

ПЕТРОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 550.93:552.3

doi: 10.17223/25421379/24/1

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ ПОРОД ПИРОКСЕНИТОВЫХ МАССИВОВ Р. ХАНИ (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ)

Анна Геннадьевна Дорошкевич¹, Виктор Викторович Шарыгин²,
Антон Викторович Пономарчук³, Андрей Эмильевич Изох⁴,
Иван Александрович Избродин⁵, Елизавета Анатольевна Зубакова⁶,
Илья Романович Прокопьев⁷, Сергей Андреевич Сергеев⁸



^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

¹ Геологический институт им. Н.Л. Добрецово СО РАН, Улан-Удэ, Россия

^{4, 6, 7} Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

⁸ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

¹ doroshkevich@igm.nsc.ru

² sharygin@igm.nsc.ru

³ antponomar@gmail.com

⁴ izokh@igm.nsc.ru

⁵ izbrodin@ginst.ru

⁶ zybakovaea@igm.nsc.ru

⁷ prokop@igm.nsc.ru

⁸ Sergey_Sergeev@vsegei.ru

Аннотация. Представлены новые данные о возрасте пород пироксенитовых массивов р. Хани, расположенных в Каларской зоне тектонического меланжа (Алдано-Становой щит). Полученный U-Pb возраст по ксеногенному циркону (2,69–2,68 и 2,01 млрд лет) совпадает с этапами интенсивных магматических и метаморфических событий на Алдано-Становом щите, а U-Pb возраст по титанитам и Ar-Ar возраст по флогопитам (1,88–1,81 млрд лет) – с периодом позднепалеопротерозойских (1,9–1,8 млрд лет) постколлизийных магматических процессов в южной части Сибирского кратона.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит, Ar-Ar и U-Pb датирование, палеопротерозой, клинопироксениты, оливинно-вые клинопироксениты, клинопироксен-карбонат-полевошпатовые породы

Источник финансирования: петрографические и геохронологические исследования выполнены за счет средств гранта РНФ № 19-17-00019. Геология района изучена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН (FWZN-2022-0024, № 0330–2016–0013) и ГИН СО РАН (AAAA-A16-116122110027-2).

Для цитирования: Дорошкевич А.Г., Шарыгин В.В., Пономарчук А.В., Изох А.Э., Избродин И.А., Зубакова Е.А., Прокопьев И.Р., Сергеев С.А. Новые данные о возрасте пород пироксенитовых массивов р. Хани (Алдано-Становой щит) // Геосферные исследования. 2022. № 3. С. 6–26. doi: 10.17223/25421379/24/1

Original article

doi: 10.17223/25421379/24/1

NEW AGE DATA FOR ROCKS OF KHANI INTRUSIONS (ALDAN-STANOVVOY SHIELD)

Anna G. Doroshkevich¹, Viktor V. Sharygin², Anton V. Ponomarchuk³, Andrey E. Izokh⁴,
Ivan A. Izbrodin⁵, Elizaveta A. Zubakova⁶, Ilya R. Prokopyev⁷, Sergey A. Sergeev⁸

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

¹ Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

^{4, 6, 7} Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

⁸ A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia

¹ doroshkevich@igm.nsc.ru

² sharygin@igm.nsc.ru

³ antponomar@gmail.com

⁴ izokh@igm.nsc.ru

⁵ izbrodin@ginst.ru

⁶ zybakovaea@igm.nsc.ru

⁷ prokop@igm.nsc.ru

⁸ S ergey_Sergeev@vsegei.ru

Abstract. The Khani intrusions are located within the Kalar tectonic melange zone on the Aldan-Stanovoy shield (Republic of Sakha Yakutia, Russia). The intrusions are Kabykhanyr, Ukduska, Yus-Kyuel, Anomalnoe areas that have a similar geological structure. The bodies are composed mainly of clinopyroxenites. Clinopyroxene-feldspar and clinopyroxene-carbonate-feldspar rocks are widespread in the contact zone (50–150 meters thick) with host granite-gneisses. Published geochronological data of the rocks from the Khani intrusions, which are key to understanding the Precambrian geological history of the Aldan-Stanovoy Shield, are contradictory. The U-Pb zircon age from the Khani olivine lamproite dike (olivine-mica clinopyroxenite), which crosscuts pyroxenites, is 2702 ± 12 Ma. On the other hand, the age of pyroxenites determined by Pb-Pb (apatite) and K-Ar (amphibole) methods is 1850 ± 20 Ma and 1870 ± 50 Ma, respectively. This information determines the necessity of new dating.

The paper presents new geochronological (U-Pb SHRIMP II, Ar-Ar) data on the age of clinopyroxenites, olivine-mica clinopyroxenites, and clinopyroxene-carbonate-feldspar rocks of the Kabakhanyr and Ukduska bodies.

The ages obtained for xenogenic zircon (2.69–2.68 Ga) coincide with the stage (2.6–2.4 Ga) of intense granulite metamorphism, accompanied by the processes of granitization and migmatization, the formation of numerous intrusions of enderbites (2627 ± 16 Ma) and charnockites (2614 ± 7 Ma), intrusion of the Kalar complex ($2611 \pm 38 - 2623 \pm 23$ Ma). The obtained age of zircon rims (2.01 billion years) from clinopyroxenites is close in time to the processes of granite formation and metamorphism of previously formed igneous rocks. This period (2.04–1.92 Ga) marks the collision of the Aldan and Stanovoy microcontinents and the orogeny processes of the Aldan granulite-gneiss area.

Age values for titanite and phlogopite, which were formed in the magmatic stage (according to petrographic observations), are in the range of 1.88–1.81 Ga, and they characterize the time of crystallization of rocks. The obtained age for titanite and phlogopite from clinopyroxenites, olivine-mica clinopyroxenites, and clinopyroxene – carbonate – feldspar rocks coincide within error with that determined from apatite and amphibole from pyroxenites. Formation of the Khani intrusions is in the time interval of intense postcollisional magmatic processes on the Aldan-Stanovoy Shield. These processes were accompanied by the formation of magnesiocarbonatites of the Seligdar complex (1.90–1.88 Ga), Kalar-Nimnyr (1.85–1.86 Ga) and Sulumat (1.88 Ga) dike swarms of basic rocks, layered intrusions of the Chiney complex (1.87 Ga), lamproite dikes (1.87 Ga) and A-type granitoids (1.88–1.87 Ga) within the Aldan-Stanovoy Shield. Late Paleoproterozoic postcollisional magmatic processes were widely manifested not only on the Aldan-Stanovoy Shield, but also within the southern part of the Siberian Craton and were a consequence of the large-scale stage of formation of the structure of the Siberian Craton.

Keywords: Aldan-Stanovoy shield, Ar-Ar and U-Pb dating, Paleoproterozoic, clinopyroxenites, olivine clinopyroxenites, clinopyroxene-carbonate-feldspar rocks

Source of financing: The petrographic and geochronological investigations were supported by the Russian Science Foundation (№ 19-17-00019). The geological investigations were done on state assignment of IGM SB RAS (FWZN-2022-0024, № 0330–2016–0013) and GIN SB RAS (AAAAA21-121011390002-2).

For citation: Doroshkevich A.G., Sharygin V.V., Ponomarchuk A.V., Izokh A.E., Izbrodin I.A., Zubakova E.A., Prokopyev I.R., Sergeev S.A. (2022) New age data for rocks of Khani intrusions (Aldan-Stanovoy shield). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 3. pp. 6–26. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/24/1

Введение

Получение новых знаний о строении и особенностях эволюции древнейших щитов дает ключ к пониманию общих закономерностей становления континентальной литосферы, создает реальную основу для петрологических и палеогеодинамических реконструкций. Алдано-Становой щит, крупнейший выступ фундамента Сибирского кратона, является важнейшим полигоном в изучении докембрийских провинций, в пределах которых для исследования достаточно большинство главных ассоциаций пород.

Имеющиеся многочисленные геохронологические данные по магматическим породам Алдано-Станового щита являются основополагающими для понимания истории его геологического развития в докембрии (например [Неймарк и др., 1984; Котов и

др., 2005, 2006, 2017; Сальникова и др., 2004; Попов и др., 2009; Глуховский и др., 2011; Глебовицкий и др., 2012; Ларин и др., 2006, 2012; Ernst et al., 2016; Prokopyev et al., 2017, 2019] и многие другие). Однако целый ряд вопросов в исследовании докембрийских магматических комплексов региона, включая информацию о возрасте, остается дискуссионным. Так, например, полученные оценки возраста (U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr методами) автономных анортозитов каларского комплекса варьируют в широком интервале – 2,7–1,9 млрд лет [Сальникова и др., 2004; Глуховский и др., 2011; Ларин и др., 2006]. Опубликованные данные о возрасте пород ультраосновных массивов р. Хани, являющихся ключевыми для раскрытия геологической истории докембрия Алдано-Станового щита, также противоречивы. Так, U-Pb возраст по циркону из дайки оливин-содержащих

пород, которая сечет пироксениты Хани (участок Укдуска), дает значения 2702 ± 12 млн лет [Владыкин, Лепехина, 2009]. Авторы рассматривали эти породы как оливиновые лампроиты, а их возраст позволил ученым отнести их к самым древним высококалийным породам в мире. Однако возраст пироксенитов, определенный Pb-Pb (апатит) и K-Ar (амфибол) методами [Неймарк и др., 1984], имеет значения 1850 ± 20 млн лет и 1870 ± 50 млн лет, соответственно. Учитывая эти геохронологические данные, формирование пород массивов р. Хани можно отнести к палеопротерозойской крупной изверженной провинции, к которой относятся расслоенные ультрамафит-мафитовые интрузии чинейского комплекса [Попов и др., 2009; Ernst et al., 2016; Mekhonoshin et al., 2016]. Эта информация определила необходимость повторного датирования. В данной статье приведены новые геохронологические (U-Pb SHRIMP II, Ar-Ar) данные для основных разновидностей пород (оливин-слюдяные клинопироксениты, слюдяные клинопироксениты, клинопироксен-кальцит-полевошпатовые породы) массивов р. Хани (интрузии Кабаханыр и Укдуска) и обсуждается их тектоническая позиция.

Краткая геологическая характеристика района

Сибирский кратон образует коллаж микроконтинентов (Тунгусский, Анабарский, Оленекский, Алданский и Становой), ограниченных раннепротерозойскими орогенными складчатыми поясами [Rosen, 2002]. Алдано-Становой щит является южным выступом фундамента Сибирского кратона и характеризуется сложным строением. Существует несколько точек зрения на тектоническое районирование Алдано-Станового щита. Ряд исследователей делят его на Алданский, Чара-Олекминский и Батомгский геоблоки, к которым примыкает Джугджуро-Становой супертеррейн. Зона сочленения маркируется субширотным Становым структурным швом, который представляет собой зону тектонического меланжа [Котов и др., 2005, 2006, 2017]. А.П. Смелов и соавт. [Смелов и др., 2001] в пределах Алдано-Станового щита выделяют пять террейнов (Западно-Алданский, Центральнo-Алданский, Восточно-Алданский, Тындинский и Чогарский), разделенные зонами тектонического меланжа (Амгинская, Каларская и Тыркандинская) (рис. 1, а).

Каларская зона тектонического меланжа, в пределах которой находятся породы массивов р. Хани, сложена тоналит-трондьемитовыми ортогнейсами олекминского комплекса и глубокометаморфизованными супракrustальными образованиями (эндербиты и чарнокиты) Культуринского блока [Смелов, Зедге-

низов, Тимофеев, 2001]. Согласно В.П. Ковач и соавт. [1995], источниками последних служили породы с возрастом 3,0 млрд лет. Магматические образования данного района представлены синколлизонными (ничатский и куандинский комплексы) и посколлизонными (балыхтайский и кодарский комплексы) гранитоидами, анорогенными щелочными гранитами катугинского комплекса, габбро-анортозитами каларского комплекса, метагаббро и габбро-диоритами амуннактинского комплекса, метаперидотитами красногорского комплекса, дайками долеритов сулуматского комплекса, мафит-ультрамафитовыми расслоенными интрузиями чинейского комплекса и пироксенитовыми массивами р. Хани.

Массивы р. Хани представлены разрозненными мелкими интрузивными телами Кабаханыр, Укдуска, Юс-Кюель и Аномальное. Интрузии характеризуются схожим геологическим строением. Форма тел на участках овальная, вытянутая в северо-западном направлении, площадью до 2 км^2 (рис. 1, б).

В вертикальном разрезе, согласно данным геологоразведочного бурения, тела имеют форму полусфер с максимальной мощностью до 500 м [Перовская и др., 1987]. Вмещающие породы представлены биотитовыми гранито-гнейсами и гнейсовидными гранитами с редкими маломощными линзами биотитовых и биотит-амфиболовых кристаллосланцев и амфиболитов. Гранито-гнейсы сложены полевым шпатом (80–90 %), пироксеном (до 10 %), кварцем, биотитом с акцессорными магнетитом, апатитом, цирконом и титанитом; главными минералами сланцев являются амфибол (20–30 %), биотит (20–40 %), полевой шпат (до 10 %) [Булах, Гулий, Золотарев, 1990]. Контакты магматических тел по отношению к сланцеватости метаморфических пород согласные. В зоне контакта с гранито-гнейсами отмечаются участки интенсивного окварцевания. Внутреннее строение тел неоднородное, обусловленное вариациями основных породообразующих минералов и различающимися структурно-текстурными особенностями.

Тела сложены преимущественно слюдяными клинопироксенитами (рис. 1, б). В контактовой зоне с вмещающими породами распространены клинопироксен-полевошпатовые и клинопироксен-карбонат-полевошпатовые породы, характеризующиеся пятнистой и полосчатой текстурой из-за неравномерного распределения основных породообразующих феррических и калийных минералов. Мощность зоны от 50 до 150 м [Гулий, 1985; Перовская и др., 1987; Прошенкин, Кузнецова, 1988; Булах Гулий, Золотарев, 1990]. В пределах центральных частей клинопироксенитов отмечаются секущие маломощные прожилки кварцсодержащих микроклиновых сиенитов [Гулий, 1985; Перовская и др., 1987; Прошенкин, Кузнецова,

1988; Булах Гулий, Золотарев, 1990]. Реже встречаются крупные жильные тела мощностью до 10 м. Контакты имеют как прямолинейную, так и извилистую форму [Перовская и др., 1987]. В жилах сиенитов наблюдаются реликты клинопироксенитов изометричной, линзовидной или угловатой формы размером до 1,5 м. В

пределах массива отмечаются дайки мелкозернистых гранитов (аплитов), гранитных пегматитов и долеритов [Перовская и др., 1987]. Кроме того, Н.В. Владыкин [2001] описывал дайковые породы, секущие клинопироксениты. Он диагностировал их как оливиновые лампроиты и карбонатиты.

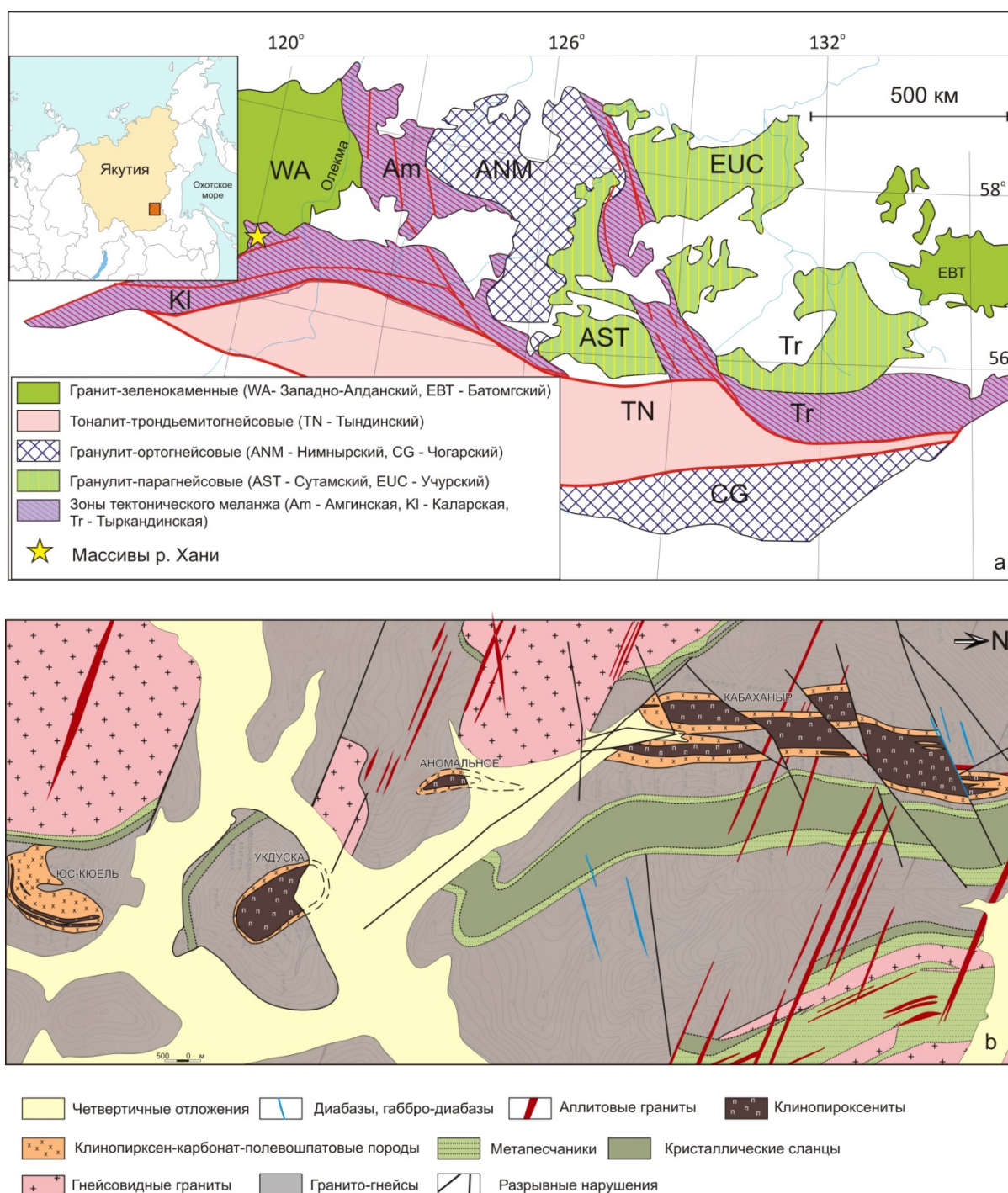


Рис. 1. Схема (а) тектонического строения Алдано-Станового щита по данным [Смелов, Зедгенизов, Тимофеев, 2001] и (б) геологического строения массивов р. Хани по данным [Перовская и др., 1987]

Fig. 1. Scheme of (a) the tectonic structure of the Aldan-Stanovoy shield based on [Smelov, Zedgenizov, Timofeev, 2001] and (b) geological structure of the Khani intrusions based on [Perovskaya et al., 1987]

Методы исследования

Для исследований была использована коллекция пород, собранная сотрудниками лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН (И.Е. Прошенкин, В.В. Шарыгин, Л.И. Панина) во время полевых работ в 1983–1986 гг. Петрографическое изучение пород с двух intrusion р. Хани (Кабаханыр и Укдуска) проводилось на микроскопе Olympus BX51 с фотокамерой. Исследование текстурно-структурных характеристик и минерального состава пород, а также изучение химического состава минералов осуществлялись на сканирующем микроскопе MIRA 3 LMU (TESCAN Ltd.) с энергодисперсионным спектрометром (EDS, система микроанализа INCA Energy-450 XMax-80) в ИГМ СО РАН, Новосибирск. Условия EDS-анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток электронного пучка 1,5 нА, время набора спектров 20 с.

U-Pb SHRIMP-II датирование циркона и титанита проводилось в Центре изотопных исследований ФГУП ВСЕГЕИ им. А.П. Карпинского. Отобранные вручную зерна циркона и титанита протолченных пород были имплантированы в эпоксидную смолу. В качестве стандарта были использованы зерна международного геохронологического стандарта циркона TEMORA и титанита OLT1. Для выбора места локального U-Pb датирования использовались оптические и катодолюминесцентные изображения, изображения в обратно-рассеянных электронах (BSE), отражающие внутреннее строение и зональность зерен. Измерения U-Pb отношений в цирконе проводились по методике, описанной в работе [Williams, 1998], а титанита – по методике, аналогичной описанной в [Kennedy et al., 2010] и дополненной в работе [Родионов и др., 2018]. При анализе циркона интенсивность первичного пучка молекулярного кислорода составляла 4 нА, диаметр пятна (кратера) пробоотбора – 25 мкм. При анализе титанита величина тока составляла 10–15 нА при диаметре кратера около 50 мкм. Обработка полученных данных для циркона и титанита осуществлялась с помощью программы SQUID [Ludwig, 2000]. Построение графиков с конкордией проводилось с использованием программы ISOPLOT/EX [Ludwig, 2003, 2009].

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование мономинеральных фракций флогопита было произведено путем поэтапного нагрева [Травин и др., 2009] в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск, Россия). Зерна флогопита были упакованы в Al-фольгу и запаены в кремниевые трубки. Облучение проб было проведено в кадмированном канале научного реактора ВВР-К типа в Научно-исследовательском институте ядерной физики (Томск). Для калибровки был использован международный

стандарт биотита (Lp-6) и мусковита (Bern 4m) [Baski, Archibald, Farrar, 1996]. 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. 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 $\pm 1^\circ\text{C}$.

Краткая петрографическая характеристика пород

Детальные петрографические и минералогические исследования пород исследуемых интрузивных тел приведены в многочисленных работах [Гулий, 1985; Перовская, Прошенкин, Булгакова, 1987; Панина и др., 1987а, б; Прошенкин, Кузнецова, 1988; Булах, Гулий, Золотарев, 1990; Зубакова, 2021]. Ниже дана краткая петрографическая характеристика слюдяных клинопироксенитов и клинопироксенитов, оливин-слюдяных клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород, для которых происходило определение возраста. Их минеральный состав приведен в табл. 1.

Клинопироксениты – массивные, мелко-среднезернистые породы от темно-зеленого до темно-серого цвета с гипидиоморфной структурой (рис. 2, а–д). По минеральному составу выделяются оливин-слюдяные клинопироксениты, клинопироксениты и слюдяные клинопироксениты. Распределение апатита неравномерно, что придает породе пятнистый облик. Обогащенные апатитом участки и мономинеральные шлировые обособления чаще всего отмечаются в слюдяных клинопироксенитах и в контактовых частях с клинопироксен-карбонат-полевошпатовыми породами.

Клинопироксениты (обр. HN-01, HN-08 и KBH-1) сложены преимущественно клинопироксеном (до 85 %), апатитом (от 3–4 до 15 %), флогопитом, магнетитом и амфиболом. К числу аксессуарных относятся сульфиды (халькопирит, пирит), титанит, монацит-(Ce), полевые шпаты, кальцит, барит, циркон, ильменит, анкилит-(Ce). Вторичными являются минералы группы цеолитов, алланит-эпидот, кварц, хлорит, скаполит, гётит. Клинопироксен образует зерна размером 0,5–1 мм и представлен $\text{Di}_{71-86}\text{Hed}_{11-23}\text{Aeg}_{1-6}$ [Зубакова, 2021].

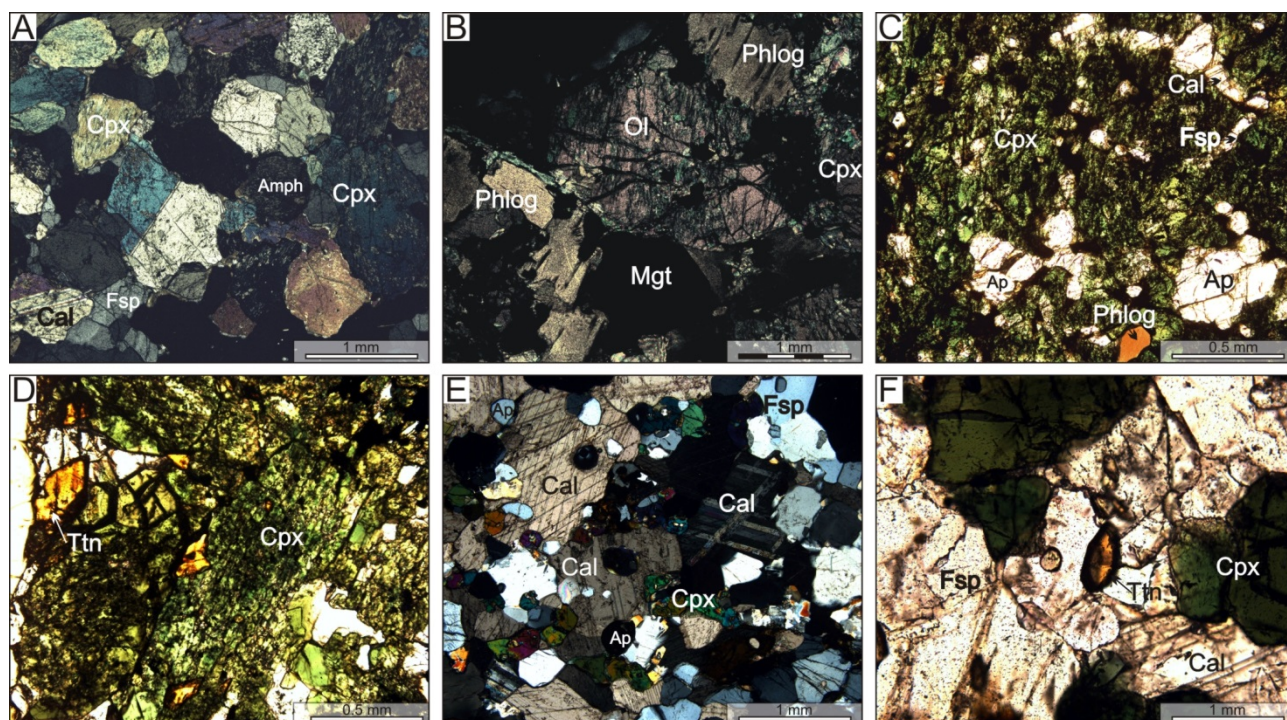


Рис. 2. Фотографии шлифов пород массивов р. Хани

а – клинопироксенит, Кабаханыр (обр. KBH-1), николи скрещены; **б** – оливин-слюданой клинопироксенит, Укдуска (обр. HND), николи скрещены; **с** – слюдяной клинопироксенит, Укдуска (обр. HN-01), николи параллельны; **д** – титанит в клинопироксените, Укдуска (обр. HN-08), николи параллельны; **е** – клинопироксен-карбонат-полевошпатовая порода Укдуска (обр. HN-37), николи скрещены; **ф** – титанит в клинопироксен-карбонат-полевошпатовой породе, Укдуска (обр. HN-37), николи параллельны. Cpx – клинопироксен, Ap – апатит, Amph – амфибол, Fsp – полевоый шпат, Ttn – титанит, Cal – кальцит, Ol – оливин, Mgt – магнетит, Phlog – флогопит

Fig. 2. Photos of thin sections of the Khani rocks

a – clinopyroxenite, Kabakhanyr (sample KBH-1), crossed nicols; **b** – olivine-mica clinopyroxenite, Ukduska (sample HND), crossed nicols; **c** – mica clinopyroxenite, Ukduska (sample HN-01), plane-polarized light; **d** – titanite in clinopyroxenite, Ukduska (sample HN-08), plane-polarized light; **e** – clinopyroxene-carbonate-feldspar rock, Ukduska (sample HN-37), crossed nicols; **f** – titanite in the clinopyroxene-carbonate-feldspar rock, Ukduska (sample HN-37), plane-polarized light. Cpx – clinopyroxene, Ap – apatite, Amph – amphibole, Fsp – feldspar, Ttn – titanite, Cal – calcite, Ol – olivine, Mgt – magnetite, Phlog – phlogopite

Таблица 1

Список минералов, выявленных в исследованных породах из двух интрузий р. Хани

Table 1

List of minerals found in studied rocks from two intrusions of the Khani area

Массив	Укдуска					Кабаханыр
Образец	HN-D	HN-01	HN-08	HN-37	HN-39	KBH-1
Оливин	+					
Клинопироксен	+	+	+	+	+	+
Флогопит	+	+	+	+		+
Фторapatит	+	+	+	+	+	+
Магнетит	+		+	+	+	+
Ильменит	+					
Амфибол	+	+	+	+		+
Алланит-(Ce)		+	+	+	+	+
Эпидот		+	+	+	+	+
Титанит		+	+	+	+	+
Кальцит	+	+	+	+	+	
Альбит		+	+	+	+	+
Калишпат			+	+	+	+
Барит	+		+	+	+	+
Целестин	+	+				
Циркон	+	+	+	+	+	+

Массив	Укдуска					Кабаханыр
Образец	HN-D	HN-01	HN-08	HN-37	HN-39	КВН-1
Торит				+	+	
Анжилит-(Се)			+	+		
Монацит-(Се)	+					
Пирротин	+					
Пентландит	+					
Кобальт-пентландит	+					
Халькопирит		+	+			
Пирит	+	+	+	+		
Смизит				+		
Точилинит						
Серпентин	+					
Хлорит	+			+		+
Гётит						+
Цеолиты			+		+	
Мусковит						
SiO ₂ минерал			+			
Скаполит					+	
Гематит				+		
Pb-Mn-оксид					+	

Амфиболы (актинолит, магнезиогастингсит-паргасит) развиваются по клинопироксену, а также формируют самостоятельные зерна. Флогопит (чаще всего ксеноморфен) и присутствует в интерстициях между зерен клинопироксена, размер – до 2 мм. Фторпатит представлен как отдельными короткопризматическими зернами, так и их скоплениями. Магнетит формирует неправильной изометричной формы зерна, которые иногда обрастают оторочкой титанита. Кроме того, титанит образует равномерно рассеянные самостоятельные кристаллы клиновидной формы (см. рис. 2, *d*). Калиевый полевой шпат встречается редко, выполняет межзерновое пространство и содержит микропертитовые вросстки альбита.

Оливин-слюдяные дайковые клинопироксениты (обр. HND) сложены примерно равным количеством флогопита, оливина, апатита и клинопироксена (рис. 2, *b*). Именно эти дайковые породы Н.В. Владыкин [2001] рассматривал как лампроиты. Второстепенными являются магнетит, ильменит, кальцит и сульфиды (пирротин, пентландит, пирит). Среди аксессуарных минералов отмечены монацит-(Се), амфибол, барит и целестин. Вторичными минералами являются минералы группы серпентина и хлорита, а также сидерит и точилинит. Клинопироксен оливин-слюдяных клинопироксенитов представлен практически чистым диопсидом [Зубакова, 2021]. Оливин частично замещен серпентином, Mg# минерала = 85–90 [Зубакова, 2021]. Амфибол относится к тремолиту [Зубакова, 2021].

Клинопироксен-полевошпатовые и клинопироксен-карбонат-полевошпатовые породы (обр. HN-37 и HN-39) имеют мелко-среднезернистую структуру, массивную или полосчатую текстуру (см. рис. 2, *e*–

f). Породы сложены варьирующими количествами клинопироксена (диопсид-геденбергит) (до 25 %), калиевого полевого шпата (до 40 %), кальцита (до 20–30 %) и фторпатита (до 5 %). Часто вышеперечисленные минералы слагают мономинеральные полосы, придавая породе полосчатый облик. Аксессуарными минералами являются титанит, амфибол (актинолит и магнезиогорнблендит), циркон, альбит, флогопит, целестин, барит, анжилит-(Се), торит. Ко вторичным минералам относятся алланит-эпидот, скаполит, цеолиты, мусковит и гематит. Титанит формирует отдельные конвертовидные кристаллы (рис. 2, *f*). Калиевый полевой шпат содержит пертитовые вросстки альбита. В целом, генезис этих пород пока не совсем понятен: Перовская и др. [1987] рассматривают их как осадочные вмещающие породы, подвергшиеся метаморфизму и метасоматозу при внедрении магматитов, тогда как Владыкин [2001] относит их к карбонатитам.

Результаты U-Pb и Ar-Ar датирования пород

Для U-Pb SHRIMP-II датирования был извлечен циркон из клинопироксенитов интрузий Кабаханыр (обр. КВН-1) и Укдуска (обр. HN-01) и из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород Укдуски (обр. HN-37), а также титанит из клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород Укдуски (обр. HN-08 и HN-37 соответственно).

Циркон в оливин-слюдяных клинопироксенитах, клинопироксенитах и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых породах представлен розовато-сиреневыми призматическими и длиннопризматическими кристаллами с дипирамидальным окончанием.

Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования циркона из пород массивов р. Хани

Table 2

Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of zircons from the Khani intrusions

Точка	% ²⁰⁶ Pb _c	U, ppm	Th, ppm	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*/ppm	(¹) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Возраст	±	(¹) ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Возраст	±	% дискорд	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	(¹) ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	(¹) ²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	(¹) ²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	(¹) ²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	корр. ошибки		
Клинопироксенит, Кабаханяр (КВН-1)																							
12.1	0,04	1896	484	0,26	776	2511	22	2608	5	4	2,10	1	0,18	0,3	2,10	1	0,175	0,3	11,5	1,1	0,476	1	1,0
8.1	0,36	224	129	0,60	96	2599	24	2624	11	1	2,01	1,1	0,18	0,5	2,01	1,1	0,177	0,7	12,1	1,3	0,497	1,1	0,9
9.2	0,08	496	894	1,86	195	2430	27	2638	23	9	2,18	1,4	0,18	1,4	2,18	1,4	0,178	1,4	11,3	1,9	0,458	1,4	0,7
9.1	0,03	777	1354	1,80	315	2491	22	2677	4	7	2,12	1,1	0,18	0,2	2,12	1,1	0,183	0,2	11,9	1,1	0,472	1,1	1,0
13.1	0,03	1100	165	0,15	499	2735	23	2682	3	-2	1,89	1	0,18	0,2	1,89	1	0,183	0,2	13,4	1,1	0,528	1	1,0
10.1	0,07	161	15	0,10	73	2735	26	2689	7	-2	1,89	1,2	0,18	0,4	1,89	1,2	0,184	0,5	13,4	1,3	0,528	1,2	0,9
5.1	0,09	230	50	0,23	106	2766	25	2692	9	-3	1,87	1,1	0,19	0,5	1,87	1,1	0,184	0,5	13,6	1,2	0,536	1,1	0,9
11.1	0,09	138	11	0,08	63	2733	26	2698	8	-1	1,89	1,2	0,19	0,5	1,89	1,2	0,185	0,5	13,5	1,3	0,528	1,2	0,9
2.1	0,07	475	287	0,63	210	2678	23	2699	5	1	1,94	1,1	0,19	0,3	1,94	1,1	0,185	0,3	13,1	1,1	0,515	1,1	1,0
6.1	0,00	810	921	1,18	350	2628	23	2705	3	3	1,99	1,1	0,19	0,2	1,99	1,1	0,186	0,2	12,9	1,1	0,503	1,1	1,0
4.1	0,00	275	24	0,09	124	2726	25	2707	6	-1	1,90	1,1	0,19	0,3	1,90	1,1	0,186	0,3	13,5	1,2	0,526	1,1	1,0
7.1	0,04	399	121	0,31	181	2731	24	2709	5	-1	1,89	1,1	0,19	0,3	1,90	1,1	0,186	0,3	13,5	1,1	0,528	1,1	1,0
14.1	0,06	164	49	0,31	77	2794	26	2706	7	-3	1,84	1,1	0,19	0,4	1,84	1,1	0,186	0,4	13,9	1,2	0,543	1,1	0,9
3.1	0,00	307	59	0,20	144	2802	25	2723	8	-3	1,84	1,1	0,19	0,5	1,84	1,1	0,188	0,5	14,1	1,2	0,544	1,1	0,9
1.1	0,01	140	24	0,18	65	2778	26	2725	8	-2	1,86	1,2	0,19	0,5	1,86	1,2	0,188	0,5	14,0	1,2	0,539	1,2	0,9
Клинопироксенит, Укдуска (НН-01)																							
6.2	0,00	151	8	0,05	47	2003	12	2007	13	0	2,74	0,7	0,12	0,7			6,2		1,0	0,365	0,7		0,7
1.1	0,03	135	6	0,05	58	2615	17	2623	10	0	2,00	0,8	0,18	0,6			12,2		1,0	0,500	0,8		0,8
7.1	0,02	163	7	0,04	70	2624	17	2631	9	0	1,99	0,8	0,18	0,5			12,3		0,9	0,502	0,8		0,8
3.2	0,07	53	1	0,02	23	2648	25	2642	16	0	1,97	1,1	0,18	1,0			12,5		1,5	0,508	1,1		0,8
6.1	0,00	598	170	0,29	264	2676	10	2690	5	1	1,94	0,5	0,18	0,3			13,1		0,5	0,515	0,5		0,9
9.1	0,05	83	3	0,04	37	2683	24	2704	12	1	1,94	1,1	0,19	0,8			13,2		1,3	0,516	1,1		0,8
11.1	0,02	167	7	0,04	75	2708	15	2716	14	0	1,92	0,7	0,19	0,9			13,5		1,1	0,522	0,7		0,6
3.1	0,01	437	25	0,06	196	2709	11	2720	5	0	1,91	0,5	0,19	0,3			13,5		0,6	0,522	0,5		0,8
12.1	0,04	87	3	0,04	39	2710	20	2713	12	0	1,91	0,9	0,19	0,7			13,5		1,2	0,523	0,9		0,8
5.1	0,05	79	32	0,41	36	2713	21	2687	13	-1	1,91	0,9	0,18	0,8			13,3		1,2	0,523	0,9		0,8
2.1	0,03	139	8	0,06	63	2722	18	2707	10	-1	1,90	0,8	0,19	0,6			13,5		1,0	0,525	0,8		0,8
10.1	0,09	86	3	0,04	39	2724	20	2722	12	0	1,90	0,9	0,19	0,8			13,6		1,2	0,526	0,9		0,8
8.1	0,04	107	7	0,06	49	2734	18	2699	16	-1	1,89	0,8	0,19	1,0			13,5		1,3	0,528	0,8		0,6
2.2	0,09	42	1	0,03	19	2737	28	2720	17	-1	1,89	1,3	0,19	1,1			13,7		1,6	0,529	1,3		0,8
4.1	0,03	162	5	0,03	74	2753	15	2709	14	-2	1,88	0,7	0,19	0,8			13,7		1,1	0,533	0,7		0,6
Клинопироксен-карбонат-полевошпатовая порода, Укдуска (НН-37)																							
3.1	1,30	1585	####	12,19	368	1526	14	2529	16	66	3,70	1	0,18	0,5	3,74	1	0,167	1,0	6,2	1,4	0,267	1	0,7
3.2	0,08	303	42	0,14	89	1893	17	1901	14	0	2,93	1,1	0,12	0,7	2,93	1,1	0,116	0,8	5,5	1,3	0,341	1,1	0,8

Точка	% ²⁰⁶ Pb _c	U, ppm	Th, ppm	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*ppm	(1) ²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U Возраст	±	(1) ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb Возраст	±	% дискорд	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	±%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±%	(1) ²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*	±%	(1) ²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	(1) ²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	(1) ²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	корр. ошибки
5.1	0,18	234	46	0,20	75	2027	19	2071	14	2	2,70	1,1	0,13	0,6	2,71	1,1	0,128	0,8	6,5	1,3	0,370	1,1	0,8
6.1	1,62	8	2	0,29	3	2253	56	2410	100	7	2,35	2,7	0,17	2,7	2,39	2,9	0,156	6,1	9,0	6,8	0,418	2,9	0,4
8.1	0,20	202	82	0,42	74	2283	21	2394	14	5	2,35	1,1	0,16	0,6	2,35	1,1	0,154	0,8	9,0	1,4	0,425	1,1	0,8
4.1	0,05	368	567	1,59	153	2537	73	2424	41	-4	2,07	3,5	0,16	2,4	2,07	3,5	0,157	2,4	10,4	4,2	0,482	3,5	0,8
1.1	0,09	47	55	1,23	19	2548	30	2619	19	3	2,06	1,4	0,18	1,1	2,06	1,4	0,176	1,1	11,8	1,8	0,485	1,4	0,8
1.2	0,22	102	191	1,94	43	2590	26	2678	14	3	2,02	1,2	0,18	0,8	2,02	1,2	0,183	0,9	12,5	1,5	0,495	1,2	0,8
2.1	0,08	322	1429	4,59	138	2611	22	2683	7	3	2,00	1	0,18	0,4	2,00	1	0,183	0,4	12,6	1,1	0,499	1	0,9
9.1	0,00	43	58	1,37	19	2615	31	2666	18	2	2,00	1,4	0,18	1,1	2,00	1,4	0,181	1,1	12,5	1,8	0,500	1,4	0,8
6.3	0,00	47	57	1,26	20	2636	31	2681	18	2	1,98	1,4	0,18	1,1	1,98	1,4	0,183	1,1	12,8	1,8	0,505	1,4	0,8
6.2	0,04	79	220	2,89	34	2637	38	2713	14	3	1,98	1,8	0,19	0,8	1,98	1,8	0,187	0,8	13,0	2	0,505	1,8	0,9
7.1	0,00	311	678	2,26	138	2690	24	2635	7	-2	1,93	1,1	0,18	0,4	1,93	1,1	0,178	0,4	12,7	1,2	0,518	1,1	0,9
4.2	0,03	327	952	3,01	146	2697	23	2686	7	0	1,93	1	0,18	0,4	1,93	1	0,184	0,4	13,2	1,1	0,519	1	0,9
7.2	0,00	30	37	1,28	14	2800	37	2797	21	0	1,84	1,6	0,20	1,3	1,84	1,6	0,197	1,3	14,7	2	0,544	1,6	0,8

Примечание. Ошибки приведены на уровне 1σ; Pbс и Pb* – нерадигенный и радиогенный свинец соответственно. Погрешность калибровки стандартов для HN-01, HN-37 и KBH-1 составляла 0,26, 0,37 и 0,29 % соответственно. (1) Коррекция на обыкновенный свинец вносилась по измеренному ^{204}Pb . (2) Коррекция на обыкновенный свинец вносилась согласно $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ возрасту. (3) Коррекция на обыкновенный свинец вносилась согласно $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ возрасту.

Note. Errors are 1-sigma; Pbс and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively. Error in Standard calibration for HN-01, HN-37 and KBH-1 was 0,26%, 0,37% and 0,29%, respectively. (1) Common Pb corrected using measured ^{204}Pb . (2) Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ age-concordance. (3) Common Pb corrected by assuming $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ age-concordance.

В катодоллюминесцентном изображении минерал характеризуется практически полным отсутствием свечения с однородным черным цветом либо отмечается неоднородное внутреннее строение, реже – слабо проявленная осцилляторная зональность, по краям зерен и трещинам отмечаются светлые каймы обрастания с ярким свечением (рис. 3, а; 4, а; 5, а).

U-Pb изотопные данные по циркону, концентрации тория и урана, величины Th/U изотопных отношений приведены в табл. 2.

Изотопные определения для циркона из клинопироксенитов (обр. КВН-1) интрузии Кабаханыр были выполнены в 15 точках из 14 зерен. Как видно из рис. 3, б, точки изотопного состава образуют дискордию и располагаются вблизи верхнего пересечения между 2700 и 2750 млн лет. При этом среднее взвешенное значение возраста по восьми точкам составляет 2696 ± 10 млн лет, со СКВО = 6,5 (рис. 3, с).

В цирконе из клинопироксенитов Укдуски (обр. НН-01) было выполнено 15 анализов в 12 зернах.

Точки составов изученного циркона образуют дискордию (рис. 4, б), верхнее пересечение которой с конкордией отвечает возрасту 2698 ± 18 млн лет, а нижнее соответствует возрасту 2014 ± 65 млн лет (СКВО = 1,18). Стоит отметить, что точка изотопного состава (точка 6.2) каймы циркона, имеющей яркое свечение, располагается на нижнем пересечении дискордии. При этом 10 значений являются конкордантными и дают значение 2715 ± 7 млн лет (СКВО = 0,71) (рис. 4, с).

В девяти зернах циркона из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород Укдуски (обр. НН-37) было проанализировано 15 точек. Значения точек изотопных составов ложатся вдоль конкордии в широком интервале значений возрастов, при этом одно значение возраста (точка 3.1) наиболее дискордантное (рис. 5, б). Среднее взвешенное значение возраста по шести точкам, образующим сгущенный кластер, составляет 2685 ± 8 млн лет, со СКВО = 1,11 (рис. 5, с).

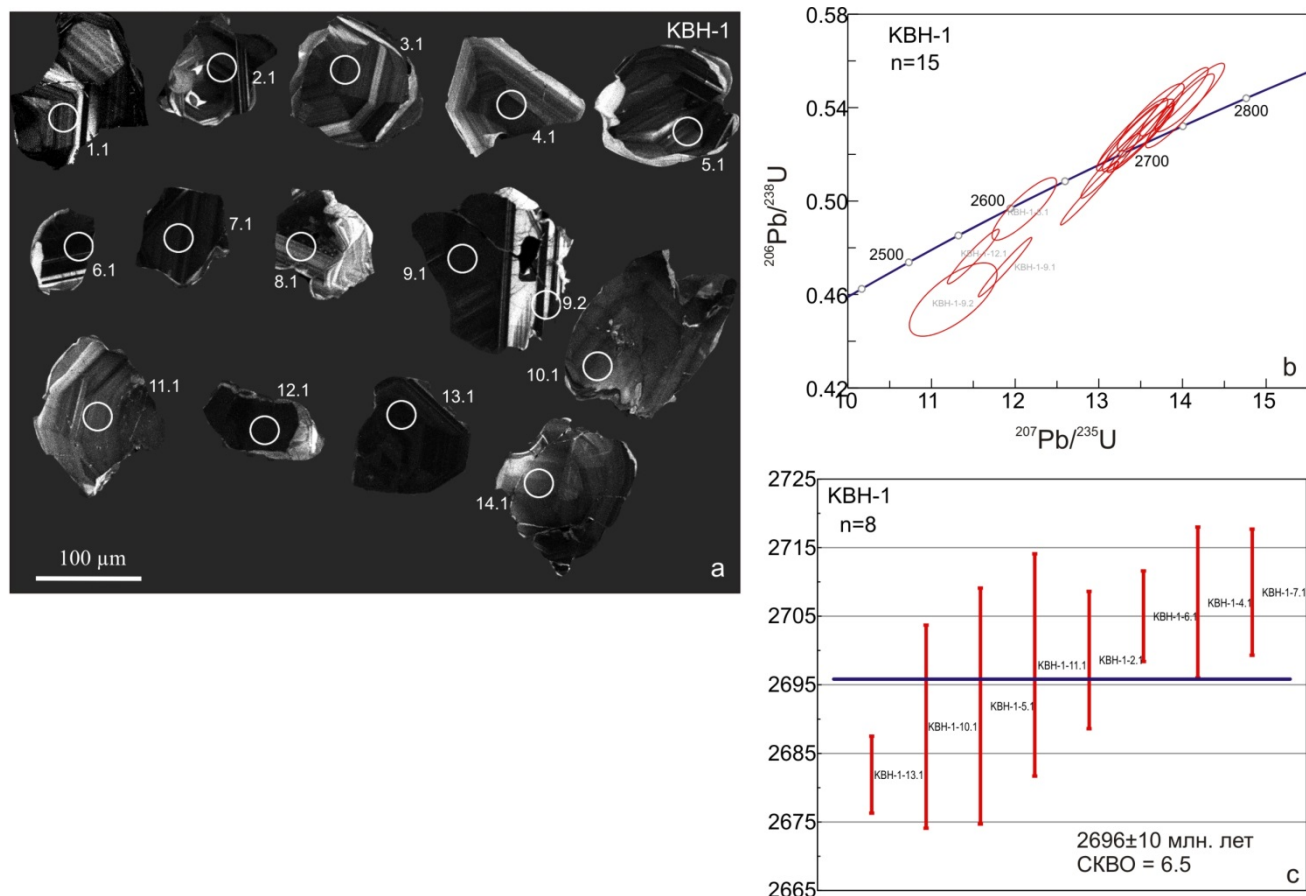


Рис. 3. Катодоллюминесцентные изображения цирконов (а), диаграмма с конкордией (б) и график среднего взвешенного значения возраста (с) для циркона из клинопироксенитов интрузии Кабаханыр (КВН-1)

Fig. 3. CL images of zircons (a), U-Pb concordia diagram (b) and weighted mean age (c) for the zircons from the Kabakhanyr clinopyroxenite sample (KBH-1)

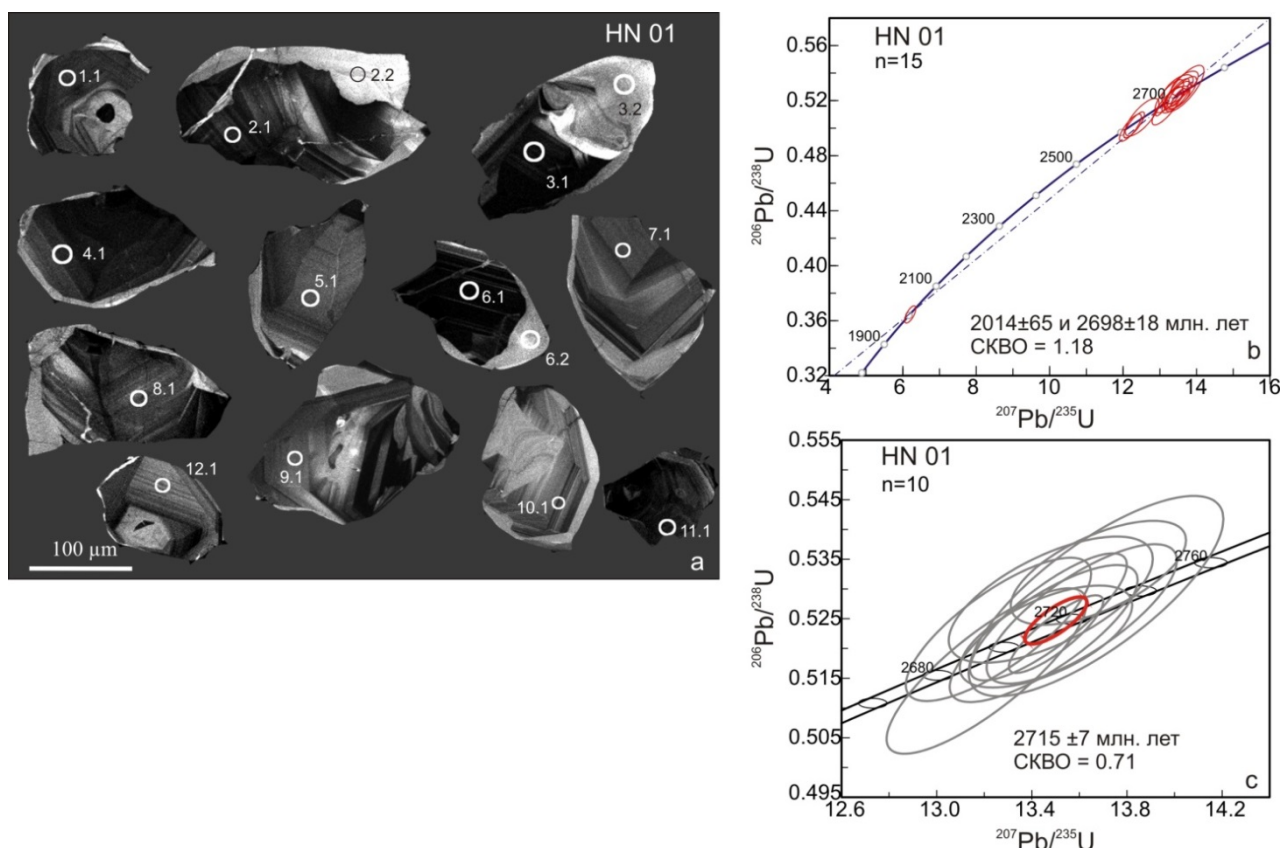


Рис. 4. Католюминесцентные изображения цирконов (а) и диаграммы с конкордией (b, c) для циркона из клинопироксенитов интрузии Укдуска (HN-01)

Fig. 4. CL images of zircons (a) and U-Pb concordia diagrams (b, c) for the zircons from the Ukduska clinopyroxenite sample (HN-01)

Титанит как в клинопироксенитах, так и в клинопироксен-карбонат-полевошпатовых породах представлен желтовато-коричневыми прозрачными конвертовидными кристаллами. Минерал в изображениях в обратнорассеянных электронах (BSE) является геохимически однородным, лишь по трещинкам отмечается небольшое изменение серого цвета на более темный оттенок (см. рис. 6, а; 7, а).

U-Pb изотопные определения для титанита из клинопироксенитов Укдуски (обр. HN-08) были выполнены в 20 анализах из 13 зерен (табл. 3). Содержания урана и тория в минерале довольно высокие и варьирующие (40–435 и 340–665 ppm соответственно), торий-урановое отношение находится в интервале 0,8–10. Доля обыкновенного (нерадиогенного) свинца не превышает 7 %, при этом содержание радиогенного изотопа ^{206}Pb не выше 130 ppm. Точки составов изученного титанита образуют дискордию (рис. 6, b), пересечение которой с конкордией отвечает возрасту 1845 ± 6 млн лет (СКВО = 0,68). Аналогичные значения были получены при расчете среднего взвешенного значения возраста по 19 анализам (рис. 6, c).

В титаните из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород Укдуски (обр. HN-37) было выполнено 20 анализов в 16 зернах (табл. 3). Концентрации тория и урана схожи с таковыми для минерала из клинопироксенитов (до 385 и 186 ppm соответственно), с торий-урановым отношением, достигающим 2. Доля обыкновенного (нерадиогенного) свинца не превышает 3,5 %, содержание радиогенного изотопа ^{206}Pb до 111 ppm. На графике с конкордией (рис. 7, b) точки изотопных составов образуют конкордантные значения возраста 1857 ± 5 млн лет (СКВО = 0,69), а среднее взвешенное значение возраста по 20 точкам составляет 1855 ± 6 млн лет, со СКВО = 0,86 (см. рис. 8, c).

Для $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования были использованы мономинеральные фракции флогопита из клинопироксенитов (обр. HN-01 и HN-08) и оливиновых клинопироксенитов (обр. HND) Укдуски.

Возрастной спектр флогопита из клинопироксенитов Укдуски (обр. HN-01) состоит из 11 ступеней, при этом девять последних ступеней формируют возрастное плато с 90 % выделенного ^{39}Ar , которое определяет временной интервал образования минерала – 1825 ± 13 млн лет (рис. 8, а, табл. 4).

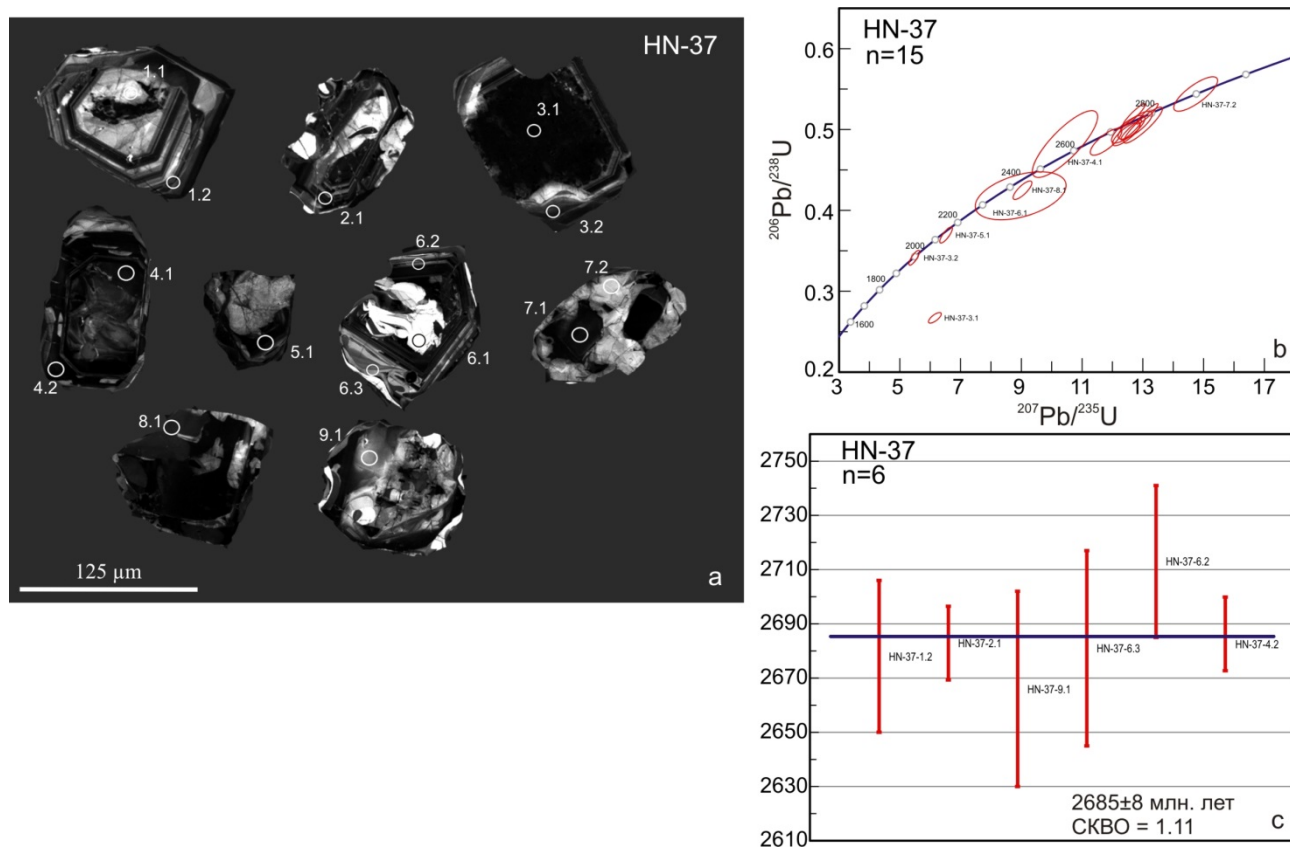


Рис. 5. Католюминесцентные изображения цирконов (а), диаграмма с конкордией (b) и график среднего взвешенного значения возраста (с) для циркона из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород интрузии Укдуска (HN-37)

Fig. 5. CL images of zircons (a), U-Pb concordia diagram (b) and weighted mean age (c) for the zircons from the Ukduska clinopyroxene-carbonate-feldspar sample (HN-37)

Таблица 3

Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования титанитов из пород массивов р. Хани

Table 3

Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of titanites from the Khani intrusions

Точка	% ^{206}Pb с	U ppm	Th ppm	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	ppm ^{206}Pb *	(1) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ возраст	±	(1) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст	±	% дис- корд	(1) $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ *	±%	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	±%	(1) $^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	±%	(1) $^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	±%	Корр. ошиб
Клинопироксенит, Укдуска (HN08)																			
6.1	0,96	241	520	2,23	76	1995	22	1851	17	-7	2,76	1,3	0,113	0,9	5,66	1,6	0,363	1,3	0,8
8.1	4,68	203	457	2,33	63	1919	17	1862	99	-3	2,88	10,0	0,114	5,5	5,44	5,6	0,347	1,0	0,2
7.2	3,72	93	484	5,39	28	1875	16	1822	32	-3	2,96	1,0	0,111	1,8	5,18	2,0	0,338	1,0	0,5
13.2	7,29	51	363	7,30	16	1855	18	1821	78	-2	3,00	1,1	0,111	4,3	5,12	4,5	0,333	1,1	0,3
9.1	1,86	109	641	6,08	32	1859	14	1826	16	-2	2,99	0,9	0,112	0,9	5,14	1,2	0,334	0,9	0,7
13.1	7,30	65	468	7,46	20	1869	20	1836	150	-2	2,97	1,2	0,112	8,0	5,21	8,1	0,336	1,2	0,2
5.1	2,59	84	361	4,44	25	1866	14	1834	21	-2	2,98	0,9	0,112	1,2	5,19	1,5	0,336	0,9	0,6
8.2	4,02	45	338	7,84	13	1858	21	1826	38	-2	2,99	1,3	0,112	2,1	5,14	2,5	0,334	1,3	0,5
12.1	3,33	42	430	10,60	13	1880	17	1847	31	-2	2,95	1,1	0,113	1,7	5,27	2,0	0,339	1,1	0,5
4.1	5,29	52	339	6,70	16	1877	18	1850	36	-1	2,96	1,1	0,113	2,0	5,27	2,3	0,338	1,1	0,5
10.2	3,17	88	464	5,43	27	1877	18	1849	27	-1	2,96	1,1	0,113	1,5	5,27	1,9	0,338	1,1	0,6
4.2	0,97	251	625	2,57	74	1874	12	1847	9	-1	2,97	0,8	0,113	0,5	5,25	0,9	0,337	0,8	0,8
2.1	1,02	435	359	0,85	128	1878	12	1853	7	-1	2,96	0,7	0,113	0,4	5,28	0,8	0,338	0,7	0,9
1.1	4,04	44	351	8,16	13	1871	19	1851	35	-1	2,97	1,1	0,113	1,9	5,26	2,2	0,337	1,1	0,5
7.1	0,57	361	608	1,74	104	1857	12	1842	6	-1	3,00	0,7	0,113	0,3	5,19	0,8	0,334	0,7	0,9

11.2	1,41	194	469	2,49	56	1833	13	1824	14	-1	3,04	0,8	0,111	0,8	5,06	1,1	0,329	0,8	0,7
3.1	2,12	119	665	5,75	36	1884	13	1874	19	-1	2,95	0,8	0,115	1,1	5,36	1,4	0,339	0,8	0,6
10.1	1,25	155	616	4,11	45	1844	14	1860	13	1	3,02	0,9	0,114	0,7	5,19	1,1	0,331	0,9	0,8
11.1	1,19	173	649	3,86	49	1812	12	1839	11	1	3,08	0,8	0,112	0,6	5,03	1,0	0,325	0,8	0,8
Клинопироксен-карбонат-полевошпатовая порода, Укдуска (HN37)																			
1.1	2,32	95	74	0,81	28	1850	14	1848	20	0	3,01	0,9	0,113	1,1	5,18	1,4	0,333	0,87	0,6
10.1	2,38	108	176	1,70	32	1868	15	1884	21	1	2,98	0,9	0,115	1,2	5,34	1,5	0,336	0,93	0,6
10.2	1,43	145	25	0,18	43	1893	13	1853	13	-2	2,93	0,8	0,113	0,7	5,33	1,1	0,341	0,8	0,7
11.1	0,94	136	24	0,18	40	1872	13	1884	13	1	2,97	0,8	0,115	0,7	5,35	1,1	0,337	0,81	0,7
12.1	3,04	78	42	0,56	23	1856	15	1843	24	-1	3,00	0,9	0,113	1,3	5,18	1,6	0,334	0,9	0,6
13.1	3,45	64	29	0,47	19	1854	15	1837	28	-1	3,00	1,0	0,112	1,6	5,16	1,8	0,333	0,95	0,5
14.1	0,67	166	25	0,16	47	1825	13	1842	9	1	3,06	0,8	0,113	0,5	5,08	0,97	0,327	0,82	0,8
15.1	2,59	81	49	0,63	24	1858	15	1859	23	0	2,99	0,9	0,114	1,3	5,23	1,5	0,334	0,9	0,6
16.1	2,27	97	186	1,98	28	1848	14	1863	19	1	3,01	0,9	0,114	1,1	5,21	1,4	0,332	0,87	0,6
16.2	0,52	146	76	0,54	42	1849	13	1857	9	0	3,01	0,8	0,114	0,5	5,20	0,97	0,332	0,83	0,9
17.1	2,79	79	105	1,36	24	1883	15	1851	23	-2	2,95	0,9	0,113	1,2	5,29	1,5	0,339	0,9	0,6
2.1	2,72	80	58	0,75	24	1846	16	1870	25	1	3,02	1,0	0,114	1,4	5,23	1,7	0,332	0,97	0,6
3.1	2,34	88	61	0,72	26	1869	14	1890	20	1	2,97	0,9	0,116	1,1	5,36	1,4	0,336	0,88	0,6
4.1	0,63	183	63	0,36	53	1843	12	1851	9	0	3,02	0,8	0,113	0,5	5,17	0,91	0,331	0,77	0,8
5.1	2,59	88	129	1,52	26	1865	14	1864	22	0	2,98	0,9	0,114	1,2	5,27	1,5	0,336	0,89	0,6
6.1	2,64	87	137	1,63	26	1852	14	1836	23	-1	3,01	0,9	0,112	1,3	5,15	1,5	0,333	0,89	0,6
7.1	3,23	65	25	0,40	19	1842	15	1881	28	2	3,02	1,0	0,115	1,6	5,25	1,8	0,331	0,96	0,5
8.1	2,52	89	66	0,77	27	1875	14	1854	21	-1	2,96	0,9	0,113	1,2	5,28	1,5	0,338	0,88	0,6
9.1	0,66	162	25	0,16	47	1872	13	1855	9	-1	2,97	0,8	0,113	0,5	5,27	0,93	0,337	0,78	0,8
9.2	0,33	385	109	0,29	111	1860	12	1850	5	-1	2,99	0,7	0,113	0,3	5,22	0,79	0,335	0,73	0,9

Примечание. Ошибки приведены на уровне 1σ ; Pbc и Pb* – нерадиогенный и радиогенный свинец соответственно. Погрешность калибровки стандарта составляла 0,17 %. (1) Коррекция на обыкновенный свинец вносилась по измеренному ^{204}Pb .

Note. Errors are 1-sigma. Pbc and Pb* indicate the common and radiogenic portions, respectively. Error in Standard calibration was 0.17 %. (1) Common Pb corrected using measured ^{204}Pb .

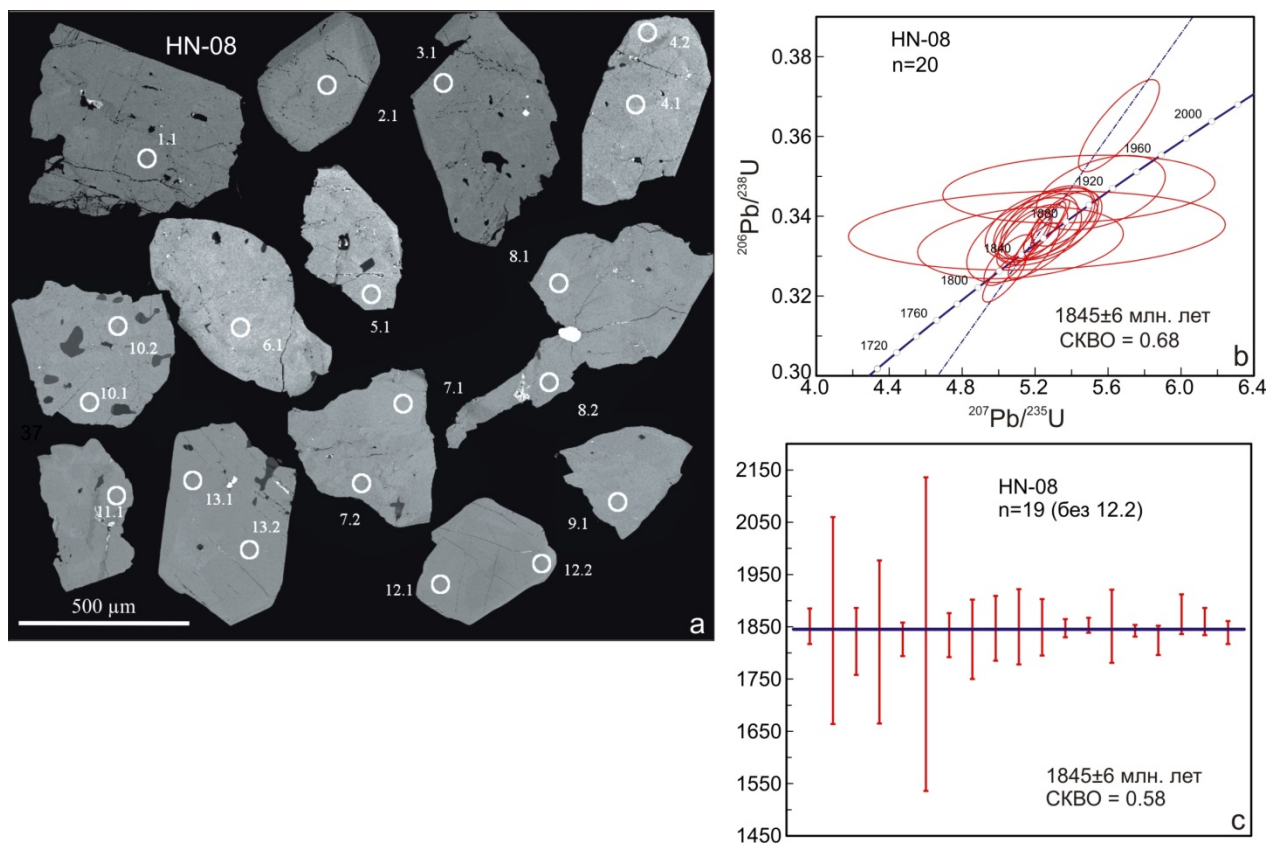


Рис. 6. Изображения в обратнорассеянных электронах (BSE) (а), диаграмма с конкордией (b) и график среднего взвешенного значения возраста (с) для титанита из клинопироксенита интрузии Укдуска (HN-08)

Fig. 6. BSE images of titanites (a), U-Pb concordia diagram (b) and weighted mean age (c) for the titanites from the Ukduska clinopyroxenite sample (HN-08)

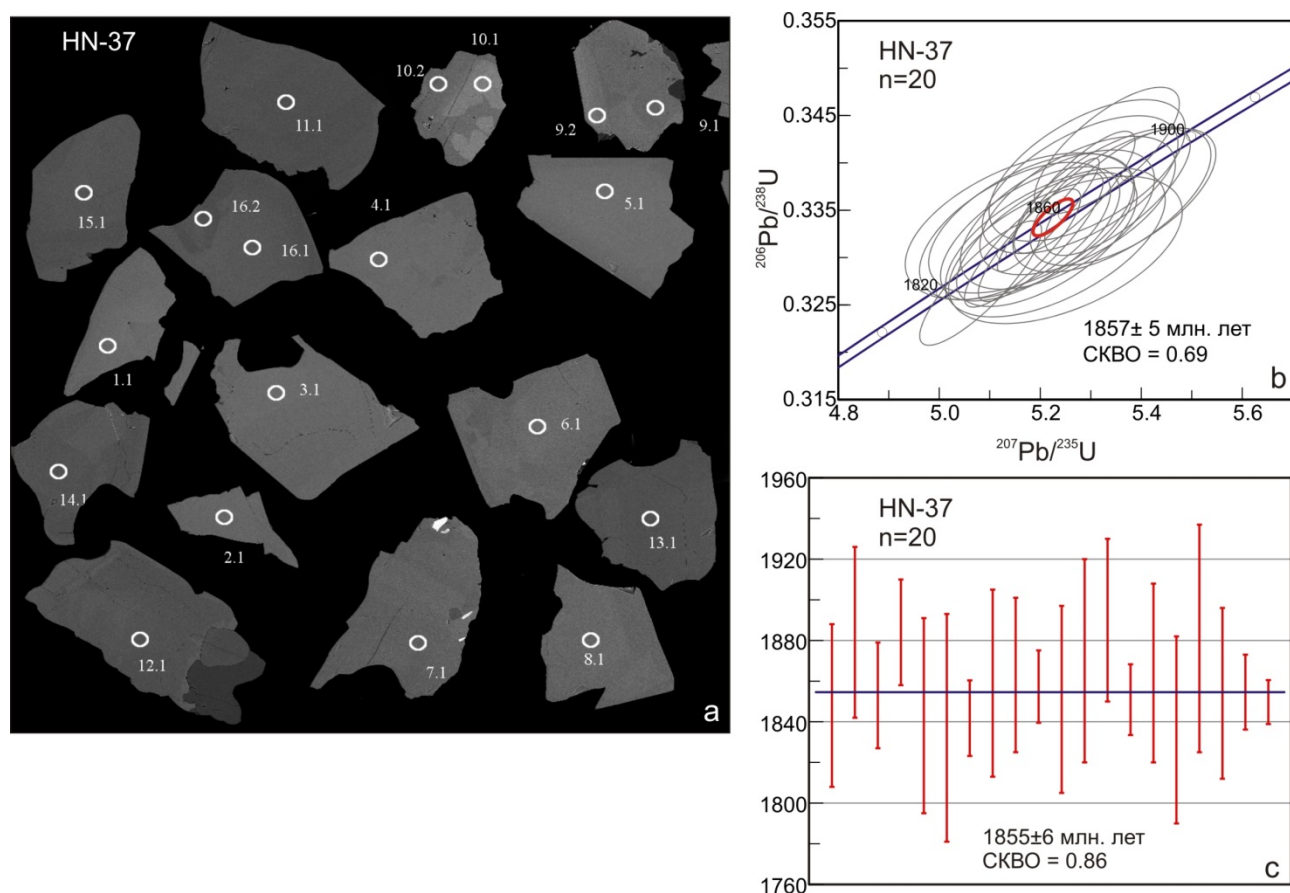


Рис. 7. Изображения в обратнорассеянных электронах (BSE) (а), диаграмма с конкордией (б) и график среднего взвешенного значения возраста (с) для титанита из клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород интрузии Укдуска (HN-37)

Fig. 7. BSE images of titanites (a), U-Pb concordia diagram (b) and weighted mean age (c) for the titanites from the Ukduska clinopyroxene-carbonate-feldspar sample (HN-37)

Таблица 4

Результаты Ar-Ar датирования слюд из клинопироксенитов интрузии Укдуска

Table 4

Results of Ar-Ar dating of micas from clinopyroxenites of the Ukduska intrusion

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Накопл. ^{39}Ar	Возраст, млн лет	±
Оливин-слюдяной клинопироксенит, Укдуска (HND)											
500	169,0	4,9	0,03	0,06	0,2	0,3	0,35	0,03	0,6	453,7	54,0
650	204,3	4,7	0,12	0,02	0,4	0,2	0,32	0,02	1,4	709,8	39,1
825	339,8	6,3	0,04	0,02	0,20	0,05	0,27	0,02	2,9	1377,3	29,3
950	435,3	0,3	0,017	0,001	0,01	0,01	0,0246	0,0004	18,3	1911,8	13,7
1 000	424,7	2,3	0,023	0,004	0,01	0,01	0,049	0,005	23,9	1862,2	15,5
1 075	424,9	0,5	0,021	0,002	0,01	0,01	0,0179	0,0007	38,4	1888,4	13,6
1 125	423,4	1,0	0,018	0,002	0,01	0,01	0,017	0,002	56,7	1885,1	13,9
1 175	422,0	0,6	0,016	0,001	0,01	0,01	0,015	0,001	78,3	1882,8	13,7
1 200	420,2	0,8	0,0174	0,0006	0,01	0,01	0,012	0,002	100,0	1880,1	13,8
Слюдяной клинопироксенит, Укдуска (HN08)											
500	377,5	27,6	0,27	0,06	0,6	0,3	0,88	0,10	0,3	731,0	119,7
650	265,6	7,9	0,01	0,01	0,2	0,1	0,19	0,03	1,3	1149,6	44,9
775	411,0	2,9	0,019	0,006	0,01	0,01	0,049	0,007	8,3	1787,3	16,2
875	409,5	1,0	0,017	0,005	0,010	0,009	0,035	0,002	14,9	1795,2	13,3
925	409,8	0,4	0,014	0,003	0,014	0,003	0,015	0,001	26,2	1812,4	12,9
950	410,5	0,6	0,018	0,001	0,007	0,002	0,016	0,001	39,7	1813,7	13,0

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Накопл. ^{39}Ar	Возраст, млн лет	±
975	420,5	0,9	0,017	0,002	0,010	0,010	0,010	0,002	48,3	1836,1	13,3
1 000	412,8	1,1	0,014	0,001	0,009	0,007	0,019	0,003	57,7	1817,5	13,4
1 025	414,2	1,2	0,015	0,002	0,010	0,010	0,022	0,003	65,4	1819,4	13,5
1 050	421,8	3,5	0,019	0,002	0,019	0,007	0,031	0,008	72,4	1832,7	17,4
1 075	414,7	1,6	0,020	0,001	0,005	0,005	0,015	0,004	85,6	1826,1	14,0
1 100	406,5	0,8	0,017	0,002	0,01	0,01	0,032	0,002	93,1	1789,1	13,1
1 130	415,2	1,2	0,021	0,007	0,02	0,01	0,031	0,003	100,0	1814,3	13,5
Клинопироксенит, Укдуска (HN01)											
550	220,2	8,5	0,09	0,04	0,1	0,1	0,35	0,04	0,6	738,5	64,0
650	87,8	0,8	0,031	0,008	0,19	0,02	0,076	0,009	3,3	450,2	17,0
750	389,3	3,2	0,029	0,009	0,03	0,02	0,066	0,008	7,1	1723,5	17,2
850	404,4	1,6	0,018	0,002	0,003	0,003	0,016	0,004	19,9	1811,3	14,1
900	408,9	1,6	0,011	0,003	0,011	0,002	0,018	0,004	29,5	1822,9	14,1
935	408,5	0,8	0,020	0,002	0,006	0,005	0,014	0,002	40,8	1824,6	13,3
970	411,3	0,5	0,018	0,002	0,007	0,007	0,020	0,001	49,3	1828,2	13,1
990	408,7	0,8	0,008	0,001	0,006	0,004	0,018	0,002	59,0	1821,9	13,3
1 020	410,7	1,1	0,014	0,001	0,010	0,006	0,018	0,003	70,0	1827,4	13,5
1 050	413,5	2,2	0,023	0,003	0,023	0,007	0,029	0,005	77,9	1826,5	15,0
1 090	413,2	0,7	0,014	0,003	0,022	0,003	0,021	0,002	88,7	1832,6	13,2
1 130	413,3	0,3	0,016	0,001	0,023	0,003	0,0207	0,0007	100,0	1832,7	13,1

Примечание. Ошибки приведены на уровне 2σ.

Note: Errors are 2-sigma.

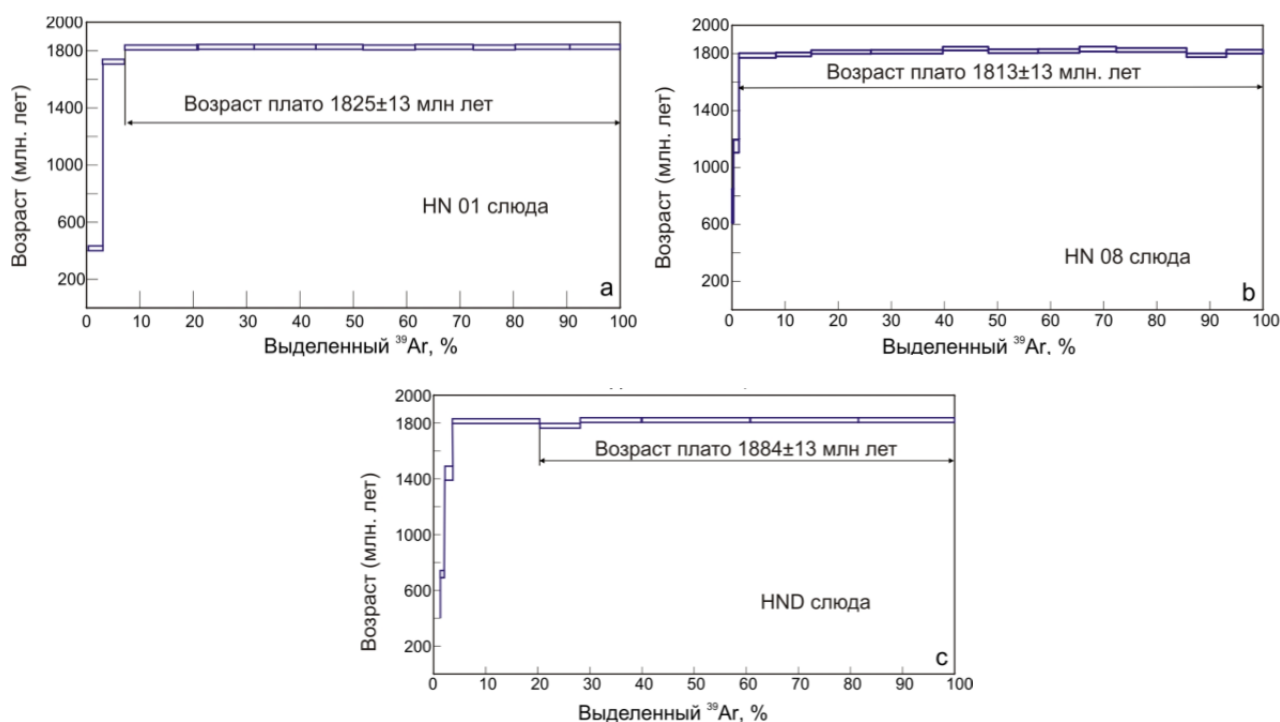


Рис. 8. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования слюд из пород интрузии Укдуска. Возрастные спектры флогопита из клинопироксенитов (обр. HN-01) (a) и (обр. HN-08) (b); флогопита из оливин-слюдяного клинопироксенита (обр. HND) (c)

Fig. 8. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of micas from rocks of the Ukduska intrusion. Age spectra of phlogopite from clinopyroxenites HN-01 (a) and HN-08 (b); phlogopite from olivine-mica clinopyroxenite (HND) (c)

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ спектр флогопита из клинопироксенитов Укдуски (обр. HN-08) состоит из 12 ступеней, 11 последних ступеней удовлетворяют критерию

возрастного плато и определяют средневзвешенный возраст исследуемого образца величиной 1813 ± 13 млн лет (рис. 8, b; табл. 4). Количество выделен-

ного ^{39}Ar в рамках возрастного плато соответствует 98 % от общего объема ^{39}Ar , выделившегося из образца в ходе эксперимента.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной спектр флогопита из оливин-слюданого клинопироксенита (обр. HND) состоит из восьми ступеней. Пять последних ступеней формируют плато с 80 % выделенного ^{39}Ar . Согласно этому плато, средневзвешенный возраст образования флогопита равен 1884 ± 13 млн лет (рис. 8, с; табл. 4).

Обсуждение

Полученные значения возраста по цирконам (U-Pb SHRIMP II метод) из клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород массивов р. Хани ложатся в интервал 2,69–2,68 млрд лет. С учетом внутреннего строения цирконов, они могли бы отражать время формирования вышеперечисленных пород. Однако этому выводу противоречат: (1) наличие кайм в цирконе с более молодыми возрастными характеристиками (2,01 млрд лет), явно свидетельствующие о более поздних процессах проработки минерала; (2) отсутствие сколько-нибудь значимых признаков метаморфического преобразования пород, исследуемых интрузий. Последнее наблюдение очень важно, поскольку в данном регионе выделяется несколько эпизодов высокоградного метаморфизма, один из которых связан с периодом 2,6–2,4 млрд лет [Котов, 2003; Сальникова и др., 2004; Ларин и др., 2006; Глебовицкий и др., 2012]. Авторы связывают этот этап интенсивного гранулитового метаморфизма с процессами гранитизации и мигматизации, формированием многочисленных интрузий эндербитов (2627 ± 16 млн лет) и чарнокитов (2614 ± 7 млн лет), внедрением интрузий каларского комплекса (2611 ± 38 – 2623 ± 23 млн лет). В этот же период в районе распространения массивов р. Хани происходили метаморфические преобразования габбро амнуннактинского комплекса, имеющие возраст формирования 2709 ± 29 млн лет [Радьков и др., 2015].

Полученный возраст оторочки (2,01 млрд лет) циркона из клинопироксенитов близок времени образования гранитоидов катугинского комплекса и связанного с ним оруденения [Ларин и др., 2002; Котов и др., 2015]. Считается, что период 2,04–1,92 млрд лет знаменует коллизию Алданского и Станового микроконтинентов и процессы орогенеза Алданской гранулит-гнейсовой области [Гусев, Ханин, 1995; Ларин и др., 2000]. Это событие сопровождалось значительной метаморфической переработкой магматических основных пород [Nutman et al., 1992] и гранитообразованием, со становлением биотитовых, амфибол-биотитовых и ортопироксено-

вых гранитов [Котов, 2003; Котов и др., 2004]. Некоторые исследователи связывают формирование автономных анортозитов каларского комплекса с этим этапом активности [Глуховский и др., 2011], а другие – с их метаморфическим преобразованием [Сальникова и др., 2004].

Таким образом, учитывая отсутствие признаков метаморфического преобразования исследуемых пород, можно предполагать ксеногенную природу цирконов из клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород массивов р. Хани.

Определенные значения возраста в интервале 1,88–1,81 млрд лет для кристаллов титанита и флогопита, сформированных в магматическую стадию (согласно петрографическим наблюдениям), характеризуют время кристаллизации пород. Полученные оценки возраста для титанита и флогопита из клинопироксенитов, оливиновых клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород совпадают в пределах ошибки с таковой, определенной по апатиту и амфиболу из пироксенитов [Неймарк и др., 1984]. В таком случае формирование клинопироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых пород р. Хани находится во временном интервале интенсивных постколлизийных магматических процессов Алдано-Станового щита. Эти процессы сопровождалось образованием магнезиокарбонатитов селигдарского комплекса (1,90–1,88 млрд лет), дайковых роев основных пород каларо-нимырского (1,85–1,86 млрд лет) и сулуматского (1,88 млрд лет) комплексов, расслоенных интрузий чинейского комплекса (1,87 млрд лет), даек лампроитов (1,87 млрд лет) и гранитоидов А-типа (1,88–1,87 млрд лет) в пределах Алдано-Станового щита [Богатилов и др., 1991; Попов и др., 2009; Ларин и др., 2012; Радьков и др., 2015; Ernst et al., 2016; Prokopyev et al., 2017, 2019].

Стоит отметить, что позднепалеопротерозойские (1,9–1,8 млрд лет) постколлизийные магматические процессы были широко проявлены не только на Алдано-Становом щите, но и в пределах южной части Сибирского кратона и являлись следствием крупномасштабной стадии образования структуры Сибирского кратона, а формирующиеся в этот этап магматические породы были объединены в Южно-Сибирский постколлизийный вулканоплутонический пояс [н-р Ларин и др., 2003; Gladkochub et al., 2006; Гладкочуб и др., 2012; Mekhonoshin et al., 2016].

Заключение

Полученные значения возраста по ядрам и каймам (U-Pb SHRIMP II метод) цирконов из пироксенитов и клинопироксен-карбонат-полевошпатовых

пород ложатся в интервал 2,69–2,68 и 2,01 млрд лет соответственно. Отсутствие признаков метаморфического преобразования пород, с учетом проявления высокоградного регионального метаморфизма в исследуемом районе в период 2,6–2,4 и 2,04–1,92 млрд лет, позволяет предполагать ксеногенную природу цирконов. Определенные значения возраста в интер-

вале 1,88–1,81 млрд лет для титанита (U-Pb SHRIMP II метод) и флогопита (Ag-Ag метод), сформированных в магматическую стадию, характеризуют время кристаллизации пород. Полученные оценки возраста находятся во временном интервале интенсивных постколлизийных магматических процессов Алдано-Станового щита.

Список источников

- Богатиков О.А., Рябчиков И.Д., Кононова В.А. и др.** Лампроиты. М.: Наука, 1991. 302 с.
- Булах А.Г., Гулий В.Н., Золотарев А.А.** Фосфорные руды докембрийских толщ Алдана: геология, минералогия, генезис. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1990. 220 с.
- Владыкин Н.В.** Алданская провинция К-щелочных пород и карбонатитов: вопросы магматизма, генезиса и глубинных источников // Щелочной магматизм и проблемы мантийных источников: сб. научн. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. С. 18–45.
- Владыкин Н.В., Лепехина Е.А.** Возраст необычных ксеногенных цирконов из кимберлитов Якутии // Доклады Академии наук. 2009. Т. 429, № 6. С. 774–778.
- Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Эрнст Р., Мазукабзов А.М., Скляр Е.В., Писаревский С.А., Вингейт М., Седерлунд У.** Базитовый магматизм Сибирского кратона в протерозое: обзор основных этапов и их геодинамическая интерпретация // Геотектоника. 2012. № 4. С. 28–41.
- Глуховский М.З., Кузьмин М.И., Баянова Т.Б., Баженова Г.Н., Елизаров Д.В., Серов П.А.** Автономные анортозиты Алданского щита и связанные с ними породы: возраст, геохимия и механизм образования (на примере Каларского массива) // Доклады Академии наук. 2011. Т. 439, № 5. С. 651–659.
- Глебовицкий В.А., Седова И.С., Бережная Н.Г., Ларионов А.Н., Ризванова Н.Г., Саморукова Л.М.** U-Pb возраст автохтонных палеопротерозойских чарнокитов Алданского щита // Доклады Академии наук. 2012. Т. 443, № 6. С. 700–706.
- Гулий В.Н.** Геология и генезис апатитопроявлений юго-западной части Алданского щита (бассейн р. Хани): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Л.: ЛГУ, 1985. 24 с.
- Гусев Г.С., Ханн В.Е.** О соотношениях Байкало-Витимского, Алдано-Станового и Монголо-Охотского террейнов (юг Средней Сибири) // Геотектоника. 1995. № 5. С. 68–82.
- Зубакова Е.А.** Минеральный состав пород Ханинского массива (Алданский щит, Якутия) // Металлогения древних и современных океанов. 2021. Т. 27. С. 141–143.
- Ковач В.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др.** Возрастные границы формирования высокометаморфизованных супра-кrustальных комплексов Алданского щита: Первые Sm-Nd изотопные данные // Российский фонд фундаментальных исследований в Сибирском регионе: (Земная кора и мантия): тез. докл. Иркутск: ИЗК СО РАН, 1995. Т. 2. С. 56–57.
- Котов А.Б.** Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 78 с.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ларин А.М. и др.** Раннепротерозойские гранитоиды зоны сочленения Олекминской гранит-зеленокаменной и Алданской гранулитогнейсовой областей, Алданский щит: возраст, источники и геодинамические обстановки формирования // Петрология. 2004. Т. 12, № 1. С. 46–67.
- Котов А.Б., Глебовицкий В.А., Казанский В.И., Сальникова Е.Б., Перцев Н.Н., Ковач В.П., Яковлева С.З.** Возрастные границы формирования главных картируемых структурных элементов центральной части Алданского щита // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405, № 8. С. 1155–1158.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Ларин А.М., Великославинский С.Д., Загорная Н.Ю.** Sm-Nd изотопные провинции Алданского щита // Доклады Академии наук. 2006. Т. 410, № 1. С. 91–94.
- Котов А.Б., Владыкин Н.В., Ларин А.М., Гладкочуб Д.П., Сальникова Е.Б., Скляр Е.В., Толмачева Е.В., Донская Т.В., Великославинский С.Д., Яковлева С.З.** Новые данные о возрасте оруденения уникального Катугинского редкометального месторождения (Алданский щит) // Доклады Академии наук. 2015. Т. 463, № 2. С. 187–191.
- Котов А.Б., Сквитина Т.М., Ковач В.П., Великославинский С.Д., Лопатин Д.В., Скляр Е.В., Толмачева Е.В., Бобровская О.В.** Новые данные о возрасте континентальной коры западной части Алданского щита: результаты изотопно-геохимических Sm-Nd исследований кайнозойских песчаных отложений Чарской и Токкинской впадин // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475, № 3. С. 291–294.
- Ларин А.М., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др.** Новые данные о возрасте гранитов кодарского и тукурингского комплексов, Восточная Сибирь: геодинамические следствия // Петрология. 2000. Т. 8, № 3. С. 267–279.
- Ларин А.М., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др.** О возрасте Катугинского Ta-Nb месторождения (Алдано-Становой щит): к проблеме выделения новой глобальной редкометальной металлогенической эпохи // Доклады Академии наук. 2002. Т. 383, № 6. С. 807–811.
- Ларин А.М., Сальникова Е.Б., Котов А.Б. и др.** Северо-Байкальский вулcano-плутонический пояс: возраст, длительность формирования и тектоническое положение // Доклады Академии наук. 2003. Т. 392, № 4. С. 506–511.
- Ларин А.М., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др.** Каларский комплекс (Алдано-Становой щит) – древнейший представитель анортозит-мангерит-чарнокит-гранитной ассоциации: результаты геохронологических, геохимических и изотопно-геохимических исследований // Петрология. 2006. Т. 14, № 1. С. 4–24.
- Неймарк Л.А., Искандерова А.Д., Тимашков А.Н., Миронюк Е.П.** Новые данные о возрасте пород и руд Ханинского апатитоносного района // Доклады АН СССР. 1984. Т. 279, № 3. С. 713–717.
- Панина Л.И., Прошенкин И.Е., Булгакова Е.Н.** Формирование пород Ханинского массива (Алданский щит) по данным изучения химизма расплавных включений // Геология и геофизика. 1987а. № 8. С. 50–62.

Панина Л.И., Прошенкин И.Е., Булгакова Е.Н., Усольцева Л.М. Ханинский массив ультраосновных-средних пород и его генезис (Алданский щит) // Геология и геофизика. 1987b. № 6. С. 39–49.

Перовская Л.К., Барина А.С. и др. Отчет по предварительной разведке месторождения Укдуска Ханинского апатитового района за 1984–1986 гг. Ханинская ГРП, 1987. О-50-XXX, О-50-XXV, Якутская АССР. 231 с.

Прошенкин И.Е., Кузнецова И.К. Некоторые особенности порообразующих минералов Ханинского массива (Алданский щит) // Геология и геофизика. 1988. № 6. С. 85–93.

Радков А.В., Молчанов А.В., Артемьев Д.С., Белекко Е.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-51 – Алдан. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 365 с.

Родионов Н.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Капитонов И.Н., Балашова Ю.С., Беляцкий Б.В., Арзамасцев А.А., Сергеев С.А. U-Pb SHRIMP-II возраст титанита и время образования апатит-нефелиновой минерализации Хибинского и Ловозерского щелочных массивов (Кольский полуостров) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 8. С. 1195–1210.

Сальникова Е.Б., Ларин А.М., Котов А.Б., Глебовицкий В.А., Суханов М.К., Яковлева С.З., Ковач В.П., Бережная Н.Г., Толкачев М.Д. Каларский анортозит-чарнокитовый комплекс (Алдано-Становой щит): возраст и тектоническое положение. // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2004. Т. 12, № 3. С. 3–11.

Смелов А.П., Зедгенизов А.Н., Тимофеев В.Ф. Фундамент Северо-Азиатского кратона: Алдано-Становой щит: Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М. : Наука/Интерпериодика, 2001. С. 81–103.

Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. № 11. С. 1181–1199.

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.

Gladkochub D.P., Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Ponomarchuk V.A., Stanevich A.M. Mafic intrusions in southwestern Siberia and implications for a Neoproterozoic connection with Laurentia // Precambrian Research. 2006. V. 147. P. 260–278.

Ernst R., Hamilton M., Söderlund U. et al. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nature Geoscience. 2016. 9. P. 464–469.

Kennedy A.K., Kamo S.L., Nasdala L., Timms N.E. Grenville skarn titanite: potential reference material for SIMS U-Th-Pb analysis // Canadian Mineralogist. 2010. V. 48 (12). P. 1423–1443.

Ludwig K.R. SQUID 1.00, A user's manual. BGC Special Publication 2, 2455 Ridge Road, Berkeley, 2000, CA 94709, USA, 54 p.

Ludwig K.R. SQUID 2: A user's manual, rev. 12 // BGC Special Publication. 2009. V. 5. 2455. 110 p.

Ludwig K.R. User's manual for Isoplot/Ex 3.0. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. BGC Special Publication 1a: 2455 Ridge Road, Berkeley, 2003, CA 94709, USA, 71 p.

Mekhonoshin A.S., Ernst R., Soderlund U., Hamilton M.A., Kolotilin A.T.B., Izokh A.E., Polyakov G.V., Tolstykh N.D. Relationship between platinum-bearing ultramafic-mafic intrusions and large igneous provinces (exemplified by the Siberian craton) // Russ. Geol. Geophys. 2016. V. 57 (5). P. 822–833.

Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan Shield of Siberia, USSR: the age of its Archaean components and evidence for widespread reworking in the midProterozoic // Precambrian Research. 1992. V. 54. P. 195–210.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A. Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // Ore Geology Review. 2017. № 81. P. 296–308.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Sergeev S.A., Ernst R.E., Ponomarev J.D., Redina A.A., Chebotarev D.A., Nikolenko A.M., Dultsev V.F., Moroz T.N., Minakov A.V. Petrography, mineralogy and SIMS U-Pb geochronology of 1.9–1.8 Ga carbonates and associated alkaline rocks of the Central-Aldan magnesiocarbonatite province (South Yakutia, Russia) // Mineralogy and Petrology. 2019. № 113. P. 329–352.

Rosen O.M. Siberian craton – a fragment of a Paleoproterozoic supercontinent // Russian Journal of Earth Sciences. 2002. № 4 (2). P. 103–119.

Williams I.S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe / eds. by M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridely. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // Review of Economic Geology. 1998. V. 7. P. 1–35.

References

Bogatikov O.A., Ryabchikov I.D., Kononova V.A. et al. Lamproity [Lamproites]. Moscow: Nauka, 1991. 302 p. In Russian
Bulakh A.G., Guliy V.N., Zolotarev A.A. Fosfornye rudy dokembriyskikh tolshch Aldana: geologiya, mineralogiya, genezis [Phosphorus ores of the Precambrian strata of Aldan: geology, mineralogy, genesis]. Leningrad: University Publishing House, 1990. 220 p. In Russian

Vladykin N.V. Aldanskaya provintsiya K-shchelochnykh porod i karbonatitov: voprosy magmatizma, genezisa i glubinnnykh istochnikov: Shchelochnoy magmatizm i problemy mantiynykh istochnikov [Aldan province of K-alkaline rocks and carbonatites: questions of magmatism, genesis and deep sources: Alkaline magmatism and problems of mantle sources]. Irkutsk: Publishing house of ISTU, 2001. pp. 18–45. In Russian

Vladykin N.V., Lepekhina E.A. The age of unusual xenogenic zircons from the kimberlites of Yakutia // Doklady of Earth Sciences. 2009. T. 429. pp. 1451–1456.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ernst R., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Pisarevsky S.A., Wingate M., Sederlund U. Proterozoic basic magmatism of the Siberian Craton: Main stages and their geodynamic interpretation // Geotectonics. 2012. 46(4), pp. 273–284.

Glukhovskiy M.Z., Kuzmin M.I., Bayanova T.B., Bazhenova G.N., Elizarov D.V., Serov P.A. Autonomous anorthosites of the Aldan shield and related rocks: age, geochemistry and mechanism of formation (on the example of the Kalar massif) // Doklady of Earth Sciences. 2011. V. 439. p. 1113.

Glebovitsky V.A., Sedova I.S., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Rizvanova N.G., Samorukova L.M. U-Pb Age of autochthonous Paleoproterozoic charnockite in the Aldan Shield // *Doklady of Earth Sciences*, 2012, V. 443, No. 6, pp. 451–457

Guliy V.N. *Geologiya i genezis apatitoprovyavleniy yugo-zapadnoy chasti Aldanskogo shchita (bassey n r. Khani). Avtoreferat kandidatskoy dissertatsii* [Geology and genesis of apatite occurrences in the southwestern part of the Aldan shield (basin of the Khani river): Ph.D. thesis abstract] Leningrad: "LSU", 1985. 24 p. In Russian

Gusev G.S., Khain V.E. On the relationships between the Baikal-Vitim, Aldan-Stanovoy and Mongol-Okhotsk terranes (south of Central Siberia) // *Geotectonics*. 1995. No. 5. P. 68–82.

Zubakova E.A. Mineral composition of rocks of the Khaninsky massif (Aldan shield, Yakutia) // *Metallogeny of ancient and modern oceans*. 2021. V. 27. pp. 141–143. In Russian

Kovach V.P., Kotov A.B., Salnikova E.B., et al. Age boundaries of the formation of highly metamorphosed supracrustal complexes of the Aldan shield: the first Sm-Nd isotope data // *Russian Foundation for Basic Research in the Siberian region: (Earth's crust and mantle): Abstracts*. Irkutsk: IZK SO RAN, 1995. V. 2. pp. 56–57. In Russian

Kotov A.B. *Granichnyye usloviya geodinamicheskikh modeley formirovaniya kontinental'noy kory Aldanskogo shchita: Avtoref. dis. ... dokt. geol. min. nauk* [Boundary conditions of geodynamic models for the formation of the continental crust of the Aldan shield: Author's abstract. dis. ... doct. geol. min. sciences] IGGD RAN: St. Petersburg State University Publishing House, 2003. 78 p. In Russian

Kotov A.B., Salnikova E.B., Larin A.M. Early Proterozoic granitoids of the junction zone of the Olekma granite-greenstone and Aldan granulite-gneiss regions, Aldan shield: age, sources and geodynamic setting of formation // *Petrology*. 2004. V. 12. No. 1. pp. 37–55.

Kotov A.B., Glebovitsky V.A., Kazansky V.I., Salnikova E.B., Pertsev N.N., Kovach V.P., Yakovleva S.Z. Age boundaries of the formation of the main mapped structural elements of the central part of the Aldan shield // *Doklady of the Earth Sciences*. 2005. V. 405, No. 8, pp. 1155–1158.

Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Glebovitsky V.A., Kovach V.P., Larin A.M., Velikoslavinsky S.D., Zagornaya N.Y. Sm-Nd isotopic provinces of the Aldan shield // *Doklady Earth Sciences*. 2006. V. 410. No. 7. pp. 1066–1069.

Kotov A.B., Vladykin N.V., Larin A.M., Gladkochub D.P., Salnikova E.B., Sklyarov E.V., Tolmacheva E.V., Donskaya T.V., Velikoslavinsky S.D., Yakovleva S.Z. New data on the age of ore formation in the unique Katugin rare-metal deposit (Aldan Shield) // *Doklady of Earth Sciences*, 2015, V. 463, No. 2, pp. 663–667

Kotov A.B., Skovitina T.M., Kovach V.P., Velikoslavinsky S.D., Lopatin D.V., Sklyarov E.V., Tolmacheva E.V., Bobrovskaya O.V. New data on the age of the continental crust of the western part of the Aldan shield: results of isotope-geochemical Sm-Nd studies of Cenozoic sandy deposits of the Chara and Tokkinskaya depressions // *Doklady of the Earth Sciences*. 2017. V. 475, No. 1. pp. 758–761.

Larin A.M., Kotov A.B., Salnikova E.B. New data on the age of granites of the Kodar and Tukuringra complexes, Eastern Siberia // *Petrology*. 2000. T. 8. No. 3. pp. 267–279.

Larin A.M., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Kovalenko V.I., Kovach V.P., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G., Ivanov V.E. Age of the Katugin Ta-Nb ore deposit (Aldan-Stanovoi shield): The problem of distinguishing of new global rare-metal metallogenic epoch // *Doklady of the Earth Sciences*. 2002. V. 383. No. 3. pp. 336–339.

Larin A.M., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Ryt'sk E.Yu., Yakovleva S.Z., Berezhnaya N.G., Kovach V.P., Kovalenko V.I., Buldygerov V.V., Srytsev N.A. North-Baikal volcanoplutonic belt: Timing and tectonic setting // *Doklady of Earth Sciences*. 2003. V. 392. No. 4. pp. 963–967.

Larin A.M., Kotov A.B., Salnikova E.B. The Kalar Complex, Aldan-Stanovoi Shield, an ancient anorthosite-mangerite-charnockite-granite association: Geochronologic, geochemical, and isotopic-geochemical characteristics // *Petrology*. 2006. T. 14. No. 1. pp. 2–20.

Neimark L.A., Iskanderova A.D., Timashkov A.N., Mironyuk E.P. *Novyye dannyye o vozraste porod i rud Khaninskogo apatitonosnogo rayona* [New data on the age of rocks and ores of the Khaninsky apatite-bearing region] // *Doklady of the Academy of Sciences of the USSR*. 1984. V. 279. No. 3. pp. 713–717. In Russian

Panina L.I., Proshenkin I.E., Bulgakova E.N. Formation of rocks of the Khaninsky massif (Aldan shield), according to the study of the chemistry of melt inclusions // *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics). 1987a. No. 8. pp. 50–62. In Russian

Panina L.I., Proshenkin I.E., Bulgakova E.N., Usoltseva L.M. Khani massif of ultrabasic-basic rocks and its genesis (Aldan shield) // *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics). 1987b. No. 6. pp. 39–49. In Russian

Popov N.V., Kotov A.B., Postnikov A.A. et al. Age and tectonic position of the Chiney Layered Massif, Aldan shield. // *Dokl. Earth Sc.* 2009. V. 424. No. 1. pp. 64–67.

Perovskaya L.K., Barinova A.S., et al. *Otchet po predvaritel'noy razvedke mestorozhdeniya Ukduska Khaninskogo apatitonosnogo rayona za 1984–1986 gg. Khaninskaya GRP, 1987. O-50-KhKhKh, O-50-KhKhV, Yakutskaya ASSR* [Report on preliminary exploration of the Ukduska deposit in the Khaninsky apatite-bearing region for 1984–1986. Khaninskaya GRP, 1987. O-50-XXX, O-50-XXV, Yakutsk ASSR]. 231 p. In Russian

Proshenkin I.E., Kuznetsova I.K. Some features of rock-forming minerals of the Khani massif (Aldan shield) // *Geologiya i geofizika* (Russian Geology and Geophysics). 1988. No. 6. pp. 85–93. In Russian

Radkov A.V., Molchanov A.V., Artemiev D.S., Belenko E.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Aldano-Zabaykal'skaya. List O-51 – Aldan. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1: 1000000 (third generation). Aldan-Transbaikalian series. Sheet O-51-Aldan. Explanatory letter]. St. Petersburg : Cartographic factory VSEGEI, 2015. 365 p. In Russian

Rodionov N.V., Lepekhina E.N., Antonov A.V., Kapitonov I.N., Balashova Yu.S., Belyatsky B.V., Arzamastsev A.A., Sergeev S.A. U-Pb SHRIMP-II ages of titanite and timing constraints on apatite-nepheline mineralization in the Khibiny and Lovozero alkaline massifs // *Russian Geology and Geophysics*. 2018. V. 59. No. 8. pp. 962–974

Sal'nikova E.B., Larin A.M., Kotov A.B., Glebovitsky V.A., Yakovleva S.Z., Kovach V.P., Berezhnaya N.G., Tolkachev M.D., Sukhanov M.K. The Kalar anorthosite-charnockite complex of the Aldan-Stanovoi shield: age and tectonic implications // *Stratigraphy and geological correlation*. 2004. V. 12. No. 3. pp. 221–228.

Smelov A.P., Zedgenizov A.N., Timofeev V.F. *Fundament Severo-Aziatskogo kratona: Aldano-Stanovoy shchit: Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)* [The basement of the North Asian craton: Aldan-Stanovoy shield: Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]

tonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Moscow : MAIK "Science / Interperiodica" 2001. pp. 81–103. In Russian

Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B. Thermochronology of the Chernorudskaya granulite zone (Ol'khon region, Western Baikal region) // *Geochemistry International*. 2009. No. 11. pp. 1107–1124

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.

Gladkochub D.P., Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Ponomarchuk V.A., Stanevich A.M. Mafic intrusions in southwestern Siberia and implications for a Neoproterozoic connection with Laurentia // *Precambrian Research* 2006. V. 147. pp. 260–278.

Ernst R., Hamilton M., Söderlund U. et al. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic. // *Nature Geoscience*. 2016. 9. pp. 464–469.

Kennedy A.K., Kamo S.L., Nasdala L., Timms N.E. Grenville skarn titanite: potential reference material for SIMS U-Th-Pb analysis // *Canadian Mineralogist*. 2010. v. 48 (12). pp. 1423–1443.

Ludwig K.R. SQUID 1.00, A user's manual. BGC Special Publication 2, 2455 Ridge Road, Berkeley, 2000, CA 94709, USA, 54 p.

Ludwig K.R. User's manual for Isoplot/Ex 3.0. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. BGC Special Publication 1a: 2455 Ridge Road, Berkeley, 2003, CA 94709, USA, 71 p.

Ludwig K.R. SQUID 2: A user's manual, rev. 12 // BGC Special Publication. 2009. V. 5. 2455. 110 p.

Mekhonoshin, A.S., Ernst, R., Soderlund, U., Hamilton, M.A., Kolotilin, A.T.B., Izokh, A.E., Polyakov, G.V., Tolstykh, N.D. Relationship between platinum-bearing ultramafic- mafic intrusions and large igneous provinces (exemplified by the Siberian craton) // *Russ. Geol. Geophys.* 2016. 57 (5). pp. 822–833.

Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan Shield of Siberia, USSR: the age of its Archaean components and evidence for widespread reworking in the midProterozoic // *Precambrian Research* 1992. V. 54. pp. 195–210.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev S.A. Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia). // *Ore Geology Review* 2017.81, pp. 296–308.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Sergeev S.A., Ernst R.E., Ponomarev J.D., Redina A.A., Chebotarev D.A., Nikolenko A.M., Dultsev V.F., Moroz T.N. and Minakov A.V. Petrography, mineralogy and SIMS U-Pb geochronology of 1.9–1.8 Ga carbonatites and associated alkaline rocks of the Central-Aldan magnesiocarbonatite province (South Yakutia, Russia) // *Mineralogy and Petrology*. 2019. 113. pp. 329–352.

Rosen O. M. Siberian craton – a fragment of a Paleoproterozoic supercontinent // *Russian Journal of Earth Sciences* 2002. 4(2). pp. 103–119

Williams I.S. U–Th–Pb geochronology by ion microprobe / Eds. M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridely. Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes // *Review of Economic Geology*. 1998. V.7. pp. 1–35.

Информация об авторах:

Дорошкевич А.Г., доктор геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. И.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

Шарыгин В.В., старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, лаборатория термобарогеохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: sharygin@igm.nsc.ru

Пonomарчук А.В., младший научный сотрудник, лаборатория изотопно-аналитической геохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: antponomar@gmail.com

Изох А.Э., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, лаборатория петрологии и рудоносности магматических формаций, Институт геологии и минералогии им. И.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: izokh@igm.nsc.ru

Избродин И.А., заведующий лабораторией петрологии, Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия.

E-mail: izbrodin@ginst.ru

Зубакова Е.А., инженер, Институт геологии и минералогии им. И.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: zybakovaea@igm.nsc.ru

Прокопьев И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Сергеев С.А., кандидат геолого-минералогических наук, директор ЦИИ, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: Sergey_Sergeev@vsegei.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Doroshkevich A.G., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of ore-forming processes of alkaline magmatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: doroshkevich@igm.nsc.ru

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

E-mail: sharygin@igm.nsc.ru

Ponomarchuk A.V., Junior Researcher, Laboratory of isotope-analytical geochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: antponomar@gmail.com

Izokh A.E., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Chief Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: izokh@igm.nsc.ru

Izbrodin I.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory of petrology, Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia.

E-mail: izbrodin@ginst.ru

Zubakova E.A., Engineer, Laboratory of ore-forming processes of alkaline magmatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: zybakovaea@igm.nsc.ru

Prokopyev I.R., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Researcher, Laboratory of ore-forming processes of alkaline magmatism, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Sergeev S.A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Director of Isotopic Investigation Center, AP Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia.

E-mail: Sergey_Sergeev@vsegei.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 24.06.2021; одобрена после рецензирования 18.11.2021; принята к публикации 09.09.2022

The article was submitted 24.06.2021; approved after reviewing 18.11.2021; accepted for publication 09.09.2022