

Научная статья  
УДК 550.93  
doi: 10.17223/25421379/25/3

## ГЕОХРОНОЛОГИЯ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОГО КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА АРБАРАСТАХ (АЛДАНСКИЙ ЩИТ, ЯКУТИЯ): НОВЫЕ AR-AR И U-Pb ДАННЫЕ



Илья Романович Прокопьев<sup>1</sup>, Анна Геннадьевна Дорошкевич<sup>2</sup>,  
Антон Викторович Пономарчук<sup>3</sup>, Михаил Николаевич Крук<sup>4</sup>, Иван Александрович Избродин<sup>5</sup>,  
Николай Васильевич Владыкин<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*

<sup>1</sup> *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup> *Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

<sup>6</sup> *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия*

<sup>1</sup> *prokopyev\_ilya@mail.ru*

<sup>2</sup> *doroshkevich@igm.nsc.ru*

<sup>5</sup> *aponomar@igm.nsc.ru*

<sup>4</sup> *krukmn@igm.nsc.ru*

<sup>5</sup> *izbrodin@ginst.ru*

**Аннотация.** Приведена новая геохронологическая информация о тектономагматических событиях на рубеже ~ 655–640 млн лет на юге Сибирского кратона. Ar/Ar методом получены характеристики карбонатитов –  $651 \pm 6$  и  $657,8 \pm 6,5$  млн лет, силикокарбонатита –  $642,6 \pm 6,6$  млн лет, пироксенита –  $632,5 \pm 6$  млн лет, и щелочного сиенита –  $645,9 \pm 6,4$  млн лет щелочно-карбонатитового комплекса Арбарастах. Данные U-Pb датирования показали время кристаллизации пироксенитов –  $638,2 \pm 3,1$  млн лет, карбонатитов –  $650,3 \pm 9,8$  млн лет, и щелочного сиенита –  $641,7 \pm 5,6$  млн лет.

**Ключевые слова:** геохронология, Сибирский кратон, LIP, суперконтинент, Родиния

**Источник финансирования:** геология региона изучена в рамках НИР ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0024) и ГИН СО РАН (AAAAA21-121011390002-2). Петрографические и геохронологические исследования выполнены при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-17-00019).

**Для цитирования:** Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Пономарчук А.В., Крук М.Н., Избродин И.А., Владыкин Н.В. Геохронология щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса Арбарастах (Алданский щит, Якутия): новые Ar-Ar и U-Pb данные // Геосферные исследования. 2022. № 4. С. 48–66. doi: 10.17223/25421379/25/3

Original article  
doi: 10.17223/25421379/25/3

## GEOCHRONOLOGY OF THE ALKALINE-ULTRA-BASIC CARBONATITE COMPLEX ARBARASTAKH (ALDAN SHIELD, YAKUTIA): NEW AR-AR AND U-Pb DATA

Ilya R. Prokopyev<sup>1</sup>, Anna G. Doroshkevich<sup>2</sup>, Anton V. Ponomarchuk<sup>3</sup>,  
Mikhail Ni. Kruk<sup>4</sup>, Ivan A. Izbrodin<sup>5</sup>, Nikolai V. Vladykin<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> *V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

<sup>1</sup> *Department of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

<sup>2</sup> *N.L. Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

<sup>6</sup> *A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>1</sup> *prokopyev\_ilya@mail.ru*

<sup>2</sup> *doroshkevich@igm.nsc.ru*

<sup>3</sup> *aponomar@igm.nsc.ru*

<sup>4</sup> *krukmn@igm.nsc.ru*

<sup>5</sup> *izbrodin@ginst.ru*

**Abstract.** This paper is devoted to a new geochronological data for the main rocks that make up the Arbarastakh alkaline-ultramafic carbonatite complex, and includes information on the mineralogical and petrographic features of these rocks. The Ar-

barastakh complex is located in the Republic of Sakha (Yakutia) in the southeast of Russia, within the basin of the Arbarastakh River, in the Lena River basin. Tectonically, the complex is located in the eastern part of the Aldan shield on the southeastern margin of the Siberian craton. The main structural feature of the Arbarastakh complex is its concentric-zonal structure, expressed in the regular alternation of rocks with different compositions and different occurrence conditions. The main phase of the complex composes a stock-like body of alkaline pyroxenites, which has a rounded-ellipsoid shape in plan view. Between the body of pyroxene rocks and the ring fault there is a continuous zone of fenites – contact-metasomatic rocks. Dikes of alkaline syenites, ijolite-urtites and melteigites, are found in the area of the alkaline complex. Dikes of alkaline syenites are localized in the endo-contact zone of the complex. The carbonatites of the Arbarastakh complex are concentrated within the core of pyroxene rocks and occur as a series of incompletely conical dike-like bodies. The most common are calcite varieties of carbonatites with pyrochlore and phlogopite, as well as silicocarbonatites. Veins of dolomitic and ankeritic carbonatites occur much less frequently in pyroxenites.

Geochronological studies of alkaline rocks of the Arbarastakh alkaline-ultramafic carbonatite complex reflect a rather long history of the formation of the complex and characterize the multi-stage intrusion of rocks. The results of Ar-Ar dating showed the time of crystallization of the main phase of the complex – pyroxenites –  $632.5 \pm 6$  Ma; alkaline syenites –  $645.9 \pm 6.4$  Ma. The emplacement time of silicocarbonatites is  $642.6 \pm 6.6$  Ma; the formation of carbonatites occurred in the ranges of  $651 \pm 6$  and  $657.8 \pm 6.5$  Ma. U-Pb dating of pyroxenites showed an age of  $638.2 \pm 3.1$  Ma; time of intrusion of carbonatites is  $650.3 \pm 9.8$  Ma; and the crystallization age of alkaline syenite is  $641.7 \pm 5.6$  Ma. Thus, a certain age range of formation of rocks of the Arbarastakh complex is ~ 657–636 Ma, which is within the range of values for other alkaline carbonatite complexes, which structurally gravitate towards the marginal parts of the Siberian Craton and are characterized by similar types of rare-metal deposits.

**Keywords:** geochronology, Siberian Craton, LIP, supercontinent, Rodinia

**Source of financing:** the geology of the region was calculated within the framework of the Research Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (FWZN-2022-0024) and GIN SB RAS (AAAAA21-121011390002-2). Petrographic and geochronological studies were carried out with the support of the Russian Science Foundation (Project No. 19-17-00019).

**For citation:** Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Kruk M.N., Izbrodin I.A., Vladyskin N.V. (2022) Geochronology of the alkaline-ultra-basic carbonatite complex Arbarastakh (Aldan shlied, Yakutia): new Ar-Ar and U-Pb data. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 4. pp. 48–66. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/25/3

## Введение

Щелочно-ультраосновные карбонатитовые комплексы являются уникальной группой магматических пород, которые несут в себе информацию о процессах глубинного (до 200–250 км) магмообразования специфичных по составу силикатно-карбонатных расплавов, а также о процессах метасоматоза и углеродного цикла в мантии [Rock, 1986; Le Bas., 1987; Dalton, 1993; Hamilton, Kjasgaard, 1993; Kogarko, 1995; Mitchell, 2005, 2006; Tappe et al., 2006; Guzmics, Zajacz, 2013]. Процесс формирования неопротерозойских рудоносных (Nb, Ta, U и REE) концентрически-зональных щелочно-карбонатитовых комплексов в пределах южной окраины Сибирского кратона (Белая Зима, Тагна, Жидой, Игнили, Арбарастах) в период 720–630 млн лет связывают с эпохой проявления крупномасштабного внутриплитного магматизма и геодинамическими событиями распада суперконтинента Родиния [Ярмолюк и др., 2005; Кузьмин, Ярмолюк, 2014].

Предшествующие петрологические исследования щелочных пород комплекса Арбарастах показали, что основные фазы массива представлены пироксенитами, секущими их телами карбонатитов, магнетит-апатитовых пород (фоскоритов) и ийолитов, а также по периферии массива отмечаются выходы отдельных тел более поздних щелочных сиенитов [Глаголев и др., 1974]. Первые данные по

абсолютному возрасту пород массива показали интервал кристаллизации пироксенитов и карбонатитов –  $690 \pm 28$  млн лет, фоскоритов –  $720 \pm 28$  млн лет (K-Ar, флогопит, [Глаголев, 1974]). При таких оценках возраста щелочных пород Арбарастахского комплекса (720–690 млн лет), временной интервал становления массива коррелирует со временем формирования Иркутской крупной изверженной провинции (LIP) с возрастом ~ 720 млн л., которая реконструирована с одновозрастной Франклинской LIP северной Лаврентии [Ernst et al., 2018]. И это согласуется с более общим наблюдением тесной временной корреляции между образованием карбонатитов и проявлением крупных изверженных провинций [Ernst, Bell, 2010].

Современные датировки цирконов из пироксенита U-Pb методом (SHRIMP-II) показали возраст –  $630,5 \pm 5,7$  млн лет (отчет № 25011, ВСЕГЕИ, 2015). Согласно докладу на конференции EGU-2020 Н.В. Владыкиным (ИГХ СО РАН, г. Иркутск) U-Pb возраст пород по цирконам и бадделеиту из фоскоритов и пироксенитов составляет  $656 \pm 5$  и  $653 \pm 9$  млн лет соответственно. Представленные в этой работе новые геохронологические данные определения возраста кристаллизации щелочных пород массива Арбарастах согласуются с предшествующими датировками, а также существенно дополняют и уточняют возраст образования различных щелочных фаз внедрения исследуемого комплекса.

## Геологическое строение

Щелочно-ультраосновной карбонатитовый комплекс Арбарастах расположен на территории Республики Саха (Якутия) на юго-востоке России, в пределах бассейна реки Арбарастах – левого притока реки Идюм, в бассейне реки Лена (рис. 1). В тектоническом плане комплекс расположен в восточной части Алданского щита на юго-восточной окраине Сибирского кратона. Фундамент щита образован комплексом метаморфических архейских пород и постепенно перекрывается чехлом горизонтально залегающих осадочных пород нижнекембрийско-верхнепротерозойского возраста (рис. 1). Арбарастахский массив приурочен к краевой части Идюмо-Хайканского сводового поднятия [Зленко, 1961]. В ядре поднятия обнажаются породы фундамента, крылья перекрываются осадочным чехлом [Глаголев и др., 1974].

Архейская толща фундамента состоит из биотитовых, диопсидовых, гиперстеновых и роговообманковых кристаллических сланцев, гнейсов, амфиболитов, гранатовых и графитовых гнейсов, мраморов и кальцифилов (тимптоно-желтулинская серия учурского гранулит-парагнейсового террейна) [Парфенов, Кузьмин, 2001]. В пределах массива Арбарастах широко распространены архейские биотит-амфиболовые гнейсо-граниты (обособленные массивы), аляскитовые граниты (мигматиты и межпластовые тела), залегающие в пределах синклинойной зоны шириной около 20–22 км с общим северо-восточным простиранием [Глаголев и др., 1974]. Внутри зоны породы смяты в серию узких изоклинальных складок, падающих в северо-восточном направлении под крутым углом. Ближе к массиву архейские породы меняют простирание – раздвигаются с двух сторон, огибая массив. Данная структура образовалась в архейское время и, скорее всего, предопределила появление массива именно в этом месте. Комплекс осадочных пород чехла представлен протерозойскими аркозовыми, доломитовыми и кварцевыми песчаниками с редкими горизонтами конгломератов и доломитов [Глаголев и др., 1974].

Сеть разно ориентированных разломов вблизи массива Арбарастах, пересекающих породы фундамента и чехла, разделяет территорию на отдельные блоки [Глаголев и др., 1974]. Выделяются две главные системы крутопадающих разломов. Первая заложена в архее и имеет направление, близкое к простиранию архейской складчатости. Вторая связана с возникновением Идюмо-Хайканского поднятия и ориентирована почти под прямым углом к нарушениям первой системы [Глаголев и др., 1974]. Важным обстоятельством является то, что разломы проникают в

верхний структурный ярус лишь частично, пересекая только протерозойские породы. Это дает возможность предположить, что движение блоков вдоль этих разломов происходило синхронно с формированием Арбарастахской интрузии. Активность разломов подтверждается приуроченностью к ним даек щелочных пород [Глаголев и др., 1974]. Сам массив отделен от вмещающей толщи архейских метаморфических пород сплошным кольцевым разломом, диаметр которого составляет 6–8 км (рис. 1). Внутри него произошло кальдерное опускание пород на глубину 50–80 м [Глаголев и др., 1974]. Углы падения разломов изменяются от 60 до 90° и направлены к центру интрузии.

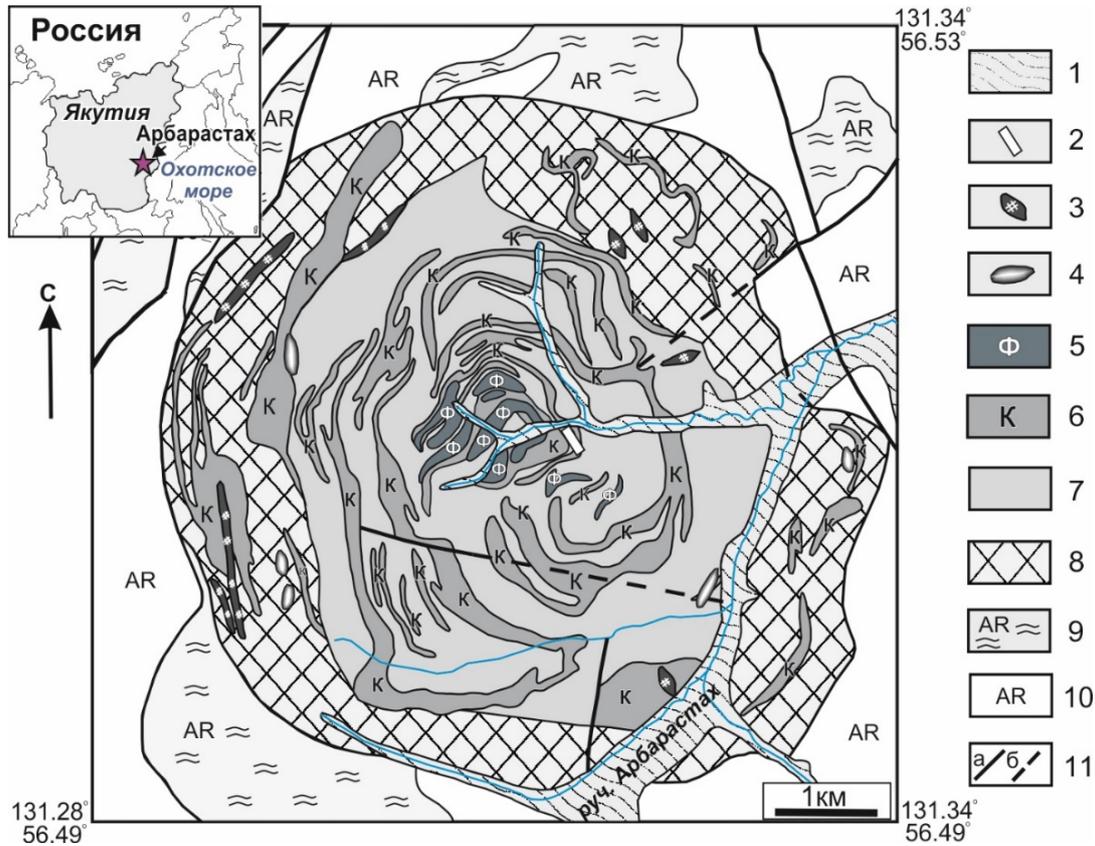
Главной структурной чертой массива Арбарастах является его концентрически-зональное строение, выраженное в закономерном чередовании пород с разным составом и разными условиями залегания (рис. 1). Основная фаза массива слагает штокообразное тело пироксеновых пород – пироксениты, имеющее в плане округло-эллипсоидное очертание, вытянутое в северо-западном направлении. Тело пироксенитов имеет грубоконцентрическое строение и сложено чисто пироксеновыми, пироксен-слюдистыми, пироксен-роговообманковыми разновидностями [Глаголев и др., 1974]. Между телом пироксеновых пород и кольцевым разломом заключена сплошная зона контактово-метасоматических пород – фенитов. Мощность зоны составляет до 1 км.

На площади массива установлены дайки жильных щелочных сиенитов, а также ийолит-уртитов и мельтейгитов, мощность которых меняется от нескольких сантиметров до 50 метров при протяженности до 1 км [Глаголев и др., 1974]. Дайки щелочных сиенитов локализованы в эндоконтактной зоне массива. Простирание даек подчинено общей кольцевой структуре массива, а падение составляет 70–90°. Контакты с пироксенитами и фенитами – секущие [Глаголев и др., 1974]. Во время полевых работ 2019 г. в пределах массива зафиксировано несколько даек ультраосновных щелочных лампрофилов в центральной части массива мощностью первые метры. Дайковые тела имеют секущие контакты с карбонатитами и, согласно классификации Таррег и соавт. [2005], могут быть отнесены к ультраосновным щелочным лампрофирам – айликитам.

Карбонатиты массива Арбарастах сосредоточены внутри ядра пироксеновых пород и залегают в виде серии неполноконических дайкообразных тел (рис. 1). Мощность отдельных тел карбонатитов изменяется от 10–20 см до 400–600 м, контакты с пироксеновыми породами – секущие. Углы падения независимо от близости к центру массива составляют 60–80° к центру массива [Глаголев, 1974]. Наиболее распростра-

нены кальцитовые разновидности карбонатитов с пироксеном и флогопитом. Значительно реже в пироксенитах

встречаются жилы (до первых метров) доломитовых и анкеритовых карбонатитов.



**Рис 1. Схема расположения и схематическая геологическая карта щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса Арбарастах (по данным [Глаголев и др., 1974; Горошко, Гурьянов, 2004] с дополнениями авторов)**

1 – аллювиальные отложения (галечка, гравий, пески, суглинки); 2–7 – породы комплекса Арбарастах: 2 – дайки щелочных лампрофиров (айликиты); 3 – щелочные сиениты (канкринитовые и нефелиновые сиениты); 4 – ийолит-уртиты, мельтейгиты; 5 – фоскориты (магнетит-апатитовые руды); 6 – карбонатиты (пироксеновые, флогопитовые, апатитовые, нефелиновые, флюоритовые, пироклор-содержащие и другие разновидности) и силикокарбонатиты; 7 – пироксениты; 8 – фениты (флогопитовые метасоматиты); 9 – раннеархейские гранитоиды (аласкитовые граниты, биотитовые и биотит-роговообманковые граниты, гранито-гнейсы, диориты); 10 – гнейсы, кристаллические сланцы и мраморы нижнего архея (арбарастахская и холболухская свиты); 11 – тектонические нарушения: разломы установленные (а) и предполагаемые (б)

**Fig 1. Location diagram and schematic geological map of the alkaline-ultrabasic carbonatite complex Arbarastakh (according to [Glagolev et al., 1974; Goroshko, Guryanov, 2004] with additions by the authors)**

1 – alluvial deposits (pebbles, gravel, sands, loams); 2–7 – rocks of the Arbarastakh complex: 2 – dykes of alkaline lamprophyres (aillikites); 3 – alkaline syenites (cancrinite and nepheline syenites); 4 – ijolite-urtites, melteigites; 5 – phoscorites (magnetite-apatite ores); 6 – carbonatites (pyroxene, phlogopite, apatite, nepheline, fluorite, pyrochlore-containing and other varieties) and silicocarbonatites; 7 – pyroxenites; 8 – fenites (phlogopite metasomatites); 9 – Early Archean granitoids (alaskite granites, botite and biotite-hornblende granites, granite-gneisses, diorites); 10 – gneisses, crystalline schists and marbles of the Lower Archean (Arbarastakh and Kholbolokh formations); 11 – tectonic faults: faults identified (a) and suggested (b)

В самом центре комплекса Арбарастах локализованы конические тела магнетит-апатит-форстеритовых пород, имеющие секущие контакты с ранее описанными фазами [Глаголев и др., 1974]. Мощность тел составляет от 30–70 до 200–400 м (рис. 1). Согласно петрографической классификации, породы отнесены к фоскоритам. Современные минералогические и петрографические особенности карбонатитов

и фоскоритов комплекса Арбарастах описаны в работах [Kruk et al., 2021; Prokopyev et al., 2021].

### Методы исследования

Образцы, использованные для минералогических и геохронологических исследований, были отобраны в ходе полевых работ на массиве Арбарастах в

2019 г. Петрографическое изучение пород щелочно-го комплекса Арбарастах проводилось на микроскопе Olympus BX51 с фотокамерой. Исследования текстурно-структурных характеристик и минералогического состава пород проводилось на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU JSM-6510LV с энергосберегающей приставкой для микронного анализа X-Max Oxford Instruments.

Минеральный состав определяли с помощью электронного микронзонда JEOL JXA-8100 (режим WDS, 20 кВ, 15 нА, диаметр пучка 1–2 мкм). Общее время анализа F (с использованием кристалла LDE) составило 40 с (для фона – 20 с, для пика F – 20 с). Предел обнаружения F составил 477 ppm (0,04 мас. %). Для анализа минералов мы использовали ток пучка 10 нА и ускоряющее напряжение 15 кВ; для оксидов Fe – Ti – 20 нА и 15 кВ; для монацита – 40 нА и 20 кВ, а для апатита – 10 нА и 20 кВ. Время анализа пиков составляло 16 с для основных элементов и 30–60 с для второстепенных элементов. Для калибровки в качестве стандартов использовались как природные минералы, так и синтетические минеральные фазы, при этом каждый элемент и пределы обнаружения (в ppm) были следующие: SiO<sub>2</sub> (Si, 158), рутил (Ti, 120), LiNbO<sub>3</sub> (Nb, 142), Sr силикатное стекло (Sr, 442), альбит (Na, 176), ортоклаз (K, 182), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Al, 128), F-apatит (Ca, 115; P, 387; F, 477), Mn-гранат (Mn, 129), гематит (Fe, 148), CePO<sub>4</sub> (Ce, 236), LaPO<sub>4</sub> (La, 272), BaSO<sub>4</sub> (S, 178), NdPO<sub>4</sub> (Nd, 362), Cl-apatит (Cl, 74) и PrPO<sub>4</sub> (Pr, 401).

Определение возраста <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar методом датирования проводилось по мономинеральным фракциям, отбор которых осуществлялся 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 использовался стандартный K/Ar образец мусковит МСА-11 (OCO No 129–88), подготовленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом минерального сырья Министерства геологии СССР (ВИМС) в 1988 г. Для его калибровки в качестве <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar монитора использовались международные стандартные образцы мусковит Bern 4m и биотит LP-6 [Baksi, Archibald, Farrar, 1996]. По результатам калибровки в качестве возраста мусковита МСА-11 было принято среднее, которое составило 311,0 ± 1,5 млн лет [Травин, 2016]. Значение полной постоянной распада 40K, в соответствии с [Steiger, Jager, 1977], принималось равным 5,543 × 10<sup>-10</sup> год<sup>-1</sup>.

Холостой опыт по определению <sup>40</sup>Ar (10 мин при 1 200 °C) не превышал 5 × 10<sup>-10</sup> нсм<sup>3</sup>. Очистку арго-

на 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 Micromass (Англия). Для коррекции на изотопы <sup>36</sup>Ar, <sup>37</sup>Ar, <sup>40</sup>Ar, полученные при облучении Ca, K, использованы следующие коэффициенты: (<sup>39</sup>Ar/<sup>37</sup>Ar)<sub>Ca</sub> = 0,000891 ± 0,000005, (<sup>36</sup>Ar/<sup>37</sup>Ar)<sub>Ca</sub> = 0,000446 ± 0,000006, (<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar)<sub>K</sub> = 0,089 ± 0,001. Особое внимание уделялось контролю фактора изотопной дискриминации с помощью измерения порции очищенного атмосферного аргона. 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.

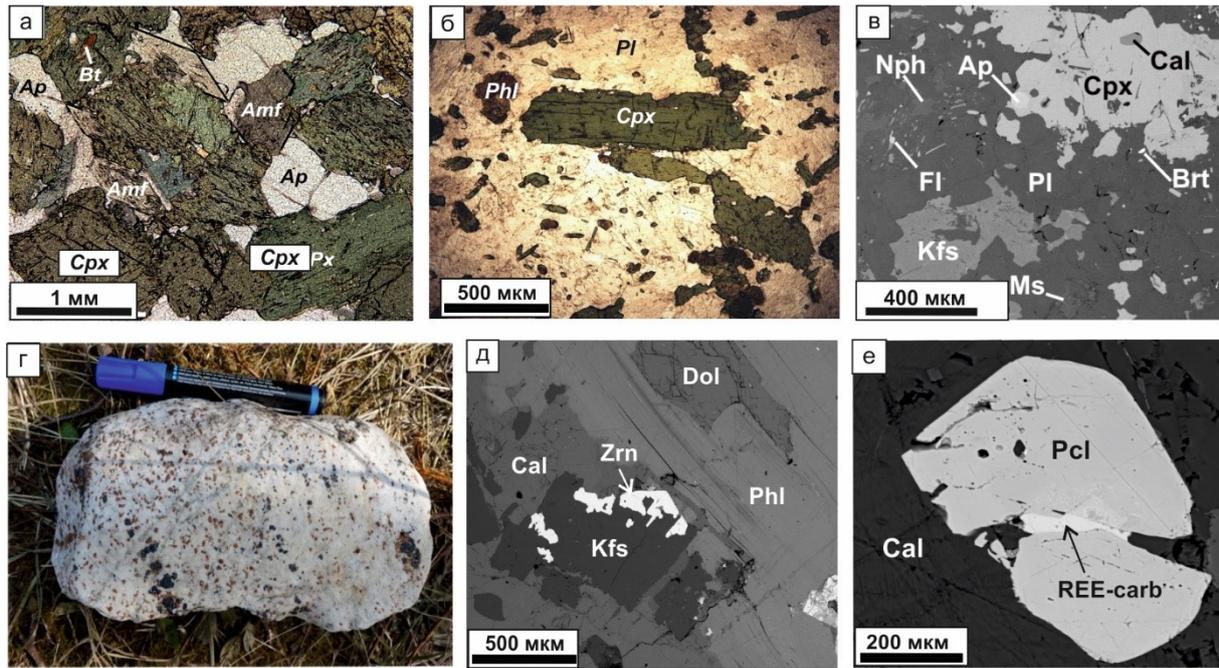
Исследования проведены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Датирование цирконов U-Pb методом проводилось на SHRIMP II в Центре изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). Кристаллы циркона и титанита были закреплены в эпоксидной смоле вместе с зернами стандартов (TEMORA, 91500). Точки микроанализа были выбраны с помощью оптических, BSE и катодолюминесцентных изображений, которые показали внутреннюю структуру и зональность кристаллов циркона.

Отношения U-Pb были измерены с использованием метода, рекомендованного в работе Williams [1998]. Интенсивность первичного пучка молекулярного кислорода составляла 4 нА, а образовавшийся кратер имел диаметр 25 мкм и глубину до 5 мкм. Данные обрабатывались с помощью программы SQUID [Ludwig, 2000]. Отношения U-Pb были нормализованы до значения 0,0668 (TEMORA), что соответствует значению 416,75 млн лет [Black, Kamo, Allen, 2003]. Индивидуальные анализы находятся в пределах ошибки 1σ, а рассчитанные конкордантные возрасты – в пределах ошибки 2σ. Диаграммы конкордией были построены с помощью программного обеспечения Isoplot/Ex [Ludwig, 1999].

### Петрография и минералогия щелочных пород

Петрографическое и минералогическое изучение образцов щелочных пород массива показало, что в основной фазе массива присутствуют щелочные пироксениты – якупирангиты (рис. 2, а).



**Рис. 2. Петрографические и минералогические особенности исследуемых пород щелочного комплекса Арбарастах**

*a* – петрографическое фото щелочного пироксенита с массивной текстурой; *b* – петрографическое фото образца щелочного сиенита; *c* – BSE-картинка минерального парагенезиса нефелинового сиенита; *d* – образец карбонатита с вкрапленными зернами бадделейта (коричневые) и флогопита (темно-зеленого); *e, f* – BSE-картинки минеральных ассоциаций в карбонатите. Аббревиатура минералов: Bt – биотит, Amf – амфибол, Ap – апатит, Cpx – клинопироксен, Nph – нефелин, Scp – скаполит, Cal – кальцит, Ttn – титанит, Phl – флогопит, Pl – плагиоклаз, Fl – флюорит, Kfs – калишпат, Ms – мусковит, Zrn – циркон, Dol – доломит, Pcl – пирохлор, REE-carb – редкоземельный карбонат

**Fig. 2. Petrographic and mineralogical features of the studied rocks of the Arbarastakh alkaline complex**

*a* – petrographic photo of alkaline pyroxenite with massive texture; *b* – petrographic photo of a sample of alkaline syenite; *c* – BSE image of the mineral paragenesis of nepheline syenite; *d* – sample of carbonatite with disseminated grains of baddeleyite (brown) and phlogopite (dark green); *e, f* – BSE images of mineral associations in carbonatite. Mineral abbreviations: Bt – biotite, Amf – amphibole, Ap – apatite, Cpx – clinopyroxene, Nph – nepheline, Scp – scapolite, Cal – calcite, Ttn – titanite, Phl – phlogopite, Pl – plagioclase, Fl – fluorite, Kfs – potassium feldspar, Ms – muscovite, Zrn – zircon, Dol – dolomite, Pcl – pyrochlore, REE-carb – rare earth carbonate

Пироксениты имеют неравномернoзернистую, местами порфиловую структуру, размеры зерен варьируют от 0,5–1 мм до 1–2 см.

Текстура породы массивная, встречаются шпиро-вые обособления кристаллов флогопита. По петрохимическому составу содержание SiO<sub>2</sub> составляет 30–40 мас. %, количество Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O = 3–10 мас. %, что позволяет отнести породу к семейству ультраосновный фойдолитов. Главными породообразующими минералами в породе являются клинопироксен (70–80 %), амфибол (5–10 %), биотит (5–10 %), апатит (3–5 %) и нефелин (1–5 %). Второстепенные минералы представлены кальцитом, баритом, баритоцелестином и скаполитом; аксессуарными (менее 1 %) минералами являются циркон и титанит. Клинопироксен по составу является промежуточным между эгирином и диопсидом (Di<sub>40–45</sub>Aeg<sub>50–40</sub>Ned<sub>5–20</sub>), замещается поздними биотитом, амфиболом и кальцитом. Амфибол по составу относится к группе щелочных амфиболов – рихтериту. Слюда в якупиран-

гитах представлена тетраферрифлогопитом. Кристаллы флогопита чаще всего зональные, что обусловлено вариациями в составе FeO, MgO и TiO<sub>2</sub>. Апатит по составу относится к группе фторапатита: содержание F – до 4,16 мас. %, SrO – до 1,32 мас. % и LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – до 3,25 мас. %. Нефелин образуют редкие кристаллы неправильной формы, замещается скаполитом. Титанит образует удлиненные кристаллы, циркон – призматические кристаллы, размеры зерен редко достигают 100 мкм.

Фельдшпатоидные (щелочные) сиениты являются одной из поздних силикатных фаз массива (рис. 2, *b, c*). Структура породы среднeзернистая, текстура – массивная. Содержание кремнезема составляет 57–60 мас. %, а сумма щелочей равна 11,5–12 мас. %. Породообразующие минералы щелочных сиенитов представлены полевыми шпатами (40–60 %), нефелином (10–15 %) и клинопироксеном (10–20 %). Второстепенные минералы – биотит, фторапатит, лейцит, барит, стронцианит, мусковит, скаполит,

банальсит; акцессорные – пироксид, титанит и ильменит. Калиевый полевой шпат образует пойкилитовые вроски в альбите, в своем составе содержит примеси BaO – 3–7,12 мас. % и FeO<sub>t</sub> – до 0,36 мас. %. Нефелин содержит CaO – до 4,66 мас. % и SrO – до 1,5 мас. %. В некоторых образцах в виде вросок встречается бариевый полевой шпат – банальсит с содержанием BaO до 40,12 мас. %. Пироксен по составу соответствует эгирин-диопсиду Di<sub>40–50</sub>Aeg<sub>30–40</sub>Hed<sub>10–20</sub>. Апатит относится к группе фторапатита и содержит в своем составе SrO и LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 1,21 и 1,5–2 мас. % соответственно. Слюда по составу принадлежит к группе флогопита с содержанием TiO<sub>2</sub> до 2,5 мас. %. Скаполит замещает фельдшпатоидные минералы. Мусковит, барит и стронцианит в породе редки и образовались, вероятно, в ходе поздних гидротермально-метасоматических процессов. Титанит и ильменит образуют тесные сростания – каймы титанита вокруг ксеноморфных кристаллов ильменита. Титанит содержит примесь FeO<sub>t</sub> до 2,2 мас. %, а в составе ильменита отмечается примесь MnO до 2 мас. %. Пироксид в сиенитах имеет размеры до 150 мкм и по содержанию оксидов титана (до 15 мас. %) и урана (до 20 мас. %) может быть отнесен к группе уранпироксидов.

Карбонатиты представляют собой среднезернистые породы с массивной текстурой (см. рис. 2, *d–f*). На территории комплекса присутствует большое количество разновидностей карбонатитов: пироксеновые, флогопитовые, апатитовые, нефелиновые, флюоритовые, пироксидсодержащие и др. Исследуемые образцы карбонатитов и силикокарбонатита являются типичными разновидностями карбонатитовой серии комплекса Арбарастах. Образцы представляют собой кальциокарбонатиты и силикокарбонатиты (SiO<sub>2</sub> от 20 до 27 мас. %); содержание CaO уменьшается пропорционально увеличению степени гидротермального изменения пород. Содержание щелочей (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O) низкое для всех разновидностей – для кальциокарбонатитов до 2 мас. %, для силикокарбонатитов – до 4,8 мас. %. Основными минералами карбонатитов являются кальцит и доломит (50–90 % породы), с варьирующими по количеству клинопироксеном, флогопитом, апатитом, амфиболом и титанитом. Второстепенные минералы представлены анкилитом-(Ce), бастнезитом-(Ce), предположительно бурбанкитом, а также баритом и стронцианитом. Акцессорными в породе являются титаномагнетит, циркон, цирконолит, пироксид и бадделеит. Также в массиве встречаются разновидности карбонатитов с полевыми шпатами и нефелином. Фельдшпатоиды здесь образуют идиоморфные кристаллы в карбонатном матрице.

Кальцит в карбонатитах образует призматические кристаллы размером от 1 до 5 мм и содержит мик-

ронные вкрапления стронцианита и анкилита-(Ce) (рис. 2, *e, f*). В химическом составе кальцита отмечаются примеси MgO до 1,31 мас. %, SrO до 1,53 мас. %. Клинопироксен по составу относится к эгирин-диопсиду (Di<sub>50–60</sub>Aeg<sub>30–40</sub>Hed<sub>0–20</sub>) и встречается преимущественно в силикокарбонатитах, образуя призматические кристаллы. Щелочной амфибол (рихтерит) развивается по клинопироксену. Фторапатит (F= 4–5 мас. %) в карбонатитах обогащен легкими лантаноидами (LREE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 2,56 мас. %), причем их содержание увеличивается от центра к краю зерна, что свидетельствует о выносе редких земель из апатита вследствие поздних гидротермальных процессов [Prokoryev et al., 2017]. Фторапатит также содержит примесь SrO до 1,53 мас. %. Слюда представлена тетраферрифлогопитом. Слюда образует зональные кристаллы, что обусловлено различными содержаниями BaO (1,47–4,61 мас. %), FeO<sub>t</sub> (1,71–1,96 мас. %), MgO (22,41–25,12 мас. %) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13,89–16,14 мас. %).

Такие минералы, как барит, анкилит-(Ce), бастнезит-(Ce) и бурбанкит, встречаются в породах в виде микропрожилков и микровкрапленников в карбонатах либо по периферии кристаллов апатита, нефелина и магнетита. Титаномагнетит (TiO<sub>2</sub> до 0,52 мас. %) в породе встречается редко и содержит включения ильменита. Минералы группы пироксидов являются главным концентратом ниобия в карбонатитах, образуют октаэдрические светло-коричневые, коричневые до черных кристаллы размером 0,2–1 мм. Пироксид кристаллизуется в виде идиоморфных зональных октаэдров, врастающих в кристаллы силикатов. Часто можно заметить приуроченность акцессорного пироксидов к скоплениям апатита (рис. 2). В химическом составе пироксидов содержания UO<sub>2</sub> варьируют от 0 до 12,39 мас. %, ThO<sub>2</sub> от 0 до 5,06 мас. % и Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> от 3 до 12 мас. %. Часто отмечаются содержания BaO до 10,22 мас. %, SrO до 3 мас. %, а FeO до 2,5 мас. %. Бадделеит встречается в карбонатитах довольно редко и образует мельчайшие одиночные кристаллы. В химическом составе отмечается примесь HfO<sub>2</sub> до 1,8 мас. %.

### Результаты датирования

*Ar-Ar исследования.* Образец флогопита щелочного пироксидита (якупирангита) (обр. 2-1/19) демонстрирует возрастной спектр, состоящий из 12 ступеней (рис. 3, *a*, табл. 1). Девять средневысокотемпературных ступеней образуют возрастное плато, характеризующееся средневзвешенным возрастом в  $632,5 \pm 6$  млн лет. Ступени возрастного плато включают более 98 % от общего количества <sup>39</sup>Ar, выделенного в ходе эксперимента.

В результате эксперимента по определению возраста  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  методом был получен возрастной спектр флогопита образца карбонатита (обр. 68-1б), состоящий из 12 ступеней (рис. 3, а, табл. 1). Девять ступеней могут быть объединены в надежное возрастное плато со средневзвешенным возрастом  $651 \pm 6$  млн лет, соответствующее более 99 % от выделенного  $^{39}\text{Ar}$ .

Возрастной спектр флогопита из силикокарбонатита (обр. 66-1), полученный методом ступенчатого прогрева, состоит из восьми ступеней (рис. 3, с, табл. 1). Возраста семи ступеней совпадают в интервале ошибок  $1\sigma$  и могут быть объединены в возрастное плато. В рамках возрастного плато выделено 99 %  $^{39}\text{Ar}$  от общего количества, полученного в ходе эксперимента. Средневзвешенный возраст плато составляет  $642,6 \pm 6,6$  млн лет.

Возрастной спектр флогопита карбонатита (обр. 50-2) образует возрастной спектр, состоящий из 10 ступеней (рис. 3, d, табл. 1). Восемь ступеней согласуются между собой в пределах погрешности  $1\sigma$  и дают средневзвешенный возраст  $657,8 \pm 6,5$  млн лет. Количество газа, выделенное в рамках этих ступеней, составляет 90 % от общего количества  $^{39}\text{Ar}$ .

Для монофракции флогопита из щелочного сиенита (обр. 56-4) получен возрастной спектр, включающий 11 ступеней (рис. 3, e, табл. 1). Восемь высокотемпературных ступеней могут быть объединены в возрастное плато, со средневзвешенным возрастом  $645,9 \pm 6,4$  млн лет. Общее количество  $^{39}\text{Ar}$  для включенных в плато ступеней достигает 85 % от общего количества  $^{39}\text{Ar}$ , выделенного в ходе измерения образца.

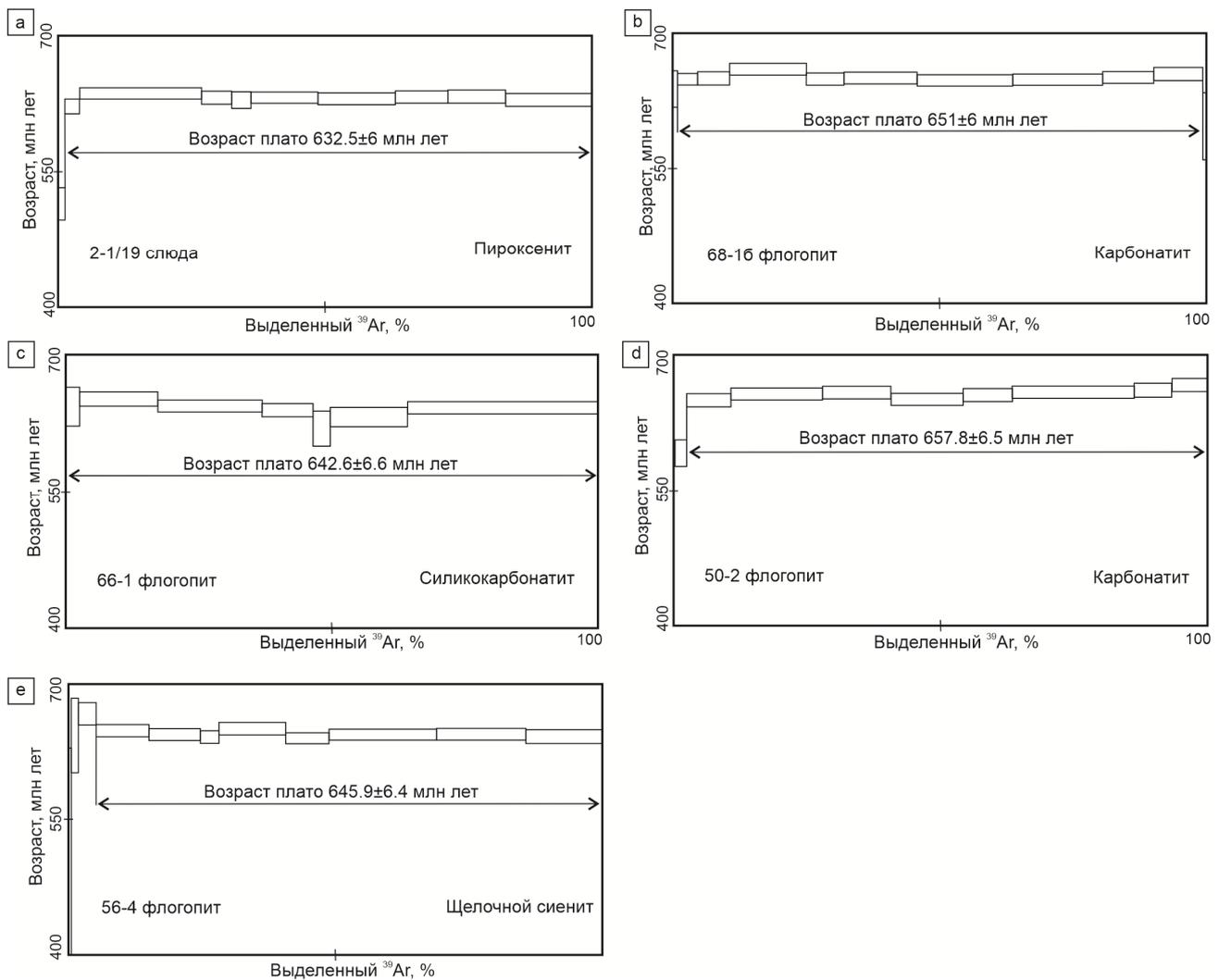


Рис. 3. Результаты Ar-Ar датирования щелочных пород комплекса Арбарастах: возрастные спектры слюд а – пироксенита (обр. 2-1/19); б – карбонатита (обр. 68-1б); с – силикокарбонатита (обр. 66-1); д – карбонатита (обр. 50-2); е – щелочного сиенита (обр. 56-4)

Fig. 3. Results of Ar-Ar dating of alkaline rocks of the Arbarastakh complex: age spectra of micas

а – пироксенит (sample 2-1/19); б – карбонатит (sample 68-1b); с – силикокарбонатит (sample 66-1); д – карбонатит (sample 50-2); е – щелочной сиенит (sample 56-4)

## Результаты Ar-Ar датирования пород

Table 1

## Result of Ar-Ar dating of rocks

T, °C	<sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±	<sup>38</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±	<sup>37</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±	<sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar	±	Выделенный <sup>39</sup> Ar, %	Возраст, млн лет	±
2-1/19 флогопит / якуширангит										J=0,004375±0,00005	
500	352,2	80,2	0,3	0,2	2,7	0,8	1,0	0,3	0,1	413,4	430,5
630	175,9	4,7	0,04	0,03	0,8	0,1	0,43	0,03	0,4	347,0	52,5
750	116,3	1,1	0,027	0,005	1,74	0,06	0,138	0,010	1,5	514,4	18,1
870	106,7	0,4	0,014	0,004	0,19	0,01	0,042	0,003	4,3	623,3	8,3
970	98,9	0,1	0,014	0,000	0,004	0,002	0,0068	0,0006	27,1	637,7	6,3
1 025	102,6	0,2	0,014	0,001	0,01	0,01	0,022	0,002	32,7	632,7	7,2
1 075	103,5	0,4	0,020	0,003	0,013	0,009	0,027	0,004	36,4	630,3	9,2
1 150	99,1	0,1	0,0158	0,0005	0,016	0,001	0,010	0,001	48,9	633,2	6,2
1 200	98,3	0,1	0,017	0,001	0,026	0,003	0,008	0,001	63,3	632,0	6,6
1 230	99,2	0,2	0,011	0,001	0,005	0,005	0,010	0,002	73,2	633,9	7,0
1 250	99,2	0,2	0,011	0,001	0,013	0,003	0,010	0,002	83,9	634,5	7,1
1 280	98,5	0,2	0,011	0,002	0,026	0,005	0,009	0,002	100,0	630,7	7,2
68-1б флогопит/карбонатит										J=0,004398±0,000051	
500	210,8	18,0	0,07	0,07	1,6	0,6	0,56	0,10	0,1	333,7	168,5
650	116,7	1,3	0,022	0,008	1,21	0,03	0,07	0,01	1,1	638,3	20,4
750	103,6	0,2	0,007	0,002	0,15	0,01	0,018	0,002	4,8	648,8	6,9
825	102,1	0,3	0,013	0,001	0,048	0,009	0,012	0,002	10,8	650,0	7,3
900	102,2	0,1	0,0121	0,0006	0,038	0,002	0,006	0,001	25,1	659,9	6,5
950	101,6	0,2	0,013	0,001	0,008	0,006	0,010	0,001	32,2	649,4	6,7
1 020	100,4	0,1	0,0127	0,0005	0,003	0,003	0,006	0,001	45,9	650,5	6,5
1 100	99,5	0,1	0,0139	0,0005	0,0004	0,0008	0,004	0,001	63,8	647,8	6,3
1 150	99,7	0,1	0,0117	0,0003	0,0040	0,0009	0,0044	0,0006	80,6	648,6	6,3
1 200	101,0	0,1	0,0135	0,0007	0,0062	0,0007	0,007	0,001	90,2	651,1	6,5
1 240	101,4	0,2	0,0177	0,0006	0,030	0,006	0,006	0,002	99,3	655,1	7,1
1 280	124,7	2,6	0,031	0,010	0,20	0,09	0,12	0,02	100,0	597,1	37,0
66-1 флогопит/силикокарбонатит										J=0,004509±0,000053	
500	348,1	61,2	0,3	0,2	1,9	0,9	1,3	0,3	0,1	0,0	545,1
800	134,6	1,5	0,037	0,005	20,7	0,5	0,13	0,01	2,6	643,7	21,2
900	101,6	0,3	0,015	0,001	4,0	0,1	0,017	0,002	17,3	651,9	7,6
950	97,3	0,1	0,014	0,001	0,04	0,01	0,007	0,001	36,9	644,4	6,6
1 000	97,2	0,2	0,016	0,002	0,03	0,02	0,009	0,002	46,5	639,8	7,2
1 100	99,3	1,0	0,012	0,003	0,05	0,07	0,03	0,01	49,7	619,8	19,1
1 175	95,1	0,6	0,014	0,001	0,03	0,02	0,007	0,005	64,3	632,3	10,5
1 250	95,8	0,1	0,0130	0,0005	0,007	0,005	0,0029	0,0009	100,0	642,7	6,6
50-2 флогопит/карбонатит										J=0,004473±0,000052	
550	188,2	8,5	0,04	0,02	0,4	0,3	0,46	0,05	0,3	372,2	88,6
850	106,5	0,8	0,007	0,006	0,24	0,03	0,066	0,007	2,5	592,5	14,4
920	101,5	0,2	0,018	0,002	0,018	0,004	0,015	0,002	10,8	650,5	7,3
980	100,2	0,1	0,012	0,001	0,005	0,004	0,006	0,001	28,0	657,5	6,6
1 030	100,4	0,1	0,014	0,001	0,004	0,003	0,006	0,001	40,8	659,1	6,8
1 080	99,5	0,1	0,0129	0,0004	0,006	0,002	0,008	0,001	54,3	651,5	6,6
1 125	101,2	0,2	0,0166	0,0007	0,000	0,007	0,011	0,002	63,5	656,3	7,2
1 175	100,3	0,2	0,0140	0,0004	0,008	0,000	0,005	0,001	86,3	659,6	6,7
1 215	103,1	0,3	0,013	0,001	0,001	0,003	0,014	0,002	93,4	661,7	7,7
1 260	104,2	0,2	0,014	0,001	0,017	0,003	0,014	0,002	100,0	667,7	7,3

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 $^{39}\text{Ar}$ , %	Возраст, млн лет	±
56-4 флогопит/щелочной сиенит										J=0,004457±0,000052	
500	393,4	31,6	0,16	0,07	1,1	0,5	0,8	0,1	0,2	1006,7	125,8
630	283,9	27,7	0,09	0,04	0,2	0,1	0,7	0,1	0,6	444,9	185,2
760	164,8	3,9	0,05	0,02	0,19	0,05	0,23	0,02	1,9	644,4	41,7
860	118,1	0,7	0,023	0,003	0,01	0,01	0,059	0,006	5,2	669,0	12,4
960	104,8	0,2	0,020	0,002	0,003	0,005	0,025	0,002	15,1	650,3	7,0
1 000	104,5	0,2	0,0145	0,0004	0,000	0,003	0,027	0,002	24,7	645,6	7,1
1 040	108,3	0,3	0,019	0,004	0,010	0,009	0,041	0,002	28,2	642,8	7,5
1 100	102,1	0,2	0,0171	0,0006	0,000	0,002	0,015	0,001	40,7	652,6	6,9
1 150	103,2	0,1	0,010	0,001	0,001	0,003	0,0250	0,0007	48,8	641,5	6,4
1 200	99,4	0,1	0,0132	0,0003	0,003	0,001	0,0099	0,0008	69,0	645,5	6,5
1 280	99,4	0,3	0,0162	0,0008	0,005	0,005	0,011	0,003	100,0	643,2	8,4

Примечание. Ошибки указаны с интервалом  $\pm 2\sigma$ .

Note. Errors are indicated with an interval of  $\pm 2\sigma$ .

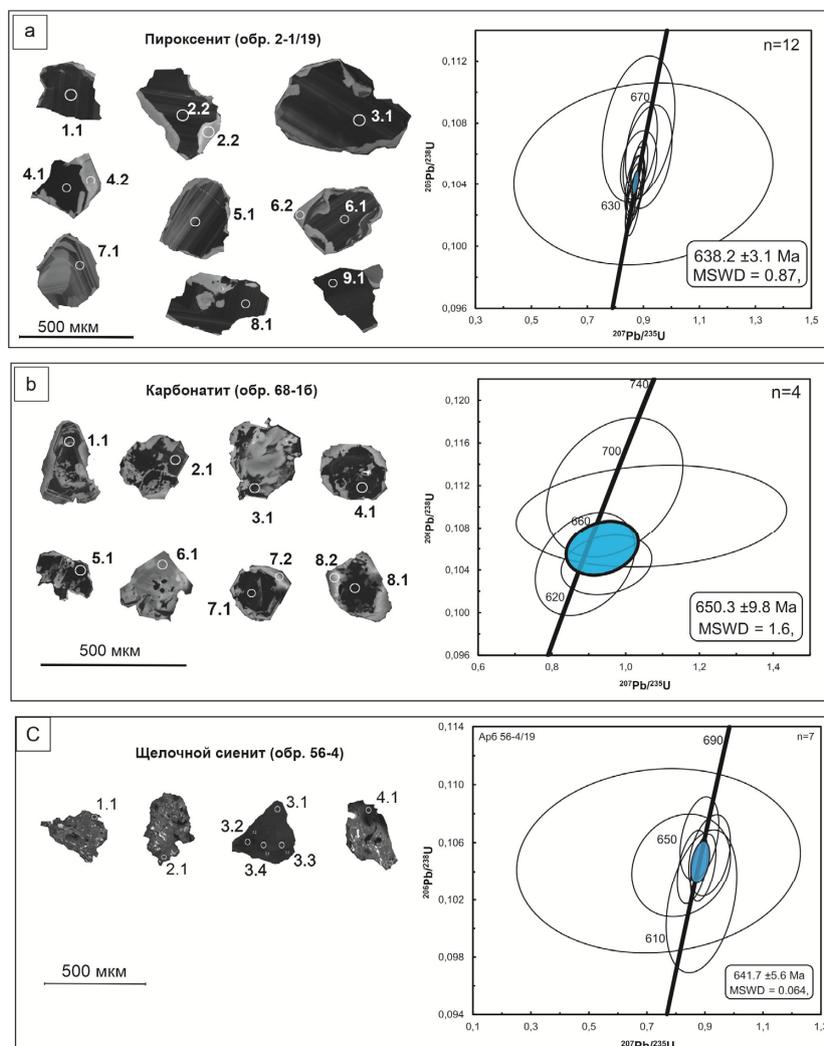


Рис. 4. Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования щелочных пород комплекса Арбарастах

Катодолуминесцентные фотографии исследуемых цирконов и диаграммы с конкордией для образцов: а – пироксенита (обр. 2-1/19); б – карбонатита (обр. 68-16); в – щелочного сиенита (обр. 56-4)

Fig. 4. Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of alkaline rocks of the Arbarastakh complex

Cathodoluminescent photographs of the studied zircons and diagrams with concordia for samples: а – pyroxenite (sample 2-1/19); б – carbonatite (sample 68-1b); в – alkaline syenite (sample 56-4)

Таблица 2

Table 2

## Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования пироксенита (обр. 2-1/19)

## Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of pyroxenite (sample 2-1/19)

№	% 206Pbc	г/г U	г/г Th	232Th/238U	г/г 206Pb*	206Pb/238U возраст	(1) 207Pb/206Pb возраст	% несогл. возраст	(1) 238U/206Pb* ±%	(1) 207Pb/206Pb* ±%	(1) 207Pb/206Pb* ±%	(1) 207Pb*/235U ±%	(1) 206Pb*/238U ±%	Ошибка корр.
1.1	0,00	147	245	1,72	13,1	634,6	4,6	0	9,666	0,76	0,06080	1,2	0,10346	0,5
2.1	0,00	152	210	1,43	13,7	643,2	4,7	0	9,53	0,76	0,06119	1,2	0,10493	0,5
2.2	0,00	7	4	0,56	0,603	659,0	11,0	-11	9,29	1,8	0,05950	5,7	0,1076	0,3
3.1	0,00	117	136	1,19	10,5	637,3	4,7	0	9,623	0,78	0,06100	1,3	0,10392	0,5
4.1	0,00	405	731	1,86	35,8	630,5	4,3	-2	9,732	0,72	0,06045	0,7	0,10276	0,7
4.2	2,48	11	96	9,13	1,01	642,0	14,0	6	9,55	2,3	0,06200	21,0	0,1047	0,1
5.1	0,00	118	134	1,17	10,6	637,4	4,8	-2	9,623	0,78	0,06057	1,4	0,10392	0,5
6.1	0,29	91	97	1,10	8,26	645,0	5,4	-2	9,502	0,88	0,06080	2,9	0,10524	0,3
6.2	0,00	15	6	0,40	1,4	648,2	8,0	8	9,45	1,3	0,06270	3,6	0,1058	0,3
7.1	0,00	35	32	0,94	3,17	652,2	6,6	-3	9,393	1,1	0,06080	2,4	0,1065	0,4
8.1	0,00	185	256	1,42	16,6	640,6	4,7	-2	9,571	0,77	0,06060	1,1	0,10448	0,6
9.1	0,00	208	460	2,28	18,3	629,4	4,6	2	9,75	0,76	0,06100	1,0	0,10257	0,6

Таблица 3

Table 3

## Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования карбоната (обр. 68-1б)

## Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of carbonate (sample 68-1b)

№	% 206Pbc	г/г U	г/г Th	232Th/238U	г/г 206Pb*	(1) 206Pb/238U возраст	(2) 206Pb/238U возраст	(3) 206Pb/238U возраст	(1) 207Pb/206Pb возраст	(1) 208Pb/232Th возраст	% несогл. возраст	Сум. 238U/206Pb	±%
8.1	8,32	750	6554	9	29,1	261,7	7,6	113	-695	222,7	-366	22,12	2,6
5.1	0,56	58	4150	74	4,42	547,3	5,5	582	571	578,4	4	11,22	0,98
2.1	9,42	1	644	452	0,132	585,0	44,0	464	2522	466,0	25	9,54	4,6
7.2	0,44	64	815	13	5,4	601,4	5,6	489	775	548,9	29	10,182	0,93
8.2	38,94	1	9	13	0,102	628,0	240,0	446	3260	543,0	420	5,96	5,2
7.1	0,62	42	1286	31	3,81	640,7	6,7	603	800	611,3	25	9,51	1
6.1	0,00	6	50	9	0,541	641,0	11,0	801	665	668,0	4	9,56	1,9
1.1	1,85	14	731	55	1,31	668,0	12,0	645	968	648,0	45	8,99	1,3
3.1	0,00	4	1288	359	0,356	683,0	15,0	632	705	633,0	3	8,94	2,4
4.1	0,92	9	1165	140	1,48	1163,0	18,0	312	1026	357,0	-12	5,011	1,6

Таблица 3 (продолжение)

Общ. $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm\%$	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	Ошибка корр.
0,1032	1,2	24,13	3	0,035	32	0,201	32	0,0414	3	0,1
0,0636	2,1	11,29	1	0,0591	5,3	0,722	5,4	0,0886	1	0,2
0,233	5,8	10,53	7,9	0,166	27	2,18	28	0,0949	7,9	0,3
0,0685	1,8	10,226	0,97	0,065	3,9	0,877	4	0,0978	0,97	0,2
0,502	5,7	9,8	41	0,26	87	3,7	96	0,1020	41	0,4
0,0708	2,1	9,57	1,1	0,0658	5,2	0,948	5,3	0,1045	1,1	0,2
0,0617	5,9	9,56	1,9	0,0617	5,9	0,89	6,2	0,1046	1,9	0,3
0,0864	3,3	9,16	1,8	0,0714	14	1,07	14	0,1091	1,8	0,1
0,0629	7,4	8,94	2,4	0,0629	7,4	0,97	7,8	0,1118	2,4	0,3
0,0812	2,4	5,057	1,7	0,0734	7,6	2	7,8	0,1977	1,7	0,2

Таблица 4

Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования щелочного сиенита (обр. 56-4)

Table 4

Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of alkaline syenite (sample 56-4)

№	% $^{206}\text{Pb}_c$	$\Gamma/\Gamma$ U	$\Gamma/\Gamma$ Th	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$\Gamma/\Gamma$ $^{206}\text{Pb}^*$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст <sup>(1)</sup>	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст <sup>(1)</sup>	% Несогл. возр.	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}^*$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^*$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ <sup>(1)</sup>	$\pm\%$	Ошибка корр.
1.1	2,71	7	107	15,78	0,647	642,0	264 ±620	-59	9,55	2,5	0,052	27	0,74	27	0,1047	2,5	0,1
2.1	0,00	8	44	6,06	0,66	625,0	715 ±110	14	9,82	2,0	0,0632	5,3	0,888	5,6	0,1019	2,0	0,3
3.1	0,90	21	37	1,79	1,93	640,1	485 ±180	-24	9,58	1,4	0,0568	8,4	0,818	8,5	0,1044	1,4	0,2
3.2	0,00	64	98	1,57	5,74	639,3	682 ±39	7	9,593	0,9	0,0622	1,8	0,894	2	0,1043	0,9	0,5
3.3	0,00	23	36	1,58	2,11	644,3	715 ±64	11	9,51	1,1	0,0632	3	0,916	3,2	0,1051	1,1	0,4
3.4	0,00	27	29	1,14	2,43	651,4	606 ±62	-7	9,41	1,1	0,0601	2,9	0,881	3,1	0,1063	1,1	0,4
4.1	0,11	30	78	2,69	2,7	639,4	588 ±49	-8	9,59	1,0	0,0596	2,3	0,857	2,5	0,1043	1,0	0,4

*U-Pb (SHRIMP II) исследования.* Для определения U-Pb возраста щелочных пород массива Арбарастах были датированы цирконы из образцов пироксенита (обр. 2-1/19), карбонатита (обр. 68-1б) и щелочного сиенита (обр. 56-4) (см. рис. 4). Цирконы в основном представлены обломками кристаллов размером 200–500 мкм; в катодоллюминесцентных изображениях прослеживается магматическая зональность (рис. 4). U-Pb изотопные данные и характер распределения тория, урана и величины Th/U приведены в табл. 2–4. Согласно полученным результатам, время кристаллизации образца пироксенита составляет  $638,2 \pm 3,1$  млн лет ( $n = 12$ ); возраст карбонатита показал интервал  $650,3 \pm 9,8$  млн лет ( $n = 4$ ), возраст щелочного сиенита составляет  $641,7 \pm 5,6$  млн лет ( $n = 7$ ) (рис. 4).

### Обсуждение результатов

Полученные данные Ar-Ar и U-Pb датирования по основным фазам щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса Арбарастах определяют интервал кристаллизации пород в период  $\sim 657$ – $636$  млн лет с молодой границей в  $626,5$  млн лет. При этом Ar-Ar и U-Pb значения для каждого из типов пород находятся в пределах ошибки каждого из методов. Полученные результаты коррелируют с предшествующими U-Pb геохронологическими данными  $630,5 \pm 5,7$  млн лет (U-Pb, циркон, ВСЕГЕИ, 2015) и  $656 \pm 5$  и  $653 \pm 9$  млн лет (U-Pb, циркон, бадделейт [Vladykin, Alymova, 2020]), которые также показывают широкий диапазон времени кристаллизации щелочных пород комплекса Арбарастах. Такой интервал значений возраста, вероятно, отражает достаточно длительную историю становления пород комплекса и характеризует многоимпульсное внедрение пород (рис. 5).

Тем не менее определенный возрастной интервал образования пород комплекса Арбарастах находится в пределах значений для других щелочных карбонатитовых комплексов, которые структурно тяготеют к краевым частям Сибирского кратона и характеризуются близкими типами редкометальных месторождений. Эти комплексы-месторождения прослеживаются на расстоянии более 3 000 км от Енисейского кряжа через юго-западный выступ кратона (Белая Зима, Тагна, Жидой) до Алданского щита (Ингили, Арбарастах) [Ярмолюк и др., 2005; Кузьмин, Ярмолюк, 2014].

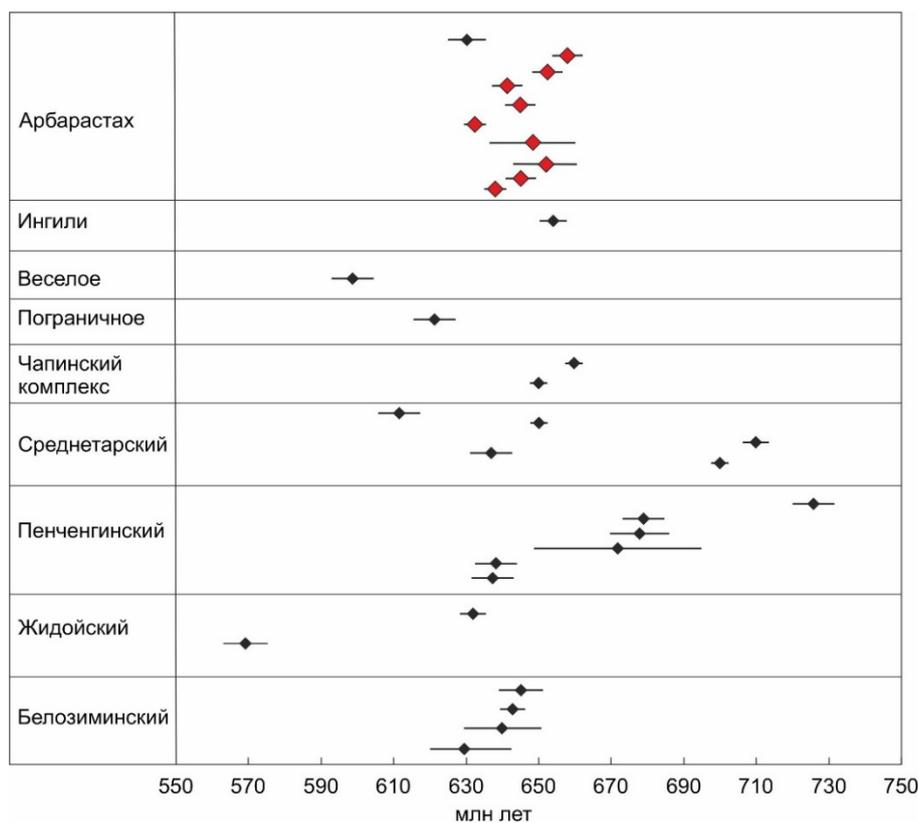
Так, например, ийолиты Жидойского комплекса и карбонатиты Ингилийского комплекса дают значения  $632 \pm 2$  и  $654 \pm 7$  млн лет соответственно [Ярмолюк и др., 2005], возрастной интервал в  $645$ – $643$  млн лет определен для пород комплекса Белая Зима [Ярмолюк и др., 2005; Doroshkevich et al., 2016; Salnikova et al., 2019; Хромова, Дорошкевич, Изброев, 2020]. Значения, по-

лученные для щелочных пород и карбонатитов Енисейского кряжа, также лежат во временном диапазоне  $725$ – $610$  млн лет [Врублевский и др., 2003, 2011; Верниковская и др., 2007; Сазонов и др., 2007; Ножкин и др., 2008]. Образование щелочно-ультраосновных пород чапинского комплекса произошло в интервале  $670$ – $650$  млн лет [Верниковская и др., 2007; Ножкин и др., 2008], а возраст карбонатитов Веселого и Пограничного проявлений (Северное Забайкалье) имеет значения  $645$ – $600$  млн лет [Рипп, Дорошкевич, Посохов, 2009].

Возрастной интервал формирования вышечисленных близковозрастных щелочных карбонатитовых комплексов согласуется с неопротерозойской эпохой крупномасштабного проявления внутриплитного магматизма на Сибирском кратоне, геодинамическая интерпретация которого неоднозначна.

С одной стороны, проявление магматизма западной окраины Сибирского кратона, представленного кислыми и основными породами и сопровождающегося интенсивным дайкообразованием, исследователи связывают с неопротерозойскими процессами растяжения вдоль западной окраины континента в обстановке активной континентальной окраины [Верниковская и др., 2007, 2013; Верниковский и др., 2008]. С другой стороны, бимодальный магматизм и гранитообразование Енисейского кряжа и Олоkitской зоны Байкальской складчатой области ( $700$ – $727$  млн лет) [Рыцк и др., 2002; Ножкин и др., 2008; Лиханов, Ревердатто, 2015], так же как дайковые пояса Саяно-Байкальского региона ( $780$ – $740$  млн лет) [Sklyarov et al., 2003; Гладкочуб и др., 2007] и платиноносные ультрамафит-мафитовые расслоенные массивы (Довыренский, Барбитайский и другие) (около  $720$  млн лет) [Ярмолюк и др., 2005; Кузьмин, Ярмолюк, 2014], рассматриваются в качестве индикаторов распада.

Стоит отметить, что временной диапазон распада исследователями оценивается неоднозначно. Начало раскола Родинии относят к рубежу  $1,1$ – $1,0$  млрд лет, а окончательный раскол оценивают периодом  $750$ – $600$  млн лет [Meert, Poweel, 2001; Метелкин, Верниковский, Казанский, 2007; Li, Zhong, 2009; Добрецов, 2011; Кузьмин, Ярмолюк, 2014; Гордиенко, 2019 и другие]. В любом случае, исследователи [Ярмолюк и др., 2005; Ножкин и др., 2008; Врублевский и др., 2011; Кузьмин, Ярмолюк, 2014] полагают, что суперплюм, обусловивший распад суперконтинента Родиния, в составе которой находилась Сибирь, зародился в слое D" и определил формирование вдоль рифтовых зон, проявленных при расколе суперконтинента, ультраосновных щелочных карбонатитовых комплексов, ответственных за редкометальное (Nb, Ta, редкоземельные элементы) оруденение, а также ультрамафит-мафитовые расслоенные интрузии с Cu-Ni-Pt оруденением.



**Рис. 5. Результаты датирования щелочных пород комплекса Арбарастах (красным показаны новые данные) в сравнении с геохронологическими данными по близковозрастным щелочным комплексам краевых частей Сибирского кратона**

См. описание в тексте. На диаграмме данные Ярмолук и соавт. [2005], Кузьмин, Ярмолук [2014], Doroshkevich et al. [2016], Salnikova et al. [2019], Хромова и др. [2020], Врублевский и соавт. [2003, 2011]; Сазонов и соавт. [2007]; Верниковская и соавт. [2007]; Ножкин и соавт. [2008]; Рипп и соавт. [2009]

**Fig. 5. Results of dating of alkaline rocks of the Arbarastakh complex (new data are shown in red) in comparison with geochronological data on close-aged alkaline complexes of the marginal parts of the Siberian Craton**

See description in the text. Data from Yarmolyuk [2005] on the diagram; Kuzmin, Yarmolyuk [2014], Doroshkevich et al. [2016], Salnikova et al. [2019], Khromova et al. [2020], Vrublevsky et al. [2003, 2011], Sazonov et al. [2007], Vernikovskaya et al. [2007], Nozhkin et al. [2008], Ripp et al. [2009]

Последующие исследования щелочных пород комплекса Арбарастах геохимическими и изотопно-геохимическими методами позволят нам соотнести процессы становления массива с геодинамической обстановкой, проявленной в данном регионе на Сибирском кратоне в период 640–655 млн лет. Учитывая ниобиевую специфику карбонатитов Арбарастаха, наиболее вероятно предполагать рифтогенную обстановку становления щелочного комплекса, связанную с расколом суперконтинента Родиния.

### Заключение

Геохронологические исследования щелочных пород щелочно-ультраосновного карбонатитового комплекса Арбарастах отражают достаточно дли-

тельную историю становления комплекса и характеризуют многостадийное внедрение пород. Результаты Ar-Ar датирования показали время кристаллизации основной фазы массива – пироксенитов (якупирангитов) –  $632,5 \pm 6$  млн лет; щелочные сиениты имеют возраст  $645,9 \pm 6,4$  млн лет. Время внедрения силикокарбонатитов составляет  $642,6 \pm 6,6$  млн лет; образование карбонатитов происходило в диапазоны  $651 \pm 6$  и  $657,8 \pm 6,5$  млн лет. Данные U-Pb датирования пироксенитов показали возраст  $638,2 \pm 3,1$  млн лет, время внедрения карбонатитов –  $650,3 \pm 9,8$  млн лет, возраст кристаллизации щелочного сиенита составляет  $641,7 \pm 5,6$  млн лет.

Таким образом, определенный возрастной интервал образования пород комплекса Арбарастах составляет ~ 657–636 млн лет, что находится в преде-

лах значений для других щелочных карбонатитовых комплексов, которые структурно тяготеют к краевым частям Сибирского кратона, и характеризуются близкими типами редкометальных месторождений.

### Список источников

- Врублевский В.В., Покровский Б.Г., Журавлев Д.З., Аношин Г.Н.** Вещественный состав и возраст пенченгинского линейного комплекса карбонатитов, Енисейский кряж // Петрология. 2003. Т. 11, № 2. С. 145–163.
- Врублевский В.В., Ревердатто В.В., Изох А.Э., Гертнер И.Ф., Юдин Д.С., Тишин П.А.** Неопротерозойский карбонатитовый магматизм Енисейского кряжа, центральная Сибирь:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  – геохронология пенченгинского комплекса // Доклады Академии наук. 2011. Т. 437, № 4. С. 514–519.
- Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Травин А.В., Вингейт М.Т.Д.** Лейкогранитный магматизм А-типа в эволюции континентальной коры западного обрамления Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 1. С. 5–21.
- Верниковская А.Е., Даценко В.М., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Лаевский Ю.М., Романова И.В., Травин А.В., Воронин К.В., Лепехина Е.Н.** Эволюция магматизма и карбонатит-гранитная ассоциация в неопротерозойской активной континентальной окраине сибирского кратона: термохронологические реконструкции // Доклады Академии наук. 2013. Т. 448, № 5. С. 555–562.
- Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б. и др.** Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // Доклады Академии наук. 2008. Т. 419, № 1. С. 90–94.
- Глаголев А.А., Корчагин А.М., Харченков А.Г.** Щелочно-ультраосновные массивы Арбарастах и Инагли. М.: Наука, 1974. 174 с.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Складчиков Е.В., Пономарчук В.А.** Комплексы-индикаторы процессов растяжения на юге Сибирского кратона в докембрии // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 1. С. 22–41.
- Гордиенко И.В.** Связь субдукционного и плюмового магматизма на активных границах литосферных плит в зоне взаимодействия Сибирского континента и палеоазиатского океана в неопротерозое и палеозое // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10, № 2. С. 405–457.
- Горошко М.В., Гурьянов В.А.** Уран-редкометальное оруденение в массивах ультраосновных щелочных пород юго – востока Сибирской платформы // Тихоокеанская геология. 2004. Т. 23, № 2. С. 76–91.
- Добрецов Н.Л.** Раннепалеозойская тектоника и геодинамика Центральной Азии: роль раннепалеозойских мантийных плюмов // Геология и геофизика. 2011. № 12. С. 1957–1973.
- Зленко Н.Д.** Позднесинийские интрузии центрального типа восточной окраины Алданского щита // Труды ВАГТ. 1961. Вып. 7. С. 66–73.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.** Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. 2014. № 2. С. 153–184.
- Лиханов И.И., Ревердатто В.В.** Неопротерозойские комплексы – индикаторы континентального рифтогенеза как свидетельство процессов распада Родинии на западной окраине Сибирского кратона // Геохимия. 2015. № 8. С. 675–694.
- Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю.** Неопротерозойский этап эволюции Родинии в свете новых палеомагнитных данных по западной окраине Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 1. С. 42–59.
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Баянова Т.Б., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Постников А.А., Травин А.В., Эрнст Р.Е.** Неопротерозойский рифтогенный и внутриплитный магматизм Енисейского кряжа как индикатор процессов распада Родинии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 7. С. 666–688.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И.** Тектоника, геодинамика и металлогения территории республика Саха (Якутия). М.: Наука, 2001. 570 с.
- Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Посохов В.Ф.** Возраст карбонатитового магматизма Забайкалья // Петрология. 2009. Т. 17, № 1. С. 79–96
- Рыцк Е.В., Шалаев В.С., Ризванова Н.Г., Крымжий Р.Ш., Манев А.Ф., Рилс Г.В.** Олоkitская зона Байкальской складчатой области: новые изотопно-геохронологические и петрогеохимические данные // Геотектоника. 2002. № 1. С. 29–41
- Сазонов А.М., Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Федорова А.В., Гавриленко В.В., Звягина Е.А., Леонтьев С.И.** Заангарский щелочной интрузив, Енисейский кряж: Rb-Sr Sm-Nd изотопный возраст пород и источники фельдшпатоидных магм в позднем докембрии // Доклады Академии наук. 2007. Т. 413, № 6. С. 798–802.
- Травин А.В.** Термохронология субдукционно-коллизийных. коллизийных событий Центральной Азии : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2016.
- Хромова Е.А., Дорошкевич А.Г., Избродин И.А.** Геохимическая и Sr-Nd-Pb характеристики щелочных пород и карбонатитов Белозиминского массива (Восточный Саян) // Геосферные исследования. 2020. № 1. С. 33–55. DOI: 10.17223/25421379/14/3
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В.** Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2005. Т. 404, № 3. С. 400–406.
- Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E.** Intercalibration of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating standards // Chemical Geology. 1996. V. 129. P. 307–324.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology // Chem. Geol. 2003. V. 200. P. 155–170. doi: 10.1016/S0009-2541(03)00165-7**
- Dalton J.A., Wood B.J.** The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle // Earth and Planetary Science letters 1993. V. 119. P. 511–525.

- Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladyskin N.V.** Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V. 26. P. 81–96.
- Ernst R.E., Bell K.** Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. P. 55–76. doi: 10.1007/s00710-009-0074-1
- Ernst R.E., Davies D.R., Jowitt S.M., Campbell I.H.** When do mantle plumes destroy diamonds? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 502. P. 244–252. doi: 10.1016/j.epsl.2018.08.058
- Guzmics T., Zajacz Z.** Trace element partitioning between immiscible silicate and carbonate melts, based on natural melt inclusions from Kerimasi volcano, Tanzania. *Goldschmidt Conference Abstracts*. 2013. P. 1238.
- Hamilton D.L., Kjasgaard B.A.** The immiscibility of silicate and carbonate liquids // *The South African Journal of Geology*. 1993. V. 96 (3). P. 139–142.
- Kogarko L.N., Kononova V.A., Orlova M.P., Woolley A.R.** Alkaline Rocks and Carbonatites of the World. Part Two: Former USSR, London: Chapman & Hall, 1995.
- Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A.** Mineralogy of the Arbarastakh Complex (Republic of Sakha, Yakutia, Russia) // *Minerals*. 2021. V. 11. P. 556. doi: 10.3390/min11060556
- Le Bas M.J.** Nephelinitite and Carbonatite // *Alkaline Igneous Rocks*, Geological Society. Special Publications. London, 1987. V. 30. P. 53–83.
- Li Z.X., Zhong S.** Supercontinent–superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole–mantle tectonics // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2009. V. 176. P. 143–156.
- Ludwig, K.R.** User’s manual for Isoplot/Ex, version 2.10, a geochronological toolkit for microsoft excel // Berkeley Geochronology Center Special Publication. Berkeley, 1999.
- Ludwig, K.R.** SQUID 1.00, A User’s Manual // Berkeley Geochronology Center Special Publications. Berkeley, 2000.
- Meert J.G., Powell C. McA.** Assembly and break–up of Rodinia: introduction to the special volume // *Precambrian Research*, Special Issue. 2001. V. 110. P. 1–8.
- Mitchell R.H.** Mineralogical and experimental constraints on the origin of niobium mineralization in carbonatites // *Geol. Assoc. Can., Short Course Notes*. 2005. No. 17. P. 201–216.
- Mitchell R.H.** Sylvite and fluorite microcrysts, and fluorite–nyerereite intergrowths from natrocarbonatite, Oldoinyo Lengai, Tanzania // *Mineralogical Magazine*. 2006. V. 70. P. 103–114.
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Redina A.A., Obukhov A.V.** Magnetite-apatite-dolomitic rocks of Ust-Chulman (Aldan shield, Russia): Seligdar – type carbonatites? // *Mineralogy and Petrology*. 2017. V. 112. P. 257–266. doi: 10.1007/s00710-017-0534-y
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Zhumadilova D.V., Starikova A.V.** Petrogenesis of Zr-Nb (REE) carbonatites and phosphorites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia); mineralogy and inclusion data // *Ore geology Reviews*. 2021. V. 131 (2). P. 104042. doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104042
- Rock N.M.S.** The nature and origin of ultramafic lamprophyres: alnöites and allied rocks // *Journal of Petrology*. 1986. V. 27. P. 155–196. doi: 10.1093/petrology/27.1.155
- Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V.** Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // *Lithos*. 2019. V. 338. P. 141–154.
- Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Menshagin Yu.V., Watanabe T., Pisarevsky S.A.** Neoproterozoic mafic dike swarms of the Sharyzhalgai metamorphic massif (southern Siberian craton) // *Precambrian Research*. 2003. V. 22. P. 359–377
- Steiger R.H., Jager E.** Subcommittee on geochronology; Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth and Planetary Science Letters*. 1977. V. 36. P. 359–362.
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjasgaard B.A.** Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications // *Journal of Petrology*. 2005. V. 46, No. 9. P. 1893–1900.
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A. et al.** Genesis of ultramafic lamprophyres and carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a consequence of incipient lithospheric thinning beneath the North Atlantic Craton // *Journal of Petrology*. 2006. V. 47. P. 1261–1315. doi: 10.1093/petrology/egl008
- Vladyskin N.V., Alymova N.** The Zhidoy massif of ultrabasic – alkaline rocks and carbonatites: its geochemical features, sources and ore potential // EGU General Assembly. 2020. doi: 10.5194/egusphere-egu2020-8776
- Williams J.S.** U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Application of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // *Reviews in Economic Geology*. 1998. V. 7. P. 1–35. doi: 10.5382/Rev.07.01

## References

- Vrublevskii V.V., Pokrovskii B.G., Juravlev D.Z., Anoshin G.N. *Veshchestvennui sostav I vozrast penchenginskogo lineinogo kompleksa karbonatitov, Eniseiskui kruaj* [Composition and age of the Penchenga Linear carbonatite complex, Yenisei Range] // *Petrologia* [Petrology]. 2003. V. 11, No. 2. pp. 145–163. In Russian
- Vrublevskii V.V., Revirdatto V.V., Izoh A.E., Gertner I.F., Udin D.C., Tishin P.A. *Neoproterozoiskui karbonatitovui magmatizm Eniseiskogo kryaja, central'naya Sibir'*:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  – geochronologia penchenginskogo kompleksa [Neoproterozoic carbonatite magmatism of the yenisei ridge, central siberia:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of the Penchenga rock complex] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady of Earth Sciences]. 2011. V. 437, No. 4. pp. 514–519. In Russian
- Vernikovskaya A.E., Vernikovskii V.A., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Kovach V.P., Travin A.V., Vingeit M.T.D. *Leikogranitovui magmatizm A- tipa v evolucii kontinental'noi koru zapadnogo obramlenia Sibirskogo kratona* [Leucogranite A-type magmatism in the evolution of the continental crust on the Western framing of the Siberian Craton] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2007. V. 48, No. 1. pp. 5–21. In Russian
- Vernikovskaya A.E., Dacenko V.M., Vernikovskii V.A., Matushkin N.U., Laevskii U.M., Romanova I.V., Travin A.V., Voronin K.V., Lepehina E.N. *Evolucia magmatizma i karbonatit – granitnaya asociacia v neoproterozoiskoi aktivnoi kontinental'noi okraïne*

*sibirskogo kratona : termohronologicheskie rekonstrukcii* [Magmatism evolution and carbonatite-granite association in the Neoproterozoic active continental margin of the Siberian Craton: thermochronological reconstructions] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady of Earth Sciences], 2013. V. 448, No. 5. pp. 555–562. In Russian

Vernikovskii V.A., Vernikovskii A.E., Sal'nikova E.B. et al. *Pozdnerifeiskui shelochnoi magmatizm zapadnogo obramlenia Sibirskogo kratona: rezultat kontinental'nogo riftogeneza ili akkrecionnuh cobutui?* [Late Riphean alkaline magmatism in the Western Margin of the Siberian Craton: a result of continental rifting or accretionary events?] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady of Earth Sciences]. 2008. V. 419, No. 1. pp. 90–94. In Russian

Glagolev, A.A., Korzhagin, A.M. and Kharchenkov, A.G., *Shelochno-ultraosnovnue massivu Arbarastakh I Inagli*// Nauka, Moscow. 1974. 175 pp. In Russian

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V., Ponomarchuk V.A. *Kompleksu – indikatoru processov rastyagenuia na uge Sibirskogo kratona v dokembrii* [Signature of Precambrian extension event in the Southern Siberian craton] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2007. V. 48, No. 1. pp. 22–41. In Russian

Gordienko I.V. Relationship between subduction-related and plume magmatism at the active boundaries of lithospheric plates in the interaction zone of the Siberian Continent and Paleasian Ocean in the Neoproterozoic and Paleozoic // *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics]. 2019. V. 10, No. 2. pp. 405–457. In Russian

Goroshko M.V., Gur'yanov V.A. *Uran-redkometal'noe orudeneie v massivah ultraosnovnuh shelochnuh porod – ugo vostoka Sibirskoi platform* // *Tihookenskaya geologiya*. 2004. V. 23. No. 2. pp. 76–91. In Russian

Dobrecov N.L. *Rannepaleozoiskaya tektonika i geodinamika Central'noi Azii: rol' rannepaleozoiskui manuinih plumov* [Early Paleozoic Tectonics and Geodynamics of Central Asia: The Role of Early Paleozoic Mantle Plumes] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2011. No. 12. pp. 1957–1973. In Russian

Zlenko N.D. *Pozdnesunusuiskie intruzii centralnogo tipa vostochnoi okraunu Aldanskogo shita* // *Trudu VAGT*. 1961. V. 7. pp. 66–73. In Russian

Kuz'min M.I., Yarmoluk V.V. *Mantuinue plumu Severo – Vostochnoi Azii I ih rol' v formirovanii endogennuh mestorojdenii* [Mantle plumes of Northeastern Asia and their role in the formation of endogenous deposits] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2014. No.2. pp. 153–184. In Russian

Lihanov I.I., Reverdatto V.V. *Neoproterozoiskue kompleksu – indikatoru kontinental'nogo riftogeneza, kak svidel'stvo kak svidel'stvo processov raspada Rodinii na zapadnoi okraine Sibirskogo kratona* [Evidence of Middle Neoproterozoic extensional tectonic settings along the western margin of the Siberian Craton: implications for the breakup of Rodinia] // *Geohimia* [Geochemistry International]. 2015. No. 8. pp. 675–694. In Russian

Metelkin D.V., Vernikovskii V.A., Kazanskii A.U. *Neoproterozkui etap evolucii Rodinii v svete novuh paleomagnetnuh dannuh po zapadnoi okraine Sibirskogo kratona* [The Neoproterozoic stage of Rodinia evolution based on new paleomagnetic data from the western margin of the Siberian Craton] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2007. V. 48, No. 1. pp. 42–59. In Russian

Nojkin A.D., Turkina O.M., Bayanova T.B., Berejnaya N.G., Larionov A.N., Postnikov A.A., Travin A.V., Ernst R.E. *Neoproterozoiskui riftogennui i vnutripoinui magmatizm Eniseiskogo kryaga kak indikator processov raspada Rodinii* [Neoproterozoic rift and within-plate magmatism in the Yenisei Ridge: implications for the breakup of Rodinia] // *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics]. 2008. V. 49, No. 7. pp. 666–688. In Russian

Parfenov L.M., Kuzmin M.I. *Tektonika, geodinamika u metallogenia territorii respublika Saha (Yakutia)*. Moscow, Science. 2001. 570 p. In Russian

Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Posohov V.F. *Vozrast karbonativogo magmatizma Zabaikalia* [Age of carbonatite magmatism in Transbaikalia] // *Petrologia* [Petrology]. 2009. V. 17, No. 1. pp. 79–96. In Russian

Ruzk E.V., Shalaev V.C., Rizanova N.G., Krumjui R.Sh., Maneev A.F., Rils G.V. *Olokitskaya zona Baikal'skoi skladchatoi oblasti: novue izotopno – geocronologicheskie e petrogeochimicheskie dannue* [Olokit zone of the Baikal folded region: new isotope-geochronological and petrogeochemical data] // *Geotektonika* [Geotectonics]. 2002. No. 1. pp. 29–41. In Russian

Sazonov A.M., Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Fedorova A.V., Gavrilenko V.V., Zvyagina E.A., Leont'ev C.I. *Zaangarskui shelochnoi intruziv, Eniseiskui kryaj: Rb-Sr-Sm-Nd izotopni vozrast porod I istochniki feldspatoidnuh magm v pozdnem dokembrii* [The Transangara alkaline pluton, Yenisei Range: Rb-Sr And Sm-Nd isotope ages and sources of feldspathoid magmas In Late Precambrian] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady of Earth Sciences]. 2007. V. 413, No. 6. pp. 798–802. In Russian

Travin A.V. *Termochronologia subdukcionno – kollizionnuh sobutui Central'noi Azii* [Thermochronology of subduction-collision. collisional events in Central Asia] // *Avtoreferat disertacii na soiskanie uchenoi stepeni doktora geologo mineralogicheskukh nauk* [Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences]. Novosibirsk, 2016. In Russian

Hromova E.A., Doroshkevich A.G. Izbrodin I.A. *Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of alkaline rocks and carbonatite of the Belaya Zima Massif (Eastern Sayan)* // *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2020. 1. pp.33–55. Doi: 10.17223/25421379/14/3. In Russian

Yarmoluk V.V., Kovalenko V.I., Sal'nikova E.B., Nikiforov A.V., Kotov A.B., Vladukin N.V. *Pozdnerifeiskui riftogenez I raspad Lavrazii: dannue geochronologicheskukh issledovanui chelochno – ultraosnovnuh kompleksov ujnogo obramleniia Sibirskoi platformu* [Late Riphean rifting and breakup of Laurasia: data from geochronological studies of alkaline-ultrabasic complexes in the southern framing of the Siberian Platform] // *Doklady Akademii nauk* [Doklady of Earth Sciences]. 2005. V. 404, No. 3. pp. 400–4006. In Russian.

Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E. Intercalibration of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating standards// *Chemical Geology* 1996. V. 129. pp. 307–324.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem. Geol.* 2003. V.200. pp.155–170. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7).

Dalton J.A., Wood B.J. The compositions of primary carbonate melts and their evolution through wallrock reaction in the mantle // *Earth and Planetary Science letters*. 1993. V. 119. pp. 511–525.

Doroshkevich A.G., Veksler I.V., Izbrodin I.A., Ripp G.S., Khromova E.A., Posokhov V.F., Travin A.V., Vladukin N.V. Stable isotope composition of minerals in the Belaya Zima plutonic complex, Russia: Implications for the sources of the parental magma and metasomatizing fluids // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2016. V. 26. pp. 81–96.

- Ernst R.E., Bell K. Large igneous provinces (LIPs) and carbonatites // *Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 98. pp. 55–76. <https://doi.org/10.1007/s00710-009-0074-1>
- Ernst R.E., Davies D.R., Jowitt S.M., Campbell I.H. When do mantle plumes destroy diamonds? // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 502. pp. 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.08.058>
- Guzmics, T., Zajacz, Z. Trace element partitioning between immiscible silicate and carbonate melts, based on natural melt inclusions from Kerimasi volcano, Tanzania. Goldschmidt Conference Abstracts. 2013. 1238.
- Hamilton D.L., Kjasgaard B.A. The immiscibility of silicate and carbonate liquids // *The South African Journal of Geology*. 1993. V. 96 (3). pp. 139–142.
- Kogarko L.N., Kononova V.A., Orlova M.P., and Woolley A.R. *Alkaline Rocks and Carbonatites of the World*. Part Two: Former USSR. London: etc.: Chapman & Hall, 1995.
- Kruk M.N., Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izbrodin I.A. Mineralogy of the Arbarastakh Complex ( Republic of Sakha, Yakutia, Russia) // *Minerals*. 2021. V. 11, 556. doi: 10.3390/min11060556
- Le Bas M.J. Nephelinitite and Carbonatite // *Alkaline Igneous Rocks*, Geological Society. Special Publications. London. 1987. V. 30. pp. 53–83.
- Li Z.X., Zhong S. Supercontinent–superplume coupling, true polar wander and plume mobility: plate dominance in whole–mantle tectonics // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2009. V. 176. pp.143–156.
- Ludwig K.R. User’s manual for Isoplot/Ex, version 2.10, a geochronological toolkit for microsoft excel// Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley. 1999.
- Ludwig K.R. SQUID 1.00, A User’s Manual // Berkeley Geochronology Center Special Publications, Berkeley. 2000.
- Meert J.G., Powell C. McA. Assembly and break–up of Rodinia: introduction to the special volume // *Precambrian Research*, Special Issue. 2001. V.110. pp. 1–8.
- Mitchell R.H. Mineralogical and experimental constrains on the origin of niobium mineralization in carbonatites // In Rare Element Geochemistry and Mineral Deposits R.L. Linnen & I.M. Samson, eds.). *Geol. Assoc. Can., Short Course Notes*. 2005. N. 17. pp. 201–216.
- Mitchell R.H. Sylvite and fluorite microcrysts, and fluorite–nyerereite intergrowths from natrocarbonatite, Oldoinyo Lengai, Tanzania // *Mineralogical Magazine*. 2006. V. 70. pp. 103–114.
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Redina A.A., Obukhov A.V. Magnetite-apatite-dolomitic rocks of Ust-Chulman (Aldan shield, Russia): Seligdar – type carbonatites? // *Mineralogy and Petrology*. 2017. V. 112. pp. 257–266. doi: 10.1007/s00710-017-0534-y
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Zhumadilova D.V., Starikova A.V. Petrogenesis of Zr-Nb (REE) carbonatites and phosphorites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia); mineralogy and inclusion data // *Ore geology Reviews*. 2021. V. 131 (2). 104042 doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104042
- Rock N.M.S. The nature and origin of ultramafic lamprophyres: alnöites and allied rocks // *Journal of Petrology*. 1986. V. 27. pp. 155–196. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.1.155>
- Salnikova E.B., Chakhmouradian A.R., Stifeeva M.V., Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Y.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // *Lithos*. 2019. V. 338. pp. 141–154.
- Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Menshagin Yu.V., Watanabe T., Pisarevsky S.A. Neoproterozoic mafic dike swarms of the Sharyzhalgai metamorphic massif (southern Siberian craton) // *Precambrian Research*. 2003. V. 22. pp. 359–377.
- Steiger R.H., Jager E. Subcommission on geochronology; Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth and Planetary Science Letters*. 1977. V. 36. pp. 359–362.
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A., Kjasgaard B.A. Integrating Ultramafic Lamprophyres into the IUGS Classification of Igneous Rocks: Rationale and Implications // *Journal of Petrology*. 2005. V. 46. No. 9. pp. 1893–1900.
- Tappe S., Foley S.F., Jenner G.A. et al. Genesis of ultramafic lamprophyres and carbonatites at Aillik Bay, Labrador: a consequence of incipient lithospheric thinning beneath the North Atlantic Craton // *Journal of Petrology*. 2006. 47. pp. 1261–1315. doi: 10.1093/petrology/egl008
- Vladykin N.V., Alymova N. The Zhidoy massif of ultrabasic – alkaline rocks and carbonatites: its geochemical features, sources and ore potential // EGU General Assembly. 2020. doi: 10.5194/egusphere-egu2020-8776
- Williams J.S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. Application of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // *Reviews in Economic Geology*. 1998. V. 7. pp. 1–35. doi: 10.5382/Rev.07.01

#### Информация об авторах:

**Прокопьев И.Р.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; старший преподаватель, кафедра петрографии и геологии рудных месторождений, геолого-геофизический факультет, Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия.

E-mail: prokorev\_ilya@mail.ru

**Дорошкевич А.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

**Пономарчук А.В.**, младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: aponomar@igm.nsc.ru

**Крук М.Н.**, младший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: krukmn@igm.nsc.ru

**Избродин И.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: izbrodin@ginst.ru

**Владыкин Н.В.** доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors:**

**Prokopyev I.R.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Senior Lecturer, Department of Petrography and Geology of Ore Deposits, Faculty of Geology and Geophysics, Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia.

E-mail: prokopyev\_ilya@mail.ru

**Doroshkevich A.G.**, Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

Email: doroshkevich@igm.nsc.ru

**Ponomarchuk A.V.**, Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: aponomar@igm.nsc.ru

**Kruk M.N.**, Junior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: krukmn@igm.nsc.ru

**Izbrodin I.A.**, Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

E-mail: izbrodin@ginst.ru

**Vladykin N.V.** Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Laboratory, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia.

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 28.06.2021; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 06.11.2022*

*The article was submitted 28.06.2021; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 06.11.2022*