Geological Map..., 2012; Doroshkevich et al., 2019]); (в) – геологическая схема Чуктуконского рудного поля [Makhneva et al., 2016]; (г) – расположение девонского ультраосновного щелочного комплекса Ильбокич (по [Doroshkevich et al., 2019]); (д) – геологические схемы разрезов и расположения скважин с местами отбора геохронологических проб [Makhneva et al., 2016]. 1 – четвертичные отложения. 2 – олигоцен – миоцен. 3 – верхний мел – эоцен. 4–6 – Чадобецкий щелочной комплекс: 4 – третья фаза (в т.ч. вне масштаба). Трубки взрыва (диатремы), дайки, жилы. Кимберлитоподобные тела, брекчии ультраосновных щелочных лампрофиров (дамтьернитов); 5 – вторая фаза. Пластовые тела, дайки, штоки. Карбонатиты; 6 – первая фаза. Штоки, дайки, жилы. Ультраосновные щелочные лампрофиров (айлликиты и мела-айлликиты), пикриты, оливковые мелилититы. 7 – траппы базальтов Сибирской платформы. 8 – рифейские отложения. 9 – разломы. 10 – скважины, места отбора геохронологических проб из ядра скважин на глубине. 11 – места отбора геохронологических проб из коренных обнажений. 12 – кора выветривания и ее возраст.

Fig. 1. Geological structure of the Chadobets alkaline-ultramafic carbonatite complex. (а) – location of the Chadobets complex within the Siberian Large Igneous Province (LIP) on the Siberian craton (after [Pernet-Fisher et al., 2015]); (б) – geological scheme of the Chadobets alkaline complex (after [State Geological Map..., 2012; Doroshkevich et al., 2019]); (в) – geological scheme of the Chuktukon ore field [Makhneva et al., 2016]; (г) – location of the Devonian Ilbokich ultramafic alkaline complex (after [Doroshkevich et al., 2019]); (д) – geological schemes of cross-sections and locations of exploratory wells with geochronological sampling sites [Makhneva et al., 2016]. 1 – Quaternary deposits. 2 – Oligocene – Miocene. 3 – Upper Cretaceous – Eocene. 4–6 – Chadobets alkaline complex: 4 – third phase (including off-scale). Explosion tubes (diatremes), dikes, and veins. Kimberlite-like bodies, breccias of ultramafic alkaline lamprophyres (damtjernites); 5 – second phase. Reservoir bodies, dikes, stocks. Carbonatites; 6 – first phase. Stocks, dikes, veins. Ultramafic alkaline lamprophyres (aillikites and mela-aillikites), picrites, olivine melilitites. 7 – traps of basalts of the Siberian platform. 8 – Riphean deposits. 9 – faults. 10 – wells, deep well-core geochronological sampling sites. 11 – outcrop geochronological sampling sites. 12 – weathering crust and its age.

комплекса варьируется от 299 до 183 млн лет: для ультраосновных пород первой фазы возраст интервал составляет 299–252 млн лет; значения, полученные для карбонатитов, отвечают диапазону 260–183 млн лет, а возраст щелочных пород третьей фазы составляет 220–219 млн лет [Makhneva et al., 2016].

Современные геохронологические методы показали, что перовскит из ультраосновных лампрофиров первой фазы внедрения Чуктуконского комплекса имеет возраст 252 ± 12 млн лет (U-Pb, SHRIMP II [Chebotarev et al., 2017a]); датирование циркона из дамтърнитов установило возраст кристаллизации пород 256.7 ± 1.1 млн лет (U-Pb [Doroshkevich et al., 2021]). Данные Ar-Ar (флогопит) и Rb-Sr датирования щелочных пород Чадобецкого комплекса показали, что возраст образования айллицитов составляет соответственно 243.4 ± 3.1 и 241 ± 1 млн лет [Nosova et al., 2020]. Кроме того, получены значения Ar-Ar возраста 231 ± 2.7 млн лет по риппиту, одному из основных Nb-минералов Чуктуконского массива, и возраст интервал 102.6 ± 2.9 млн лет по монациту (U-Pb, SHRIMP II) из коры выветривания по карбонатитам [Chebotarev et al., 2017b].

Имеющиеся петрологические данные указывают на связь процессов формирования Чадобецкого щелочного комплекса с деятельностью Сибирского суперплюма [Doroshkevich et al., 2019, 2021; Nosova et al., 2020]. Время кристаллизации пород Чадобецкого комплекса соотносится с возрастом формирования крупной изверженной провинции (LIP) в пределах Сибирской платформы. Так, оно близко возрасту проявления траппового магматизма [Basu et al., 1995], внедрения ультраосновных щелочных пород и карбонатитов Маймечка-Котуйской провинции [Dalrymple et al., 1995; Kogarko, Zartman, 2011; Malich et al., 2015; Ghobadi et al., 2018], внедрения посттрапповых кимберлитов Анабарского и Оленекского районов [Sun et al., 2014; Carlson et al., 2006], а также схоже со временем кристаллизации других щелочных пород и лампрофиров Сибирской платформы [Vrublevskii et al., 2005; Letnikova et al., 2014].

В данной работе представлены новые геохронологические данные U-Pb (циркон) и Ar-Ar (биотит, порода) датирования щелочных пород Чадобецкого комплекса, подтверждающие возрастную корреляцию с проявлением Сибирской LIP, а также отражающие временные метки истории предшествующих крупных событий и наложенных полистадийных процессов, участвующих в формировании рудоносного щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса в пределах Сибирского кратона.

2. ГЕОЛОГИЯ РАЙОНА

Геологическая характеристика района распространения щелочных пород Чадобецкого комплекса описана в работах [Dashkevich et al., 1962; Sklyarov, 1962; Geological Map..., 1971, 1984; Bagdasarov et al., 1972; Slukin, 1973; Lapin, 1997, 2001; Tsykina, 2003; State Geological

Map..., 2012; Kargin et al., 2017; Chebotarev et al., 2017a; Nosova et al., 2018, 2020; Prokopyev et al., 2020; Doroshkevich et al., 2019, 2021]. В данном разделе приведена краткая геологическая информация о Чадобецком магматическом комплексе, включающая обобщение предыдущих исследований в контексте современных петрологических данных.

Чадобецкий щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс приурочен к Чадобецкому поднятию, которое имеет в плане эллипсовидную форму с размерами приблизительно 45×35 км, вытянутую в северо-северо-западном направлении (рис. 1, б). Чадобецкое поднятие находится на пересечении двух неопротерозойских грабенов (рис. 1, г), которые расположены в пределах Ангаро-Котуйской рифтогенной системы [Starosel'tsev, 2009; State Geological Map..., 2012]. Образование Чадобецкого поднятия связано с формированием куполовидной (диапировой) структуры, а геофизические данные показывают наличие промежуточного палеомагматического очага на глубине порядка 4–8 км [State Geological Map..., 2012].

Чадобецкий магматический комплекс состоит из интрузий щелочных пород, локализованных в пределах двух основных выступов Чадобецкого поднятия – северного Териновского участка (или массива) и южного Чуктуконского участка, в пределах которого расположено Чуктуконское редкоземельно-ниобиевое месторождение (рис. 1, б, в). В составе Чадобецкого щелочного комплекса установлены три главные фазы внедрения, определенные по данным геологического изучения, и в основном по результатам бурения Чуктуконской рудной площади (рис. 1, в). Первая фаза Чадобецкого комплекса представлена ультраосновными лампрофирами – айлликитами и мела-айлликитами согласно классификации [Tappe et al., 2005]. Кроме лампрофиров, в первой фазе предшествующими исследователями описывались тела пикритов и оливиновых мелилититов [Sklyarov, 1962; Geological Map..., 1971, 1984; State Geological Map..., 2012]. По данным исследователей, породы этой фазы образуют практически непрерывный по вертикали силлово-жильный комплекс вокруг Териновского и Чуктуконского выступов. Мощность силлов и дайковых тел обычно не превышает нескольких десятков метров. В центральных частях купольных структур щелочно-ультраосновные породы в основном слагают интрузии штокообразной и неправильной формы с размерами от 50×80 до 1300×1500 м (рис. 1, а, б)

Вторая фаза внедрения Чадобецкого комплекса представлена интрузиями карбонатитов (рис. 1, в, д). Карбонатиты образуют штокообразные тела в ядрах купольных структур с размерами в плане 100×150 и 200×250 м на Териновском участке и 2.3×1.4 и 1.9×0.9 км – на Чуктуконском выступе, тела неправильной формы, а также дайки и жилы мощностью первые метры – первые сотни метров, секущие ультраосновные породы первой фазы [Sklyarov, 1962; Geological Map..., 1971, 1984; State Geological Map..., 2012; Makhneva et al., 2016].

Выходы карбонатитовых тел локализованы преимущественно на Чуктуконском выступе, в пределах которого кора выветривания по карбонатитам образует Чуктуконское месторождение редкоземельно-ниобиевых руд (рис. 1, в).

Третья фаза Чадобецкого комплекса была описана предшественниками в качестве кимберлитов [Sklyarov, 1962; Geological Map..., 1971, 1984; Lapin, 2001; State Geological Map..., 2012]. Современные петрологические исследования кимберлитоподобных тел показали, что породы представлены ультраосновными лампрофирами – дамтьернитами согласно классификации [Tappe et al., 2005]. Щелочные породы образуют трубки взрыва и жильные тела. Диатремы имеют вариации размеров в плане от 30 до 700 м [State Geological Map..., 2012]. Тела расположены вдоль центральной части Чадобецкого поднятия с севера на юг, а также группируются в ядрах Териновского и Чуктуконского выступов [Geological Map..., 1971, 1984; State Geological Map..., 2012]. Жильные тела третьей фазы установлены в северной части Териновского выступа. Мощность таких тел составляет до первых десятков метров. Наличие ксенолитов всех разновидностей пород первой и второй фаз в трубках взрыва позволяет однозначно отнести их к третьей фазе становления Чадобецкого магматического комплекса [Geological Map..., 1971, 1984; State Geological Map..., 2012].

Большая часть интрузивных образований Чадобецкого комплекса скрыта под рыхлыми четвертичными отложениями или щебнисто-глинистыми и глинистыми бокситоносными корами выветривания, мощность которых по данным бурения составляет от 5 до 60 м, а в пределах Чуктуконского выступа иногда достигает 480 м [Geological Map..., 1971, 1984; State Geological Map..., 2012] (рис. 1, в, д). Внешнее обрамление поднятия представлено полями развития траппов долеритового и габбро-долеритового состава в субгоризонтальных пермокарбонатных терригенных отложениях и пермотриасовых туфах [Geological Map..., 1971; State Geological Map..., 2012]. Вмещающие породы представлены карбонатно-терригенными отложениями среднего рифея – кембрия: глинистыми и алевролитоглинистыми сланцами, песчаниками, известняками и их доломитовыми разновидностями, доломитами, линзами сидеритов, галечниками, алевролитами и прослоями углей (рис. 1, в).

Как отмечалось ранее, Чадобецкий щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс расположен на пересечении рифтовых грабенов Ангаро-Котуйской системы, в пределах которой в 70 км к юго-западу от Чадобецкого поднятия находится девонский комплекс ультраосновных лампрофиров Ильбокич (рис. 1, г). Возраст кристаллизации пород Ильбокичского комплекса составляет 399 ± 4 млн лет (перовскит, U-Pb) [Nosova et al., 2020]. Актуальная информация о петрологии щелочных пород Ильбокичского комплекса изложена в работах [Kargin et al., 2016; Nosova et al., 2018, 2020].

3. ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Для изотопно-геохронологических исследований трех фаз внедрения Чадобецкого магматического комплекса был отобран каменный материал из поисково-разведочных скважин на месторождении Чуктукон, а также из коренных выходов щелочных силикатных пород долины в обнажении р. Терина (Териновский массив).

Для Ar-Ar датирования отобраны монофракции биотита из дамтьернита (обр. 546/053) Чуктуконского участка, мела-айлликита (обр. Тер 3/4) и дамтьернитов (обр. Тер 1/2 и Тер 2) Териновского участка и валовая проба измененного карбонатита (обр. 546/193) Чуктуконского массива (рис. 1, б, в, д). Для U-Pb датирования отобраны цирконы из коры выветривания (обр. 545/046 и 514/066) месторождения Чуктукон (рис. 1, д). Далее приводится краткая минералого-петрографическая характеристика исследуемых образцов из различных фаз внедрения Чадобецкого комплекса.

Ультраосновные лампрофиры первой фазы внедрения представляют собой айлликиты и мела-айлликиты (рис. 2, а, б, в). Породы имеют порфиновую структуру, доля вкрапленников варьируется в пределах 20–50 %. Макрокристы представлены идиоморфными зернами оливина (до 20 %), полностью или частично замещенного серпентином и кальцитом. Вариации #Mg оливинов различаются в пределах зерен, а также отдельных кристаллов, как и их микрокомпонентный состав [Nosova et al., 2018; Prokopyev et al., 2020; Starikova et al., 2021]. Гипидиоморфные лейсты биотита образуют вкрапленники до 15–20 об. % в породе и имеют зональное строение (нередко магнезиальные ядра #Mg 0.78–0.73 обрастают железистой каймой #Mg 0.47–0.12). Состав вкрапленников мела-айлликитов отличается от айлликитов присутствием гипидиоморфных удлинённых зерен клинопироксена – диоксида с эгириновым миналом (до 10 %). Основная масса ультраосновных лампрофиров сложена кальцитом, доломитом и биотитом с подчиненным количеством шпинелидов, ильменита, титаномагнетита, апатита и редких сульфидов (халькопирита, пентландита и др.).

Дамтьерниты третьей фазы внедрения Чадобецкого комплекса имеют порфиновую и/или брекчиевую структуру, отличаются от мела-айлликитов присутствием в основной массе гипидиоморфных зерен калиевого полевого шпата и альбита (до 10 %), нередко содержат в составе пеллетальные лапилли (более 60 %), а также в породе присутствуют обломки вмещающих пород и ксенолиты лампрофиров первой фазы внедрения и карбонатитов, что указывает на сравнительно позднее время кристаллизации дамтьернитов (рис. 2, г, д, е). Пеллетальные лапилли дамтьернитов содержат макрокристы оливина (?), полностью замещенного серпентином и кальцитом, крупные зерна магнетита, биотита и мелкозернистый агрегат хлорита, серпентина, кальцита и кварца; основная масса

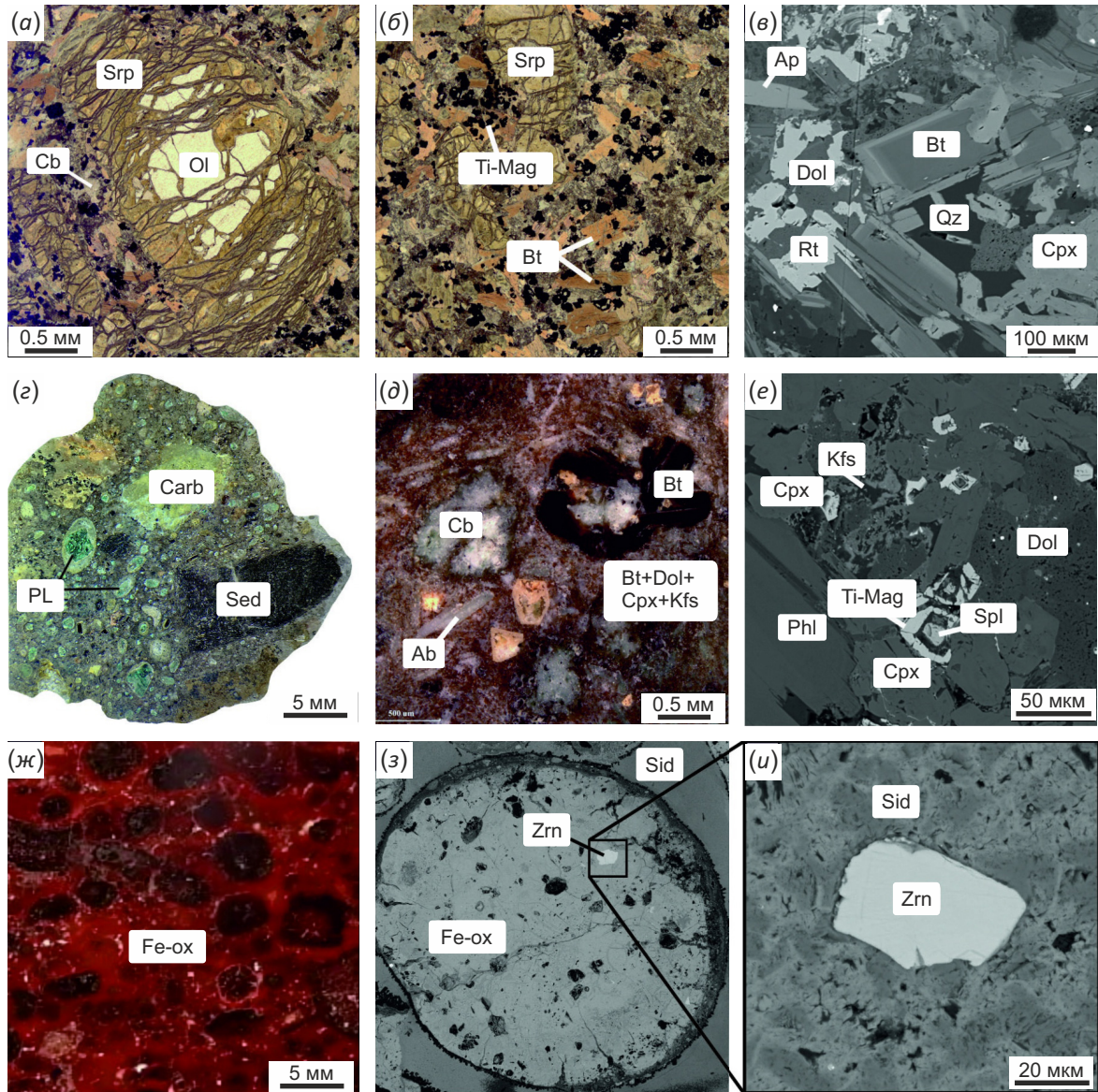


Рис. 2. Минералого-петрографическая характеристика исследуемых образцов Чадобецкого щелочного комплекса. Петрографические фото (а, б) порфировых вкрапленников оливина (Ol), частично замещенного серпентином (Srp) и карбонатом (Cb), в основной массе, сложенной биотитом (Bt), карбонатом и титаномагнетитом (Ti-Mag) в айлликите; СЭМ-фото (в) зональных вкрапленников биотита в основной массе, содержащей кристаллы апатита (Ap), доломита (Dol), рутила (Rt), кварца (Qz) и клинопироксена (Cpx) в мела-айлликите. Фотография образца дамтjernита (г), содержащего порфировые вкрапленники пеллетальных лапиллей (PL), ксенолиты карбонатитов (Carb) и вмещающих пород (Sed); основная масса дамтjernитов содержит биотит, доломит, клинопироксен, калишпат (Kfs) и альбит (Ab) (д), на СЭМ-фото (е) в основной массе дамтjernитов зерна шпинелидов (Spl) с каймой титаномагнетита и вкрапленники флогопита (Phl). Фото образца коры выветривания Чуктуконского рудного поля (ж); на СЭМ-фото образца из коры выветривания по карбонатитам (з, и) прослеживается оолитовая структура, состоящая из округлых вкрапленников оксидов и гидроксидов железа (Fe-ox), расположенных в сидеритовой (Sid) матрице и содержащих кристаллы циркона (Zrn), отобранные для U-Pb датирования.

Fig. 2. Mineralogical and petrographic characteristic of the studied samples of the Chadobets alkaline complex. Petrographic photos (a, b) of macrocrysts of olivine (Ol), partially replaced by serpentine (Srp) and carbonate (Cb), in the groundmass composed of biotite (Bt), carbonate and titanomagnetite (Ti-Mag) of aillikites; SEM photographs (c) of zonal biotite phenocrysts in the groundmass containing crystals of apatite (Ap), dolomite (Dol), rutile (Rt), quartz (Qz), and clinopyroxene (Cpx) of mela-aillikites. Photo of a damtjernite sample (g) containing macrocrysts of pelletal lapillies (PL), xenoliths of carbonatites (Carb) and host rocks (Sed); the groundmass of the damtjernites contains biotite, dolomite, clinopyroxene, potassium feldspar (Kfs), and albite (Ab) (d); the SEM photo (e) shows spinel grains (Spl) with a rim of titanomagnetite and phlogopite (Phl) phenocrysts in the groundmass of the damtjernites. Photo of a sample of the weathering crust of the Chuktukon ore field (ж); The SEM photo of a sample from the carbonatite weathering crust (z, u) shows an oolitic structure consisting of rounded phenocrysts of iron oxides and hydroxides (Fe-ox) located in a siderite (Sid) matrix and containing crystals of zircon (Zrn) sampled for U-Pb dating.

дамтьернитов сложена биотитом, доломитом, клинопироксеном, калишпатом, альбитом, микровкрапленниками Sr-шпинелидов с каймой титаномагнетита, перовскитом и апатитом (рис. 2, д, е).

Рудоносные редкоземельно-ниобиевые карбонаты Чадобецкого комплекса представляют собой мелко- и среднезернистые породы с массивной, пятнистой и полосчатой текстурой. Кальцит является преобладающим минералом основной массы (до 95–98 %). Наиболее распространенными некарбонатными минералами являются тайниолит, фторapatит и фторкальциопироксид [Chebotarev et al., 2017a]. Риппит, флюорит, Nb-рутил, калиевый полевой шпат, эгирин, анкилит-(Ce), стронцианит, сульфиды и циркон являются второстепенными и акцессорными минеральными фазами в карбонатитах. Гидротермальная минерализация представлена баритом, кварцем, гетитом, карбонат-фторapatитом-REE и Ca-REE-фторкарбонатами (паризит-(Ce), синхизит-(Ce)), монацитом-(Ce), гидропироксидом и минералами романешит и голландит. Карбонатиты претерпели сильные гидротермальные изменения и последующее выветривание, в результате чего в измененных карбонатитах и коре выветривания первичные минералы становятся нестабильными, растворяются и разлагаются, формируя вторичные минеральные ассоциации, содержащие Nb-гетит, гематит, сидерит, гидроокислы Mn и Fe: например, первичный фторкальциопироксид замещается вторичными минералами группы пироксидов с высоким содержанием Sr, Pb, LREE и Ba [Chebotarev et al., 2017a]. Образцы из коры выветривания нередко имеют оолитовую структуру, состоящую из оксидов и гидроксидов железа и марганца, расположенных в сидеритовой матрице (рис. 2, ж, з, и).

4. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов выполнены методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой Thermo Scientific Element XR, соединенном с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac), оснащенной двухкамерной ячейкой HelExII. Параметры измерения масс-спектрометра были оптимизированы для получения максимальной интенсивности сигналов Pb и U при минимальном значении $^{254}\text{UO}/^{238}\text{U}$ (менее 2 %) с использованием стандарта NIST SRM612. Все измерения выполнялись по массам ^{202}Hg , $^{204}(\text{Pb}+\text{Hg})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U . Съемка проводилась в режиме E-scan. Детектирование сигналов проводилось в режиме счета (counting) для всех изотопов, кроме ^{206}U , ^{238}U и ^{232}Th (режим triple). Диаметр лазерного луча составлял 35 мкм, частота повторения импульсов 5 Hz и плотность энергии лазерного излучения 3 Дж/см². Данные масс-спектрометрических измерений, в том числе расчет изотопных отношений, обрабатывались с помощью программы «Glitter» [Griffin et al., 2008]. ^{235}U рассчитывался из ^{238}U на основе отношения $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}=137.818$ [Hiess et al., 2012]. Для учета

элементного и изотопного фракционирования U-Pb изотопные отношения нормализованы на соответствующие значения изотопных отношений стандартных цирконов Plesovice [Slama et al., 2008]. Для контроля качества данных использован стандартный циркон GJ-1 [Jackson et al., 2004]. Графики отношения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ с конкордией построены с помощью программы Isoplot [Ludwig, 2003]. В ходе исследований для циркона GJ-1 получен возраст 599 ± 7 , 602 ± 7 млн лет. Данные для стандартов циркона совпадают с оценками возраста, полученными методом ID-TIMS [Jackson et al., 2004]. Католюминесцентные изображения цирконов были получены при съемке на CITL CL Mk5 Optical Cathodoluminescence Microscope Stage, при 20 ± 2 кВ в интервале 250–300 мкА в лаборатории эволюции палеоокеанов и мантийного магматизма НГУ.

Эксперименты по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датированию проводились по мономинеральным фракциям, отбор которых выполнялся вручную под бинокулярной лупой из фракции 0.3–0.1 мм измельченного образца. Облучение проб было проведено в кадмированном канале научного реактора ВВР-К типа в Научно-исследовательском институте ядерной физики (г. Томск). Градиент нейтронного потока за период облучения не превышал 0.5 % в размере образца. В качестве монитора используется стандартный K/Ar образец мусковит MCA-11 (ОСО № 129-88), подготовленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом минерального сырья Министерства геологии СССР (ВИМС) в 1988 г. Для его калибровки в качестве $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ монитора использовались международные стандартные образцы мусковит Bern 4m и биотит LP-6 [Baksi et al., 1996]. По результатам калибровки в качестве возраста мусковита MCA-11 было принято среднее значение, которое составило 311.0 ± 1.5 млн лет [Travin, 2016]. Значение полной постоянной распада ^{40}K , в соответствии с [Steiger, Jager, 1977], принималось равным 5.543×10^{-10} год⁻¹.

Холостой опыт по определению ^{40}Ar (10 мин при 1200 °C) не превышал 5×10^{-10} нсм³. Очистку аргона производили с помощью Ti- и ZrAl-SAES-геттеров. Дополнительная очистка осуществлялась с помощью кварцевого аппендикса, погруженного в жидкий азот. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы «Микромасс» (Англия). Для коррекции на изотопы ^{36}Ar , ^{37}Ar , ^{40}Ar , полученные при облучении Ca, K, использованы следующие коэффициенты: $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})\text{Ca}=0.000891\pm 0.000005$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})\text{Ca}=0.000446\pm 0.000006$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})\text{K}=0.089\pm 0.001$. Особое внимание уделялось контролю фактора изотопной дискриминации с помощью измерения порции очищенного атмосферного аргона. Среднее значение отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ на период измерений составило 295.5 ± 0.5 . Нагревание образца происходило в кварцевом реакторе, помещенном в резистивную печь. Датирование производилось методом ступенчатого прогрева. Контроль температуры осуществлялся посредством хромель-алюмелевой термопары. Точность регулировки температуры составляла ± 1 °C.

Определение возраста Ar-Ar и U-Pb методами было проведено в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования» СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения U-Pb возраста щелочных пород Чадобецкого комплекса были отобраны цирконы из

образцов коры выветривания 545/046 и 514/066 разведочных скважин Чуктуконского рудного поля. В основном цирконы представлены обломками кристаллов размером 50–200 мкм (рис. 3). Результаты U-Pb изотопного датирования, содержания тория, урана и величины Th/U приведены в Прил. 1, табл. 1. Всего проанализировано 29 цирконов по 32 точкам. Согласно

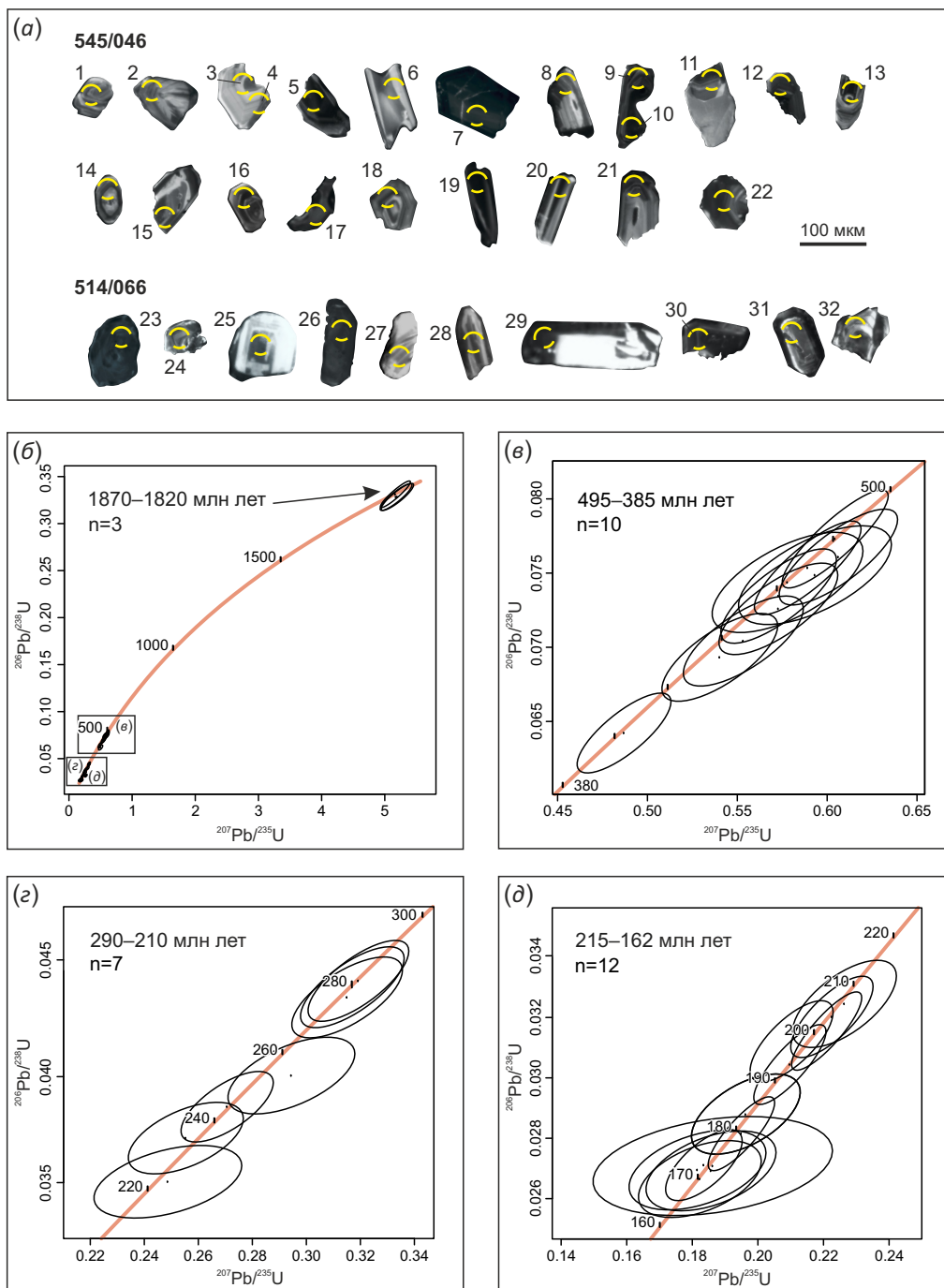


Рис. 3. Результаты U-Pb датирования цирконов из коры выветривания Чуктуконского рудного поля. (a) – катодолуминесцентные изображения цирконов из образцов 545/046 и 514/066; (б–д) – результаты U-Pb датирования исследуемых цирконов по временным интервалам (см. Прил. 1, табл. 1).

Fig. 3. Results of U-Pb dating of zircons from the weathering crust of the Chuktukon ore field. (a) – cathodoluminescent images of zircons from samples 545/046 and 514/066; (б–д) – results of U-Pb dating of the studied zircons on time intervals (see App. 1, Table 1).

полученным данным, наблюдается четыре кластера возрастов со средними значениями $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраста: 1870–1820 (n=3), 495–385 (n=10), 290–210 (n=7) и 215–162 млн лет (n=12) (рис. 3, б, в, г, д).

По результатам $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования для биотита из образца 546/053 дамтьернита Чуктуконского участка получен возрастной спектр, включающий девять ступеней (рис. 4, а; Прил. 1, табл. 2). Пять низкотемпературных ступеней могут быть объединены в возрастное плато, со средневзвешенным возрастом 250.5 ± 3.7 млн лет. Общее количество ^{39}Ar для включенных в плато ступеней составляет 70 % от общего

количества ^{39}Ar , выделенного в ходе измерения образца. Также стоит отметить тенденцию на увеличение возраста у высокотемпературных ступеней (рис. 4, а). Одним из возможных объяснений может быть сложная, многоэтапная эволюция пород массива.

Возрастной спектр валовой пробы измененного карбонатита образца 546/193 из разведочной скважины Чуктуконского рудного поля состоит из пяти ступеней (рис. 4, б; Прил. 1, табл. 2). Однозначное возрастное плато, в силу нарушенного характера возрастного спектра, выделить не получается. Три последние ступени согласуются между собой в пределах погрешности 1σ

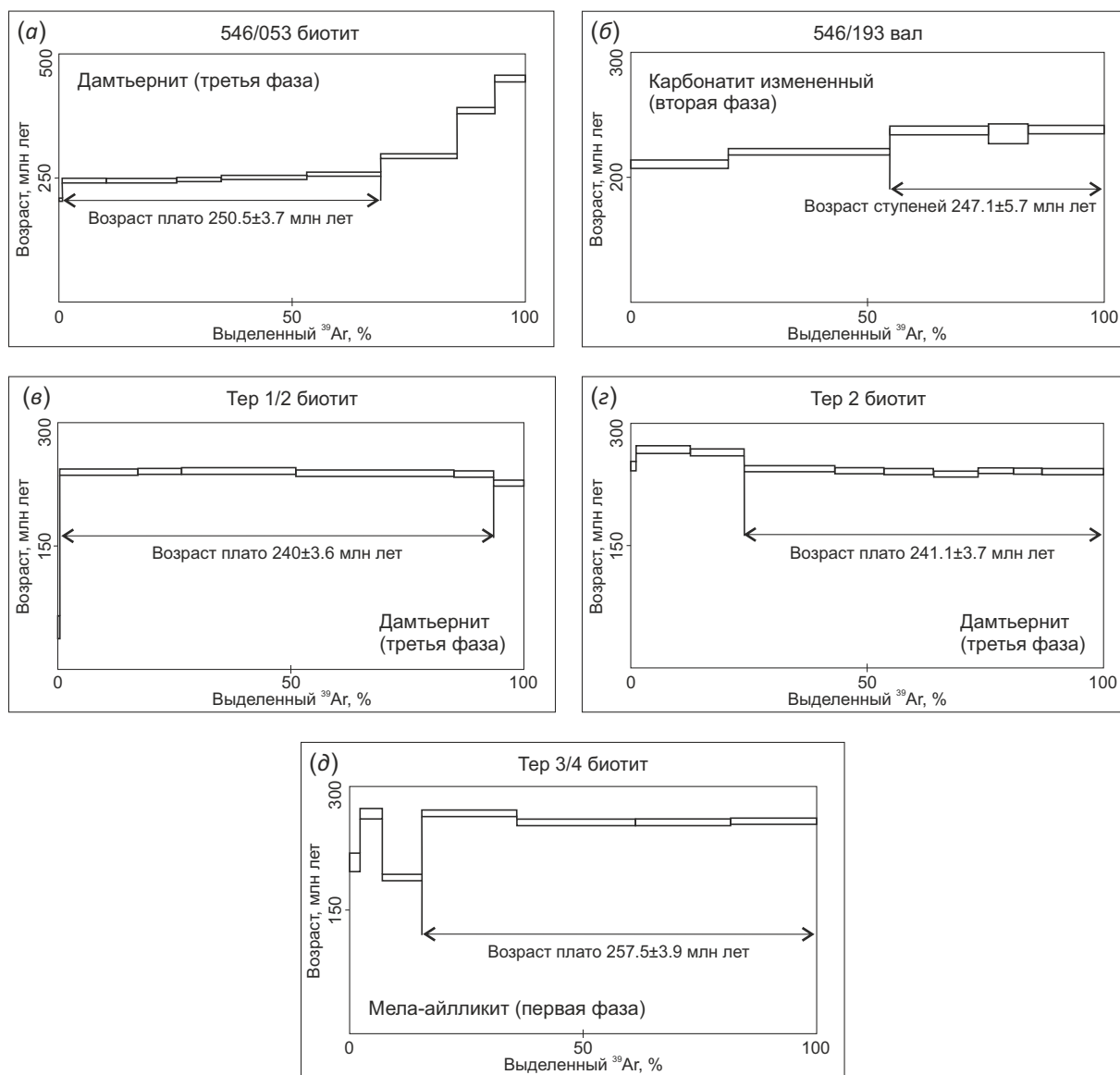


Рис. 4. Результаты Ar-Ar датирования щелочных пород Чадобецкого комплекса. (а) – возрастной спектр биотита дамтьернита 546/053; (б) – спектр по валовой пробе изменённого карбонатита 546/193 Чуктуконского участка; (в, г) – возрастные плато биотитов из дамтьернитов Тер 1/2 и Тер 2 и мела-айллицитов Тер 3/4 (д) Теринского участка. Аналитические данные приведены в Прил. 1, табл. 2.

Fig. 4. Results of Ar-Ar dating of alkaline rocks of the Chadobets complex. (a) – age spectrum of biotite from damtjernite 546/053; (б) – spectrum of the rock sample of altered carbonatite 546/193 of the Chuktukon area; (в, г) – mature plateaus of biotites from Ter 1/2 and Ter 2 and mela-aillikites of the Terina area. Analytical data are given in App.1, Table. 2.

и дают средневзвешенный возраст 247.1 ± 5.7 млн лет. Количество газа, выделенное в рамках этих ступеней, составляет порядка 45 % от общего количества ^{39}Ar .

В результате экспериментов по определению возраста Ar-Ar методом были получены возрастные спектры биотитов дамтьернитов и мела-айлликитов Теринского участка. Спектр образца биотита дамтьернитов Тер 1/2 состоит из семи ступеней (рис. 4, в; Прил. 1, табл. 2). Пять ступеней могут быть объединены в возрастное плато со средневзвешенным возрастом 240 ± 3.6 млн лет, соответствующее более 90 % от выделенного ^{39}Ar .

Образец биотита из дамтьернита Тер 2 демонстрирует возрастную спектр, состоящий из одиннадцати ступеней (рис. 4, г; Прил. 1, табл. 2). Семь средневысокотемпературных ступеней образуют возрастное плато, характеризующееся средневзвешенным возрастом в 241.1 ± 3.7 млн лет. Ступени возрастного плато включают более 75 % от общего количества ^{39}Ar , выделенного в ходе эксперимента.

Биотит Тер 3/4 из мела-айлликитов Теринского участка в результате $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ эксперимента дает возрастную спектр, состоящий из семи ступеней (рис. 4, д; Прил. 1, табл. 2). Четыре высокотемпературные ступени определяют возрастное плато в 257.4 ± 3.9 млн лет. Ступеням, объединенным в возрастное плато, соответствует 70 % выделенного ^{39}Ar .

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Новые данные определения возраста пород Чадобецкого щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса хорошо согласуются с предыдущими результатами датировок, а также несут в себе информацию о предшествующих тектономагматических событиях, широко проявленных на Сибирском кратоне и в его обрамлении. U-Pb исследования показали, что группа захваченных цирконов из коры выветривания Чуктуконского участка имеет конкордантные палеопротерозойские (1870–1820 млн лет), палеозойские (495–385 млн лет) и палеозойские – мезозойские (290–210 и 215–162 млн лет) значения возраста.

Первый интервал (см. рис. 3, б, ~1850 млн лет) отражает возраст постколлизийного гранитоидного магматизма, имеющего широкое распространение на Сибирском кратоне [Donskaya et al., 2005; Poller et al., 2005; Gladkochub et al., 2010a]. Кроме того, в позднем палеопротерозое происходил один из трех основных импульсов внедрения базитов, преимущественно на юге и севере кратона, на фоне постколлизийного растяжения, сменившего предшествующую коллизийно-аккреционную стадию, в ходе которой за счет амальгамации разрозненных террейнов и супертеррейнов Сибирский кратон был сформирован в единую общую структуру [Gladkochub et al., 2010b].

Интерпретация второго интервала значений возраста от 495 до 385 млн лет (см. рис. 3, в) может нести в себе отражение нескольких тектономагматических событий. В промежуток времени от 500 до 460 млн лет

в результате коллизии террейнов Палеоазиатского океана к Сибирскому кратону происходили тектонические события, которые сопровождались метаморфическими и магматическими процессами [Donskaya et al., 2017]. Во-первых, внедрение даек габбро-долеритов в пределах Голоуспенского блока Байкальского выступа фундамента датируется интервалом 494 ± 5 млн лет [Gladkochub et al., 2006, 2010a]. Согласно данным [Doroshkevich et al., 2012, 2017], щелочные силикатные породы Витимской провинции на южном обрамлении Сибирского кратона сформировались в два временных интервала: 520–486 и 306–294 млн лет. При этом формирование раннепалеозойских пород Витима происходило в период аккреционно-коллизийных обстановок в пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса. По данным [Yarmolyuk, Kovalenko, 2003; Kuzmin et al., 2010], в этот период островные дуги, задуговые бассейны и докембрийские террейны с системой океанических островов соединяются друг с другом, образуя сложный террейн. Данная аккреция сопровождалась региональным метаморфизмом и складчатостью, а также формированием крупных гранитных батолитов (500–440 млн лет), расчлененных ультраосновных – основных интрузивных массивов и их эффузивных аналогов (500–470 млн лет), а также щелочных ассоциаций (520–470 млн лет) [Vladimirov et al., 1999; Yarmolyuk, Kovalenko, 2003; Kuzmin et al., 2010]. К последним относятся нефелиновые сиениты и щелочные сиениты Ботогольского и Хушагольского массивов (520–492 млн лет) [Nikiforov, Yarmoluk, 2007], щелочные сиениты Джаргалантского массива (490 млн лет) [Kozakov et al., 2003] и нефелиновые сиениты Тажеранского массива (470–460 млн лет) [Sklyarov et al., 2009; Starikova et al., 2014]. По данным [Kuzmin et al., 2010], интенсивный внутриплитный магматизм проявился в результате активности горячих точек мантии.

Еще одним важным событием, попадающим на рубеж 400 млн лет и, несомненно, связанным с глубинными процессами зарождения айлликитовых расплавов путем мантийного карбонат-флогопитового метасоматоза под Сибирским кратоном [Nosova et al., 2020], является кристаллизация предтраппового девонского щелочного комплекса Ильбокич, расположенного на пересечении рифтовых грабенных Ангари-Котуйской системы в 70 км к юго-западу от проявления Чадобецкого комплекса (см. рис. 1, г). Возраст Ильбокичского массива, как уже отмечалось ранее, составляет 399 ± 4 млн лет [Nosova et al., 2020].

Результаты U-Pb датирования цирконов из коры выветривания карбонатитов показали интервал 290–210 млн лет (см. рис. 3, г); полученные данные Ar-Ar датирования дамтьернита 250.5 ± 3.7 млн лет и карбонатита 247.1 ± 5.7 млн лет Чуктуконского участка, а также мела-айлликита Теринского участка 257.4 ± 3.9 млн лет (рис. 4, а, б, д) согласуются с предыдущими результатами определения U-Pb возраста циркона из дамтьернитов 256.7 ± 1.1 млн лет [Doroshkevich et al., 2021] и перовскита 252 ± 12 млн лет [Chebotarev et al., 2017b].

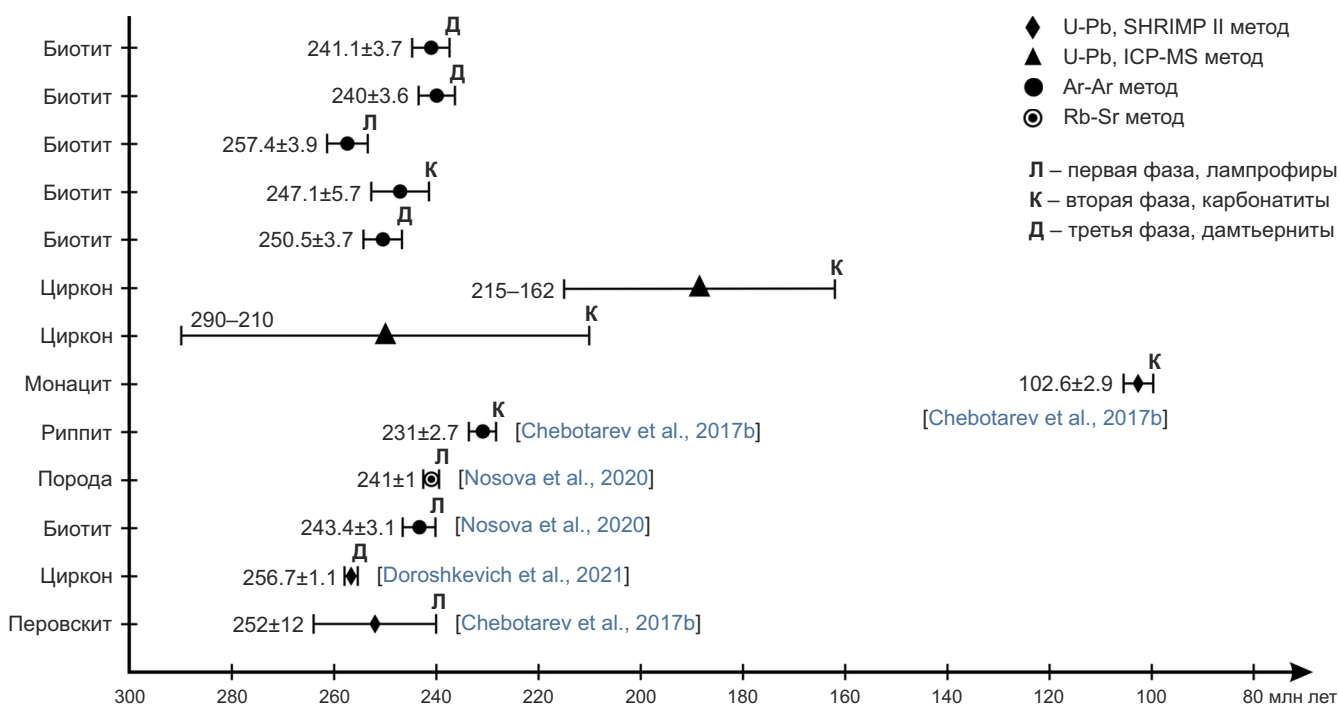


Рис. 5. Геохронология Чадобецкого щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса.

Fig. 5. Geochronology of the Chadobets alkaline ultramafic carbonatite complex.

Чуктуконского массива (рис. 5). С другой стороны, полученные данные Ar-Ag датирования дамтьернитов Теринского участка 240±3.6 и 241.1±3.7 млн лет (см. рис. 4, в, г) согласуются с данными Ar-Ag и Rb-Sr датирования айллицитов Чадобецкого комплекса 243.4±3.1 и 241±1 млн лет соответственно [Nosova et al., 2020] (рис. 5). Разницу в возрастных интервалах можно объяснить следствием использования разных методов датирования с разной температурой закрытия геохронологических систем.

В работах [Lapin, 2001; State Geological Map..., 2012] упоминается наличие ксенолитов базальтов в трубках взрыва (дамтьернитах) в пределах Чадобецкого комплекса, однако возраст внедрения базальтов остается неизвестным. В статьях [Paton et al., 2010; Ivanov et al., 2013] упоминается возрастная интервал 255–250 млн лет для внедрения силлов долеритов, находящийся приблизительно в 100–300 км к западу и югу от Чадобецкого комплекса.

Полученный нами возраст циркона из рудоносной коры выветривания по карбонатитам Чуктуконского участка в интервале 215–162 млн лет (см. рис. 3, д) явно отражает возраст наложенных поздних процессов и фиксирует стадии преобразования (возможно и рудоносные) магматических пород комплекса (рис. 5). Кроме того, полученные ранее значения U-Pb возраста 102.6±2.9 млн лет по монациту из коры выветривания по карбонатитам [Chebotarev et al., 2017b] указывают на влияние наложенных процессов на минералы-хронометры и свидетельствуют о более позднем преобразовании щелочных пород Чадобецкого комплекса (рис. 5).

Стабильность аргоновой системы риппита при различных РТ-параметрах в принципе не изучена. Возможно, что более молодой Ar-Ag возраст (рис. 5) связан с потерей ³⁹Ag минералами-хронометрами, и возраст в таком случае может соответствовать позднему гидротермальному событию в пределах Чадобецкого комплекса. Rb-Sr метод в данном случае является более устойчивым, тем не менее минералы для Rb-Sr датирования необходимо тщательно отбирать и проверять, чтобы оценить последующие изменения вторичными процессами.

Полученные нами новые данные о возрасте кристаллизации пород Чадобецкого щелочного комплекса согласуются с интервалами деятельности Сибирского плюма (см. рис. 1, а) на рубеже перми – триаса и коррелируют с проявлением траппового магматизма [Basu et al., 1995], внедрением ультраосновных щелочных пород и карбонатитов Маймеча-Котуйской провинции [Dalrymple et al., 1995; Kogarko, Zartman, 2011; Malich et al., 2015; Ghobadi et al., 2018], а также внедрением кимберлитов Анабарского и Оленекского районов [Sun et al., 2014; Carlson et al., 2006] и щелочных пород на Сибирском кратоне [Vrublevskii et al., 2005; Letnikova et al., 2014].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Датирование цирконов из коры выветривания карбонатитов Чуктуконского участка показало ксеногенность отобранных цирконов, содержащих четыре кластера возрастов со значениями 1870–1820, 495–385, 290–210 и 215–162 млн лет. Первые два кластера захваченных возрастов соответствуют датировкам

проявления палеопротерозойского постколлизийного гранитоидного магматизма и палеозойской щелочной и базитовой тектономагматической активности, широко проявленных на Сибирском кратоне и в его южном обрамлении. Возраст кристаллизации щелочных пород Чадобецкого комплекса по результатам U-Pb и Ar-Ar датирования составляет интервал ~255–240 млн лет. Полученные Ar-Ar данные по дамтьерниту и карбонатиту Чуктуконского участка отвечают интервалам 250.5±3.7 и 247.1±5.7 млн лет соответственно. Возраст кристаллизации мела-айлликитов и дамтьернитов Теринского участка по данным Ar-Ar датирования составляет интервалы 257.4±3.9, 241.1±3.7 и 240±3.6 млн лет. Возрастной интервал 215–210 млн лет, полученный по цирконам из коры выветривания по карбонатитам Чуктуконского участка, отражает возраст наложенных поздних процессов и фиксирует определенную стадию преобразования магматических пород Чадобецкого комплекса. Полученные данные о возрасте кристаллизации щелочных пород Чадобецкого комплекса согласуются с возрастными интервалами деятельности пермско-триасового плюма на Сибирском кратоне.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Bagdasarov Yu.A., Nechaeva E.A., Frolov A.A., 1972. Chadobets Province of Ultrabasic Rocks and Carbonatites. In: *Geology of Rare Metal Deposits*. Vol. 35. Moscow, p. 176–178 (in Russian) [Багдасаров Ю.А., Нечаева Е.А., Фролов А.А. Чадобецкая провинция ультраосновных пород и карбонатитов // Геология месторождений редких металлов. М., 1972. Вып. 35. С. 176–178].
- Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E., 1996. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating Standards. *Chemical Geology* 129 (3–4), 307–324. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00154-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00154-9).
- Basu A.R., Poreda R.J., Renne P.R., Telchmann F., Vasilev Y.R., Sobolev N.V., Turrin B.D., 1995. High- ^3He Plume Origin and Temporal-Spatial Evolution of the Siberian Flood Basalts. *Science* 269 (5225), 825–882. <https://doi.org/10.1126/science.269.5225.822>.
- Carlson R.W., Czamanske G., Fedorenko V., Ilupin I., 2006. A Comparison of Siberian Meimechites and Kimberlites: Implications for the Source of High-Mg Alkalic Magmas and Flood Basalts. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 7 (11). <https://doi.org/10.1029/2006GC001342>.
- Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Klemd R., Karmenov N.S., 2017a. Evolution of Nb-Mineralization in the Chuktukon Carbonatite Massif, Chadobets Upland (Krasnoyarsk Territory, Russia). *Periodico di Mineralogia* 86 (2), 99–118. <https://doi.org/10.2451/2017PM733>.
- Chebotarev D.A., Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Yudin D.S., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A., 2017b. Geochronology of the Chuktukon Carbonatite Massif, Chadobets Uplift (Krasnoyarsk Territory). *Russian Geology and Geophysics* 58 (10), 1222–1231. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.02.003>.
- Dalrymple G.B., Czamanske G.K., Fedorenko V.A., Simonov O.N., Lanphere M.A., Likhachev A.P., 1995. A Reconnaissance $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronologic Study of Ore-Bearing and Related Rocks, Siberian Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (10), 2071–2083. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00127-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00127-1).
- Dashkevich N.N., Starodubtsev G.S., Germanov E.K., 1962. On Kimberlite Pipes and Chadobets Uplift Structure. In: *Materials on Geology and Minerals of the Krasnoyarsk Region*. Vol. 3. Krasnoyarsk Book Publishing House, Krasnoyarsk, p. 117–130 (in Russian) [Дашкевич Н.Н., Стародубцев Г.С., Германов Е.К. О кимберлитовых трубках и структуре Чадобецкого поднятия // Материалы по геологии и полезным ископаемым Красноярского края. Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1962. Вып. 3. С. 117–130].
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Fedorovsky V.S., Sklyarov E.V., Cho M., Sergeev S.A., Demonerova E.I., Mazukabzov A.M. et al., 2017. Pre-Collisional (>0.5Ga) Complexes of the Olkhon Terrane (Southern Siberia) as an Echo of Events in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research* 42, 243–263. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.016>.
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Kovach V.P., Mazukabzov A.M., 2005. Petrogenesis of Early Proterozoic Postcollisional Granitoids in the Southern Siberian Craton. *Petrology* 13 (3), 229–252.
- Doroshkevich A.G., Chebotarev D.A., Sharygin V.V., Prokopyev I.R., Nikolenko A.M., 2019. Petrology of Alkaline Sillicate Rocks and Carbonatites of the Chuktukon Massif, Chadobets Upland, Russia: Sources, Evolution and Relation to the Triassic Siberian LIP. *Lithos* 332–333, 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.006>.
- Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M., 2012. Alkaline Magmatism of the Vitim Province, West Transbaikalia, Russia: Age, Mineralogical, Geochemical and Isotope (O, C, D, Sr and Nd) Data. *Lithos* 152, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.002>.
- Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Belousova E.A., Izbrodin I.A., Prokopyev I.R., 2021. Zircon from the Chuktukon Alkaline Ultramafic Carbonatite Complex (Chadobets Uplift, Siberian Craton) as Evidence of Source Heterogeneity. *Lithos* 382–383, 105957. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105957>.
- Doroshkevich A.G., Sklyarov E.V., Starikova A.E., Vasilev V., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Posokhov V.F., 2017. Stable Isotope (C, O, H) Characteristics and Genesis of the Tazheran Brucite Marbles and Skarns, Olkhon Region, Russia. *Mineralogy and Petrology* 111, 399–416. <https://doi.org/10.1007/s00710-016-0477-8>.
- Geological Map of the USSR, 1971. Angara-Lena Series. Scale 1:200 000. Sheet O-47-IV. Explanatory Note. Moscow, 96 p. (in Russian) [Геологическая карта СССР. Серия Ангара-Ленская. Масштаб 1:200 000. Лист O-47-IV: Объяснительная записка. М., 1971. 96 с.].
- Geological Map of the USSR, 1984. Scale 1:1 000 000 (New Series). Sheet O-(47), 48 (Ust-Kut). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Leningrad, 172 p. (in Russian) [Геологическая карта СССР. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист O-(47), 48 (Усть-Кут): Объяснительная записка. Л.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1984. С. 172].
- Ghobadi M., Gerdes A., Kogarko L., Hoefler H., Brey G., 2018. In Situ LA-ICPMS Isotopic and Geochronological Studies on

Carbonatites and Phoscorites from the Guli Massif, Maymecha-Kotuy, Polar Siberia. *Geochemistry International* 56, 766–783. <https://doi.org/10.1134/S0016702918080049>.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Ernst R., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Ukhova N.A., 2010a. Phanerozoic Mafic Magmatism in the Southern Siberian Craton: Geodynamic Implications. *Russian Geology and Geophysics* 51 (9), 952–964. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.005>.

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T.D., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V. et al., 2010b. Proterozoic Mafic Magmatism in Siberian Craton: An Overview and Implications for Paleocoastal Reconstruction. *Precambrian Research* 183 (3), 660–668. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.023>.

Gladkochub D.P., Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Ponomarchuk V.A., Stanevich A.M., 2006. Mafic Intrusions in Southwestern Siberia and Implications for a Neoproterozoic Connection with Laurentia. *Precambrian Research* 147 (3–4), 260–278. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.01.018>.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., 2008. GLITTER: Data Reduction Software for Laser Ablation ICPMS. In: P.J. Sylvester (Ed.), *Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences: Current Practices and Outstanding Issues*. Mineralogical Association of Canada Short Course Series. Vol. 40. Vancouver, p. 308–311.

Hiess J., McLean N., Condon D.J., Noble S.R., 2012. $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ Systematics in Terrestrial Uranium-Bearing Minerals. *Science* 335 (6076), 1610–1614. <https://doi.org/10.1126/science.1215507>.

Ivanov A.V., He H., Yan L., Ryabov V.V., Shevko A.Y., Paleskii S.V., Nikolaeva I.V., 2013. Siberian Traps Large Igneous Province: Evidence for Two Flood Basalt Pulses around the Permo-Triassic Boundary and in the Middle Triassic, and Contemporaneous Granitic Magmatism. *Earth-Science Reviews* 122, 58–76. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001>.

Jackson S.E., Griffin W.L., Pearson N.J., Belousova E.A., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology* 211 (1–2), 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>.

Kargin A.V., Golubeva Y.Y., Demonterova E.I., Koval'chuk E.V., 2017. Petrographic-Geochemical Types of Triassic Alkaline Ultramafic Rocks in the Northern Anabar Province, Yakutia, Russia. *Petrology* 25, 535–565. <https://doi.org/10.1134/S0869591117060030>.

Kargin A.V., Nosova A.A., Postnikov A.V., Chugaev A.V., 2016. Devonian Ultramafic Lamprophyre in the Irkineeva-Chadobets Trough in the Southwest of the Siberian Platform: Age, Composition, and Implications for Diamond Potential Prediction. *Geology of Ore Deposits* 58, 383–403. <https://doi.org/10.1134/S1075701516050068>.

Kogarko L.N., Zartman R.E., 2011. New Data on the Age of the Guli Intrusion and Implications for the Relationships between Alkaline Magmatism in the Maymecha-Kotuy Province and the Siberian Superplume: U-Th-Pb Isotopic

Systematics. *Geochemistry International* 49, 439–448. <https://doi.org/10.1134/S0016702911050065>.

Kozakov I.K., Kovach V.P., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Zagornaya N.Yu., 2003. Crust-Forming Processes in the Geologic Development of the Tuva-Mongolia Massif: Sm-Nd Isotopic and Geochemical Data for Granitoids. *Petrology* 11 (5), 444–463.

Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A., 2010. Phanerozoic Hot Spot Traces and Paleogeographic Reconstructions of the Siberian Continent Based on Interaction with the African Large Low Shear Velocity Province. *Earth-Science Reviews* 102 (1–2), 29–59. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.004>.

Lapin A.V., 1997. Structure, Formation Conditions and Ore Content of the Major Types of Carbonatite Weathering Crusts. *National Geology* 11, 15–22 (in Russian) [Лapин A.B. Структура, условия формирования и рудоносность главных типов месторождений кор выветривания карбонатитов // Отечественная геология. 1997. № 11. С. 15–22].

Lapin A.V., 2001. On Kimberlites of the Chadobets Uplift as Related to the Problem of Formation-Metallogenic Analysis of the Platform Alkaline Ultrabasic Magmatites. *National Geology* 4, 30–34 (in Russian) [Лapин A.B. О кимберлитах Чадобецкого поднятия в связи с проблемой формационно-металлогенического анализа платформенных щелочно-ультраосновных магматитов // Отечественная геология. 2001. № 4. С. 30–34].

Lapin A.V., Lisitsin D.V., 2004. Mineralogical Typomorphism of Alkaline Ultrabasic Magmatites of Chadobets Rise. *National Geology* 6, 83–92 (in Russian) [Лapин A.B., Лисицин Д.В. О минералогическом типоморфизме щелочных ультраосновных магматитов Чадобецкого поднятия // Отечественная геология. 2004. № 6. С. 83–92].

Letnikova E.F., Izokh A.E., Nikolenko E.I., Pokhilenko N.P., Shelestov V.O., Hilen Geng, Lobanov S.S., 2014. Late Triassic High-Potassium Trachitic Volcanism of the Northeast of the Siberian Platform: Evidence in the Sedimentary Record. *Doklady Earth Sciences* 459, 1344–1347. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14110221>.

Lomaev V.G., Serdyuk S.S., 2011. Chuktukon Deposit of the Niobium-Rare Earth Ores is the Top Priority Asset for Modernization of the Rare Metal Industry of Russia. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 4 (2), 132–154 (in Russian) [Лoмаев В.Г., Сердюк С.С. Чуктуконское месторождение ниобий-редкоземельных руд – приоритетный объект для модернизации редкометалльной промышленности России // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2011. Т. 2 № 4. С. 132–154].

Ludwig K.R., 2003. ISOPLOT/Ex: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Version 3.00. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 74 p.

Makhneva N.A., Makhneva G.G., Belyakova E.V. et al., 2016. Prospect Evaluation Report on the Chuktukon Ore Deposit (Krasnoyarsk Region). State Contract № 198 of September 9, 2014. Book 1. 210 p. (in Russian) [Махнева Н.А., Махнева Г.Г., Белякова Е.В. и др. Отчет по объекту «Поисковые и оценочные работы на Чуктуконском рудном поле

(Красноярский край). Государственный контракт от 09.09.2014 № 198. 2016. Кн. 1. 210 с.].

Malich K.N., Khiller V.V., Badanina I.Yu., Belousova E.A., 2015. Results of Dating of Thorianite and Baddeleyite from Carbonatites of the Guli Massif, Russia. *Doklady Earth Sciences* 464, 1029–1032. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15100050>.

Nikiforov A.V., Yarmolyuk V.V., 2007. Early Paleozoic Age and Geodynamic Setting of the Botogol and Khushagol Alkaline Massifs in the Central Asian Fold Belt. *Doklady Earth Science* 412, 6–10. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07010023>.

Nosova A.A., Kargin A.V., Sazonova L.V., Dubinina E.O., Chugaev A.V., Lebedeva N.M., Yudin D.S., Larionova Y.O. et al., 2020. Sr-Nd-Pb Isotopic Systematic and Geochronology of Ultramafic Alkaline Magmatism of the Southwestern Margin of the Siberian Craton: Metasomatism of the Subcontinental Lithospheric Mantle Related to Subduction and Plume Events. *Lithos* 364–365, 105509. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105509>.

Nosova A.A., Sazonova L.V., Kargin A.V., Smirnova M.D., Lapin A.V., Shcherbakov V.D., 2018. Olivine in Ultramafic Lamprophyres: Chemistry, Crystallisation and Melt Sources of Siberian Pre- and Post-Trap Aillikites. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 173, 55. <https://doi.org/10.1007/s00410-018-1480-3>.

Nugumanova Ya., Doroshkevich A., Prokopyev I., Starikova A., 2021. Compositional Variations of Spinels from Ultramafic Lamprophyres of the Chadobets Complex (Siberian Craton, Russia). *Minerals* 11 (5), 456. <https://doi.org/10.3390/min11050456>.

Paton M.T., Ivanov A.V., Fiorentini M.L., McNaughton M.J., Mudrovska I., Reznitskii L.Z., Demonterova E.I., 2010. Late Permian and Early Triassic Magmatic Pulses in the Angara-Taseeva Syncline, Southern Siberian Traps and Their Possible Influence on the Environment. *Russian Geology and Geophysics* 51 (9), 1012–1020. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.009>.

Pernet-Fisher J.F., Howarth G.H., Pearson D.G., Woodland S., Barry P.H., Pokhilenko N.P., Agashev A.M., Taylor L.A., 2015. Plume Impingement on the Siberian SCLM: Evidence from Re-Os Isotope Systematics. *Lithos* 218–219, 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.01.010>.

Poller U., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Todt W., 2005. Multistage Magmatic and Metamorphic Evolution in the Southern Siberian Craton: Archean and Paleoproterozoic Zircon Ages Revealed by SHRIMP and TIMS. *Precambrian Research* 136 (3–4), 353–368. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.12.003>.

Prokopyev I., Starikova A., Doroshkevich A., Nugumanova Y., Potapov V., 2020. Petrogenesis of Ultramafic Lamprophyres from the Terina Complex (Chadobets Upland, Russia): Mineralogy and Melt Inclusion Composition. *Minerals* 10 (5), 419. <https://doi.org/10.3390/min10050419>.

Sklyarov E.V., Fedorovsky V.S., Kotov A.B., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., Levitsky V.I., Sal'nikova E.B., Starikova A.E., 2009. Carbonatites in Collisional Settings and Pseudo-Carbonatites of the Early Paleozoic Ol'khon Collisional System.

Russian Geology and Geophysics 50 (12), 1091–1106. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.11.008>.

Sklyarov R.Ya., 1962. Some Features of the Geological Structure of the Chadobets Anticlinal Uplift. In: *Materials on Geology and Minerals of the Krasnoyarsk Region*. Vol. 3. Krasnoyarsk Book Publishing House, Krasnoyarsk, p. 21–31 (in Russian) [Скляр Р.Я. Некоторые черты геологического строения Чадобецкого антиклинального поднятия // Материалы по геологии и полезным ископаемым Красноярского края. Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1962. Вып. 3. С. 21–31].

Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A. et al., 2008. Plesovice Zircon – A New Natural Reference Material for U-Pb and Hf Isotopic Microanalysis. *Chemical Geology* 249 (1–2), 1–35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>.

Slukin A.D., 1973. *Weathering Crusts and Bauxites of the Chadobets Uplift*. Nauka, Moscow, 148 p. (in Russian) [Слукин А.Д. Коры выветривания и бокситы Чадобецкого поднятия. М.: Наука, 1973. 148 с.].

Starikova A., Prokopyev I., Doroshkevich A., Ragozin A., Chervyakovskiy V., 2021. Polygenic Nature of Olivines from the Ultramafic Lamprophyres of the Terina Complex (Chadobets Upland, Siberian Platform) Based on Trace Element Composition, Crystalline, and Melt Inclusion Data. *Minerals* 11 (4), 408. <https://doi.org/10.3390/min11040408>.

Starikova A.E., Sklyarov E.V., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Fedorovskii V.S., Lavrenchuk A.V., Mazukabzov A.M., 2014. Vein Calciphyre and Contact Mg Skarn from the Tazheran Massif (Western Baikal Area, Russia): Age and Genesis. *Doklady Earth Sciences* 457, 1003–1007. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14080182>.

Starosel'tsev V.S., 2009. Identifying Paleorifts as Promising Tectonic Elements for Active Oil and Gas Generation. *Russian Geology and Geophysics* 50 (4), 358–364. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.03.011>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2012. Angara-Yenisei Series. Scale 1:1000000. Sheet 0-47 (Bratsk). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 470 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ангаро-Енисейская. Масштаб 1:1000000. Лист 0-47 (Братск): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 470 с.].

Steiger R.H., Jager E., 1977. Subcommittee on Geochronology: Convention on the Use of Decay Constants in Geo- and Cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 36 (3), 359–361. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90060-7).

Sun J., Liu C., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Wu F.-Y., Yakovlev D., Yang Y.-H., Yang J.-H., 2014. Repeated Kimberlite Magmatism beneath Yakutia and Its Relationship to Siberian Flood Volcanism: Insights from in Situ U–Pb and Sr–Nd Perovskite Isotope Analysis. *Earth and Planetary Science Letters* 404, 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>.

Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjarsgaard B.A., 2005. Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification

of Igneous Rocks: Rationale and Implications. *Journal of Petrology* 46 (9), 1893–1900. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi039>.

Travin A.V., 2016. *Thermochronology of Subduction-Collision and Collision Events in the Central Asia*. Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Novosibirsk, 55 p. (in Russian) [Травин А.В. Термохронология субдукционно-коллизийных и коллизийных событий Центральной Азии: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2016. 55 с.].

Tsykina S.V., 2003. Zoning of Rare-Metal Mineralization of the Carbonatite Weathering Crust of the Chuktukon Deposit. In: *Geology and Mineral Resources of the Central Siberia*. Iss. 4. Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Mineral Resources, Krasnoyarsk, p. 153–158 (in Russian) [Цыкина С.В. Зональность редкометалльного орудене-

ния коры выветривания карбонатитов Чуктуконского месторождения // *Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири*. Красноярск: КНИИГиМС, 2003. Вып. 4. С. 153–158].

Vladimirov A.G., Gibsher A.S., Izokh A.E., Rudnev S.N., 1999. Early Paleozoic Granitoid Batholiths of Central Asia: Abundance, Sources, and Geodynamic Formation Conditions. *Doklady Earth Sciences* 369A, 1268–1271.

Vrublevskii V.V., Voitenko N.N., Romanov A.P., Polyakov G.V., Izokh A.E., Gertner I.F., Krupchatnikov V.I., 2005. Magma Sources of Triassic Lamproites of Gornyi Altai and Taimyr: Sr and Nd Isotope Evidence for Plume–Lithosphere Interaction. *Doklady Earth Sciences* 405A (9), 1365–1367.

Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., 2003. Deep Geodynamics and Mantle Plumes: Role Information of the Central-Asian Folded Belt. *Petrology* 11 (6), 504–531.

Таблица 1. Результаты U-Pb датирования цирконов из образцов коры выветривания по карбонатам Чуктуконского рудного поля

Table 1. Results of U-Pb dating of zircons from samples of the carbonatite weathering crust of the Chuktukon ore field.

П.н.	$f_{206c, 206Pb}$ %	U, ppm	Th/U	$^{207}Pb/^{235}U$	1 σ	$^{206}Pb/^{238}U$	1 σ	R	$^{207}Pb/^{206}Pb$	1 σ	$^{208}Pb/^{232}Th$	1 σ	T 206/238	1 σ	T 207/235	1 σ	D	T 207/206	1 σ	T 208/232	1 σ	
1	0.04	22	391	0.48	0.48697	0.01067	0.06422	0.0011	0.78	0.05508	0.00133	0.01637	0.00031	401	7	403	7	0.40	415	52	328	6
2	0.07	14	225	0.70	0.54026	0.01316	0.06932	0.00121	0.72	0.05661	0.0015	0.01705	0.00033	432	7	439	9	1.50	476	58	342	7
3	0.00	4	152	2.14	0.1823	0.00765	0.02665	0.00052	0.46	0.04968	0.00219	0.00687	0.00014	170	3	170	7	0.24	180	99	138	3
4	0.00	1	52	1.14	0.18623	0.01492	0.02708	0.00067	0.31	0.04995	0.00412	0.00688	0.00028	172	4	173	13	0.64	193	181	139	6
5	0.09	51	1857	0.17	0.22096	0.00437	0.03155	0.00053	0.85	0.05087	0.00112	0.00808	0.00016	200	3	203	4	1.25	235	50	163	3
6	0.00	3	148	1.33	0.18158	0.00853	0.02695	0.00054	0.43	0.04895	0.0024	0.00683	0.00017	171	3	169	7	-1.17	145	111	138	3
7	0.16	19	303	0.33	0.57284	0.01351	0.07259	0.00126	0.74	0.05732	0.00147	0.01892	0.00043	452	8	460	9	1.79	504	56	379	8
8	0.26	6	170	0.80	0.29446	0.0096	0.04005	0.00074	0.57	0.0534	0.00185	0.01052	0.00024	253	5	262	8	3.56	346	76	212	5
9	0.04	20	726	0.44	0.22256	0.00513	0.03202	0.00055	0.75	0.05048	0.00127	0.00839	0.00017	203	3	204	4	0.39	217	57	169	3
10	0.00	22	815	0.66	0.21028	0.00517	0.03121	0.00055	0.72	0.04894	0.0013	0.00807	0.00019	198	3	194	4	-2.17	145	61	163	4
11	0.00	14	584	0.33	0.18353	0.00477	0.02711	0.00048	0.68	0.04917	0.00138	0.007	0.00017	173	3	171	4	-0.81	156	64	141	3
12	0.07	24	366	1.26	0.60625	0.01346	0.07608	0.00132	0.78	0.05788	0.00141	0.01915	0.00037	473	8	481	9	1.80	525	53	383	7
13	0.00	7	210	0.86	0.25537	0.0087	0.0371	0.00069	0.55	0.05	0.0018	0.00906	0.00022	235	4	231	7	-1.66	195	82	182	4
14	0.03	9	134	0.43	0.5932	0.01739	0.07486	0.00136	0.62	0.05756	0.0018	0.02021	0.00054	465	8	473	11	1.61	513	68	404	11
15	0.00	17	448	1.02	0.31702	0.00784	0.04422	0.00078	0.71	0.05208	0.00139	0.01092	0.00023	279	5	280	6	0.25	289	60	219	5
16	0.13	17	277	0.43	0.55335	0.01364	0.07042	0.00124	0.71	0.05708	0.00152	0.01812	0.00043	439	7	447	9	1.94	494	58	363	9
17	0.00	12	458	0.56	0.19658	0.00674	0.0288	0.00054	0.55	0.04959	0.0018	0.00694	0.0002	183	3	182	6	-0.44	176	83	140	4
18	0.04	68	1018	0.87	0.58917	0.01213	0.07535	0.00129	0.83	0.0568	0.00129	0.01871	0.00039	468	8	470	8	0.43	483	49	375	8
19	0.00	5	218	0.49	0.1857	0.0081	0.02692	0.00054	0.46	0.0501	0.00229	0.0071	0.00025	171	3	173	7	0.99	200	103	143	5
20	0.00	14	424	0.84	0.27068	0.00698	0.03858	0.00068	0.68	0.05097	0.00141	0.00988	0.00023	244	4	243	6	-0.33	240	63	199	5
21	0.04	3	110	1.00	0.24872	0.01118	0.03504	0.0007	0.44	0.05157	0.00242	0.00908	0.00027	222	4	226	9	1.58	266	104	183	5
22	0.00	39	139	0.43	5.17815	0.10298	0.32825	0.00582	0.89	0.1144	0.00249	0.09728	0.00265	1830	28	1849	17	1.04	1871	39	1876	49
23	0.00	17	272	0.53	0.57296	0.01315	0.07345	0.0013	0.77	0.05657	0.0014	0.02119	0.00059	457	8	460	8	0.66	474	54	424	12
24	0.00	32	112	0.76	5.16775	0.09708	0.33118	0.00578	0.93	0.11316	0.00234	0.08866	0.00231	1844	28	1847	16	0.17	1851	37	1717	43
25	0.00	31	110	0.81	5.19934	0.10473	0.32842	0.00585	0.88	0.11482	0.00252	0.0918	0.00253	1831	28	1853	17	1.19	1877	39	1775	47
26	0.00	27	1028	0.71	0.20975	0.0045	0.03044	0.00054	0.83	0.04998	0.00115	0.01055	0.00038	193	3	193	4	0.00	194	53	212	8
27	0.00	61	925	0.57	0.60449	0.01205	0.0773	0.00135	0.88	0.05672	0.00123	0.02652	0.00087	480	8	480	8	0.02	480	47	529	17
28	0.00	7	234	0.28	0.22639	0.00647	0.03245	0.00059	0.64	0.05059	0.00153	0.01133	0.00042	206	4	207	5	0.63	222	68	228	8
29	0.00	21	534	0.53	0.31927	0.00762	0.04452	0.00078	0.73	0.05209	0.00135	0.0142	0.00026	281	5	281	6	0.18	289	58	285	5
30	0.03	10	257	0.51	0.31509	0.00837	0.04374	0.00078	0.67	0.05232	0.00149	0.01526	0.0003	276	5	278	6	0.76	300	64	306	6
31	0.00	9	140	0.64	0.57795	0.01715	0.07437	0.00138	0.63	0.05636	0.00177	0.02681	0.00089	462	8	463	11	0.15	466	68	535	18
32	0.02	25	1048	0.28	0.19497	0.00414	0.02815	0.0005	0.84	0.05024	0.00115	0.00915	0.00032	179	3	181	4	1.06	206	52	184	6

Примечание. Датированы образцы 545/046 (п.н. 1–22) и 514/066 (п.н. 23–32) из разведочных скважин Чуктуконского меторождения (см. рис. 3, а), R – коэффициент корреляции ошибок $^{207}Pb/^{235}U$ и $^{206}Pb/^{238}U$, D – дискордантность.

Note. Dated samples 545/046 (# 1–22) and 514/066 (# 23–32) are taken from exploration wells of the Chuktukon deposit (see Fig. 3, a), R – error correlation coefficient $^{207}Pb/^{235}U$ and $^{206}Pb/^{238}U$, D – discordance.

Таблица 2. Результаты Ar-Ar датирования щелочных пород Чадобецкого комплекса

Table 2. Results of Ar-Ar dating of alkaline rocks of the Chadobets complex

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
Тер 3/4 биотит					J=0.006244±0.000102						
600	33.3	0.1	0.0748	0.0009	3.66	0.04	0.046	0.004	2.3	208.4	11.1
700	30.79	0.05	0.0548	0.0004	7.06	0.02	0.018	0.002	7.0	267.3	6.4
800	26.70	0.02	0.0460	0.0002	0.46	0.01	0.0303	0.0008	15.5	189.7	3.9
900	26.50	0.01	0.01467	0.00009	0.081	0.004	0.0029	0.0002	35.9	268.0	4.1
975	24.86	0.01	0.01534	0.00007	0.062	0.004	0.0012	0.0002	61.2	256.9	3.9
1025	24.75	0.01	0.01526	0.00008	0.050	0.003	0.0007	0.0002	81.6	257.2	4.0
1130	25.22	0.01	0.0168	0.0001	0.118	0.006	0.0019	0.0002	100.0	258.3	4.0
Тер 2 биотит					J=0.006204±0.0001						
500	53.9	0.6	0.047	0.009	4.8	2.6	0.15	0.01	0.1	92.7	32.2
600	30.68	0.05	0.027	0.001	4.6	0.3	0.024	0.002	1.1	247.6	5.8
700	27.21	0.02	0.0186	0.0001	4.20	0.02	0.0048	0.0009	12.6	267.8	4.7
750	26.025	0.006	0.0152	0.0001	0.68	0.02	0.0019	0.0002	23.9	264.6	4.0
800	23.475	0.003	0.0145	0.0001	0.06	0.02	0.0004	0.0001	43.1	244.1	3.7
850	23.434	0.007	0.0157	0.0002	0.24	0.03	0.0011	0.0003	53.5	241.7	3.7
900	23.531	0.005	0.0166	0.0001	0.01	0.02	0.0018	0.0002	63.9	240.7	3.7
950	23.593	0.007	0.0154	0.0002	0.26	0.05	0.0030	0.0003	73.4	237.7	3.7
1000	23.790	0.007	0.0162	0.0002	0.30	0.03	0.0023	0.0003	80.8	241.8	3.7
1050	24.094	0.008	0.0172	0.0002	0.26	0.06	0.0035	0.0003	86.8	241.3	3.7
1130	24.219	0.006	0.0156	0.0001	0.14	0.02	0.0041	0.0002	100.0	240.7	3.7
Тер 1/2 биотит					J=0.006226±0.000101						
600	16.92	0.08	0.072	0.001	2.8	0.4	0.041	0.004	0.3	52.8	13.9
800	23.087	0.003	0.01543	0.00006	0.018	0.004	0.0007	0.0001	17.1	240.1	3.7
850	23.044	0.004	0.0163	0.0001	0.04	0.01	0.0003	0.0002	26.5	241.1	3.7
950	23.209	0.003	0.01548	0.00005	0.027	0.005	0.0006	0.0001	51.1	241.7	3.7
1025	23.013	0.007	0.01622	0.00006	0.053	0.003	0.0010	0.0003	85.0	238.6	3.7
1075	23.116	0.006	0.0170	0.0002	0.101	0.007	0.0016	0.0002	93.5	237.9	3.7
1130	22.804	0.005	0.0192	0.0002	0.14	0.02	0.0043	0.0002	100.0	227.1	3.5

Таблица 2. (продолжение)

Table 2. (continued)

T, °C	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	±	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	±	³⁷ Ar/ ³⁹ Ar	±	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	±	Выделенный ³⁹ Ar, %	Возраст, млн лет	±
546/053 биотит					J=0.006198±0.0001						
650	23.15	0.02	0.020	0.001	0.77	0.06	0.0117	0.0005	0.7	207.7	3.5
750	23.681	0.004	0.01464	0.00008	0.114	0.005	0.0003	0.0002	10.1	246.2	3.7
825	23.797	0.004	0.01465	0.00004	0.035	0.006	0.0005	0.0001	25.3	246.7	3.7
875	24.086	0.004	0.01503	0.00007	0.005	0.005	0.0008	0.0002	34.9	248.8	3.8
925	24.633	0.003	0.01499	0.00005	0.003	0.003	0.00125	0.00007	53.2	252.7	3.8
1000	24.993	0.003	0.01480	0.00004	0.008	0.005	0.00044	0.00008	69.0	258.6	3.9
1050	29.154	0.005	0.01474	0.00005	0.048	0.006	0.0015	0.0001	85.4	295.6	4.4
1100	39.486	0.008	0.0153	0.0001	0.006	0.006	0.0026	0.0002	93.5	388.0	5.7
1150	47.02	0.01	0.0162	0.0001	0.008	0.008	0.0036	0.0002	100.0	452.2	6.5
546/193-8 вал					J=0.005424±0.000077						
600	25.50	0.05	0.020	0.001	3.364	0.008	0.015	0.002	18.2	194.9	6.0
700	24.30	0.04	0.0166	0.0005	2.085	0.005	0.004	0.001	56.3	212.6	4.6
780	28.03	0.06	0.021	0.002	5.39	0.02	0.005	0.002	74.5	242.2	6.2
980	30.6	0.2	0.031	0.003	7.02	0.04	0.016	0.006	91.2	237.1	14.5
1150	32.59	0.06	0.023	0.002	13.46	0.02	0.020	0.002	100.0	244.9	5.7

Примечание. Ошибки указаны с интервалом ±2σ.

Note. Errors are indicated with an interval of ±2σ.