



GEOCHRONOLOGY OF ALKALINE ROCKS FROM THE BURPALA MASSIF (NORTHERN PRIBAIKALYE): NEW U-Pb DATA

I.A. Izbrodin ^{1,3}, A.G. Doroshkevich ^{1,2}, A.V. Malyutina^{1,3}, D.V. Semenova ¹, T.A. Radomskaya ^{3,4},
M.N. Kruk^{1,3}, I.R. Prokopyev ^{1,3}, A.E. Starikova ^{1,3}, M.O. Rampilov ^{2,3}

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

² Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

³ Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

⁴ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

ABSTRACT. Geochronological studies have been made on the main types of rocks from the Burpala alkaline massif and two gabbro and gabbro-diorite dikes located nearby. U-Pb LA-SF-ICP-MS zircon geochronology for the Burpala massif yielded a date of 294 ± 2 Ma for gabbro crystallization, 607 ± 4 Ma for diorite crystallization, 298 ± 2 and 296 ± 2 Ma for melanocratic alkaline and nepheline syenite crystallization, 291 ± 2 and 293 ± 3 for quartz and quartz-containing syenite crystallization, and 293 ± 3 Ma for alkaline granite crystallization. The stage of formation of the massif rocks (298–291 Ma) coincides with the formation period of alkaline rocks from the Synnyr pluton and some alkaline complexes of the Vitim segment of Transbaikalia and confirms a widespread occurrence of post-collisional alkaline magmatism in Western Transbaikalia.

KEYWORDS: Burpala massif; nepheline and alkaline syenites; gabbro; diorite; U-Pb age; Northern Pribaikalye

FUNDING: The geological study of the area was performed as part of the state assignments of IGM SB RAS (122041400241-5) and GIN SB RAS (AAAA-A21-121011390002-2), the study of composition and age of rocks was funded by the RSF, project 22-17-00078.



EDN: RDVHJJ

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Ivan A. Izbrodin, izbrodin@igm.nsc.ru

Received: May 3, 2023

Revised: September 22, 2023

Accepted: October 13, 2023

FOR CITATION: Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Malyutina A.V., Semenova D.V., Radomskaya T.A., Kruk M.N., Prokopyev I.R., Starikova A.E., Rampilov M.O., 2024. Geochronology of Alkaline Rocks from the Burpala Massif (Northern Pribaikalye): New U-Pb Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0741. doi:10.5800/GT-2024-15-1-0741

ГЕОХРОНОЛОГИЯ ПОРОД ЩЕЛОЧНОГО МАССИВА БУРПАЛА (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ): НОВЫЕ U-Pb ДАННЫЕ

И.А. Избродин^{1,3}, А.Г. Дорошкевич^{1,2}, А.В. Малютина^{1,3}, Д.В. Семенова¹, Т.А. Радомская^{3,4},
М.Н. Крук^{1,3}, И.Р. Прокопьев^{1,3}, А.Е. Старикова^{1,3}, М.О. Рампилов^{2,3}

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

² Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

⁴ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведены геохронологические исследования пород основных разновидностей щелочного массива Бурпала, а также двух даек габбро, габбро-диоритов, расположенных рядом с массивом. Данные U-Pb LA-SF-ICP-MS изотопного датирования цирконов показали время кристаллизации габбро – 294 ± 2 млн лет, диоритов – 607 ± 4 млн лет, меланократовых щелочных и нефелиновых сиенитов – 298 ± 2 и 296 ± 2 млн лет, кварцевых и кварцсодержащих сиенитов – 291 ± 2 и 293 ± 3 млн лет, щелочных гранитов – 293 ± 3 млн лет. Этап формирования пород комплекса ($298\text{--}291$ млн лет) совпадает с периодом образования щелочных пород Сыннырского плутона и некоторых щелочных комплексов витимского сегмента Забайкалья и подтверждает широкое проявление постколлизийного щелочного магматизма в Западном Забайкалье.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: массив Бурпала; нефелиновые и щелочные сиениты; габбро; диорит; U-Pb возраст; Северное Прибайкалье

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Изучение геологии района проводилось в рамках госзаданий ИГМ СО РАН (122041400241-5) и ГИН СО РАН (AAAA-A21-121011390002-2), изучение вещественного состава и возраста пород – за счет средств РНФ, проект № 22-17-00078.

1. ВВЕДЕНИЕ

Бурпалинский массив (рис. 1), расположенный в Северном Прибайкалье, наряду с Сыннырским ультракалийным и несколькими мелкими щелочными массивами (Акит, Манюкан, Гилинда, Гоуджикит, Горемыка), входит в состав Северо-Байкальской щелочной провинции в одноименной позднепалеозойской рифтогенной зоне. Она находится в области сочленения Сибирского кратона и Центрально-Азиатского складчатого пояса (рис. 1, б). Провинция была выделена А.Я. Жидковым при изучении щелочных пород массивов Сынныр и Якша [Zhidkov et al., 1963]. Прежде всего, массив Бурпала является уникальным редкометалльным щелочным объектом, в котором известно более 70 минеральных видов, в том числе новых и редчайших [Portnov, 2018]. По минеральным ассоциациям массив подобен Ловозерскому и Хибинскому массивам [Arkhangelskaya, 1974; Portnov, 2018]. Он сложен несколькими интрузивными фазами: эгирин-авгитовыми и арфведсонитовыми щелочными сиенитами, нефелиновыми трахитоидными сиенитами, кварцевыми сиенитами, жилами сиенит-пегматитов, щелочных гранитов, аплитов, дайками шонкинитов и апатит-флюоритовых пород [Vladykin et al., 2014].

Существует общее мнение, что нефелиновые сиениты и другие породы в щелочных комплексах образуются в результате процесса фракционной кристаллизации родоначальных мантийных щелочно-ба-

зитовых расплавов, а появление в таких щелочных комплексах гранитов и кварцевых сиенитов обусловлено коровой контаминацией или коровым анатексисом [Upton et al., 2003; Kogarko et al., 2010], либо образование нефелиновых сиенитов происходит при ассимиляции карбонатных осадочных пород, как, например, было отмечено для пород Сайбарской интрузии [Vorontsov et al., 2021] и в некоторых массивах Витимского сегмента [Doroshkevich, 2013], поэтому до сих пор ведутся серьезные споры о связи между нефелиновыми и кварцевыми сиенитами, гранитами в комплексах, подобных Бурпале, и длительности их становления. Вопрос о том, являются ли краевые кварцевые породы массива отдельной фазой или фацией, до сих пор не был решен [Konev, 1982]. Одним из важных аспектов в решении этого вопроса является определение времени формирования разновидностей пород.

Имеющиеся значения возраста кристаллизации щелочных сиенитов и рудоносных пегматитов Бурпалы (U-Pb методом по циркону [Kotov et al., 2013; Vladykin et al., 2014]) составляют 294 ± 1 и 283 ± 8 млн лет соответственно. Геохронологические данные по другим главным фазам массива, в том числе по нефелиновым сиенитам, кварцевым сиенитам и гранитам, отсутствуют. Также нет информации о возрасте даек габбро и габбро-диоритов, расположенных в непосредственной близости к массиву, которые могут быть важными для

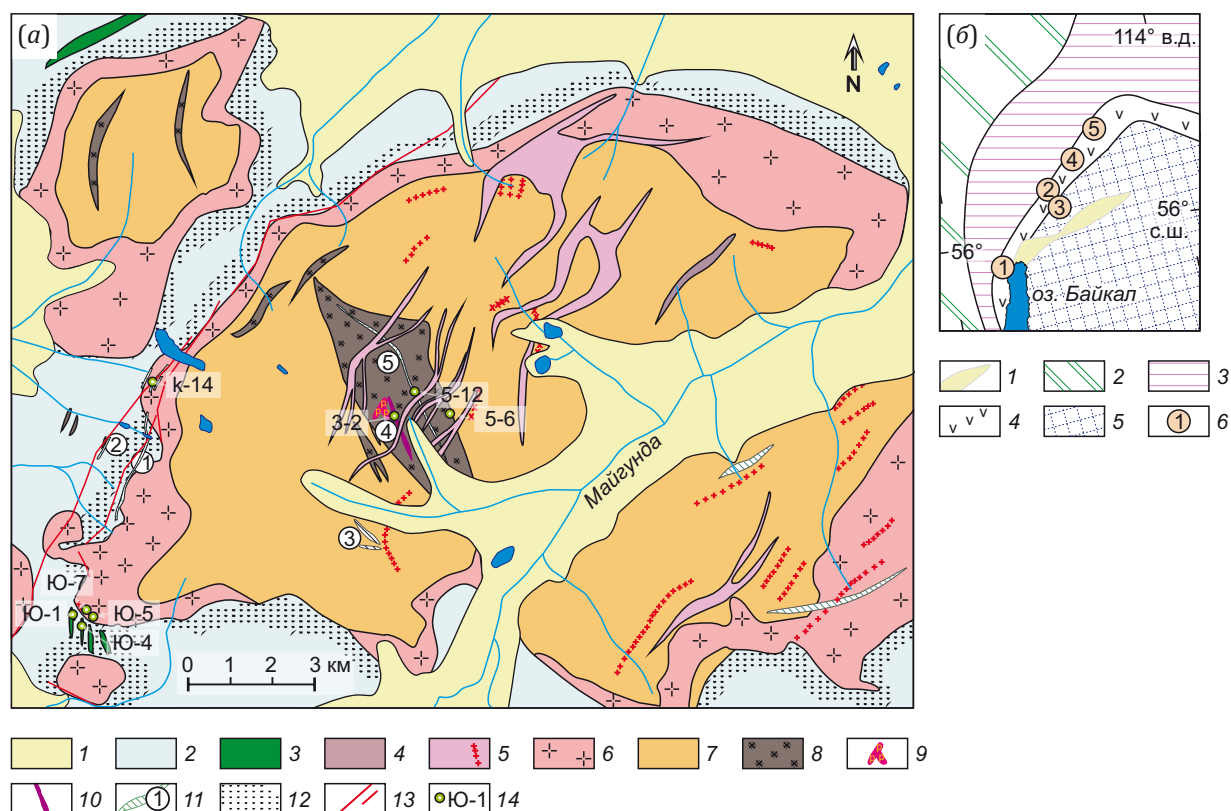


Рис. 1. Схема геологического строения массива Бурпала (по материалам [Arkhangelskaya, 1974; Vladykin, Sotnikova, 2017] с изменениями авторов) (а) и положение щелочных интрузий в структурах юга Сибири [Rytsk et al., 2017] (б).

(а): 1 – четвертичные отложения; 2 – песчаники и алевролиты холоднинской свиты; 3 – диориты, габбро-диориты, габбро; 4 – мелкозернистые кварцевые сиениты; 5 – щелочные граниты и гранит-аплиты; 6 – кварцевые сиениты; 7 – щелочные сиениты; 8 – нефелиновые сиениты; 9 – пегматиты; 10 – апатит-флюоритовые породы; 11 – зоны редкоземельной и редкометалльной минерализации и их номер: 1–2 – проявление «Бурпала», 3–5 – проявление «Сюрприз»; 12 – роговики, фениты; 13 – разрывы; 14 – места отбора проб для U-Pb геохронологических исследований.

(б): 1 – четвертичные впадины; 2 – Сибирская платформа; 3 – Байкало-Патомский складчато-надвиговый пояс; 4 – Байкало-Муйский пояс; 5 – террейны Центрально-Азиатского складчатого пояса; 6 – щелочные массивы Сыннырского комплекса: 1 – Гуджежит, 2 – Бурпала, 3 – Аakit, 4 – Сынныр, 5 – Монюкан.

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Burpala massif (after [Arkhangelskaya, 1974; Vladykin, Sotnikova, 2017], with modifications) (a) and the location of alkaline intrusions in the structures of southern Siberia [Rytsk et al., 2017] (b).

(a): 1 – Quaternary deposits; 2 – sandstones and siltstones of the Kholodninsk formation; 3 – diorites, gabbro-diorites, gabbro; 4 – fine-grained quartz syenites; 5 – alkaline granites and granite-aplites; 6 – quartz syenites; 7 – alkaline syenites; 8 – nepheline syenites; 9 – pegmatites; 10 – apatite-fluorite rocks; 11 – rare earth and rare metal mineralization zones and their numbers: 1–2 – "Burpala" occurrence, 3–5 – "Syurpriz" occurrence; 12 – hornfelses, fenites; 13 – faults; 14 – U-Pb geochronological sampling sites.

(b): 1 – Quaternary depressions; 2 – Siberian platform; 3 – Baikal-Patom fold-thrust belt; 4 – Baikal-Muya belt; 5 – terranes of the Central Asian Fold Belt; 6 – alkaline massifs of the Synnyr complex: 1 – Goudzhekit, 2 – Burpala, 3 – Akit, 4 – Synnyr; 5 – Monyukan).

определения их возможной возрастной и генетической связи или отсутствия таковой.

Для установления геологической позиции основных фаз массива Бурпала и оценки возрастных соотношений между ними авторы провели петрографическое изучение и U-Pb (LA-SF-ICP-MS) изотопное датирование циркона из различных по составу пород, включая габбро и габбро-диориты.

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы, использованные для петрографических и геохронологических исследований, были отобраны коллективом авторов в ходе полевых работ на массиве Бурпала в 2022 г. Петрографическое изучение по-

род щелочного интрузива проводилось на микроскопе Olympus BX51 с фотокамерой. Исследования текстурно-структурных особенностей и соотношений минералов в породах проводились на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU JSM-6510LV с энергосберегающей приставкой для микрозондового анализа X-Max Oxford Instruments.

U-Pb изотопно-геохронологические исследования цирконов выполнены в Центре многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) методом LA-SF-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR (Thermo Fisher Scientific) с эксимерной системой лазерной абляции Analyte Excite (Teledyne Cetac, США), оснащенной двухкамерной

ячейкой HelEx II. Данные о морфологии и внутреннем строении зерен получены по катодолюминесцентным изображениям. Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигнала ^{208}Pb при минимальном значении $^{248}\text{ThO}^+ / ^{232}\text{Th}^+$ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Все измерения выполнялись по массам ^{202}Hg , $^{204}(\text{Pb}+\text{Hg})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U . Диаметр лазерного луча составлял 35 мкм, частота повторения импульсов – 5 Гц и плотность энергии лазерного излучения – 3 Дж/см². Данные масс-спектрометрических измерений, в том числе расчет изотопных отношений, обрабатывались с помощью программы «Glitter» [Griffin et al., 2008]. Для учета элементного и изотопного фракционирования U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартных цирконов Plesovice [Sláma et al., 2008]. Для контроля качества данных использован стандартный циркон Temora-2 [Black et al., 2004], для которого получены конкордантные оценки возраста 416 ± 3 (2 σ) и 418 ± 4 (2 σ) млн лет. Погрешности единичных анализов (отношения, возраст) приведены на уровне 1 σ , погрешности вычисленных конкордантных возрастов и пересечений с конкордией – на уровне 2 σ . Диаграммы с конкордиями построены с использованием программы Isoplot [Ludwig, 2003].

3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАССИВА

Бурпалинский массив, площадью около 200 км², в плане имеет форму, близкую к изометричной, он несколько вытянут в северо-восточном направлении с крутыми северо-западными контактами. Массив имеет четкое зональное строение: эндоконтактовая часть сложена кварцевыми и кварцсодержащими сиенитами, центральная – трахитоидными щелочными и нефелиновыми сиенитами, в которых наблюдаются более мелкие линзообразные тела фойяитов (4.0×0.5 км²) (рис. 1, а). Последние также слагают небольшие по площади участки в северо-западной части массива. Жильная фация представлена микроклинитами, гранитами, гранит-аплитами, сиенит-аплитами, гранитными пегматитами. По данным геолого-съёмочных работ формирование массива было двух- или трехфазным. Согласно А.М. Портнову [Portnov, 1965], контакты между щелочными и нефелиновыми сиенитами в участках разные – от резких и четких до расплывчатых. По мнению Г.В. Андреева [Andreev, 1981], прослеживаются постепенные переходы между кварцевыми и щелочными сиенитами от контакта к центру массива, при этом наблюдаются секущие контакты с нефелиновыми сиенитами. Мелкозернистые граносиениты и щелочные граниты слагают как маломощные дайки (1–2 м), так и маломощные тела (100–150 м) протяженностью до 3–4 км. Особое место среди пород жильной фации занимают тела эвдиалит-содалитовых сиенитов мощностью 1–3 м и протяженностью в сотни метров, а также апатит-флюоритовые породы мощностью от 10 до 20 м, протяженностью до 300 м [Vladykin et al., 2014],

установленные в центральной части массива. Пегматиты всех типов нередко альбитизированы, эгиринизированы и включают комплекс аксессуарных минералов, содержащих Zr, REE, Nb, Be, Cs, Th и другие редкометалльные элементы. Дайки меланократовых пород неясного генезиса встречаются среди осадочно-терригенных отложений. По составу они близки к шонкитам. Мощность таких даек составляет 1–5 м, протяженность – до 100 м [Vladykin et al., 2014]. Чаще всего они обнаружены вблизи зон метасоматитов в северо-западной части массива. Метасоматиты отмечаются в эндоконтактовой зоне в виде маломощных (от первых сантиметров до 20 м и более) жилоподобных зон, которые, группируясь, прослеживаются на значительные расстояния. Они представлены фенитами, альбититами, эгиринитами, эгирин-микроклиновыми образованиями и их разновидностями и несут комплексную уран-торий-редкометалльную минерализацию. Вещающими породами массива являются слабометаморфизованные осадочно-терригенные отложения венда (?), представленные песчаниками, алевропесчаниками и алевролитами с редкими прослоями известняков. Эти породы вблизи массива превращены в роговики различного состава. В пределах юго-западной и юго-восточной части массива в осадочно-терригенных породах в виде секущих или послойных тел развиты габбро, габбро-диориты с полнокристаллической и афанитовой структурой. Мощность таких выходов варьируется от 50 до 200 м.

4. ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Детальное петрографическое описание пород массива приведено в монографической работе Г.В. Андреева и соавторов [Andreev et al., 1969]. В данной работе представлено петрографическое описание разновидностей пород массива Бурпала, для которых проведены геохронологические исследования.

Меланократовые щелочные сиениты (обр. БРЗ 5-6) представляют собой мелкозернистые полнокристаллические породы (рис. 2, а), сложенные преимущественно полевым шпатом (~60 %), щелочным амфиболом (~15 %), плагиоклазом (~9 %) и биотитом (~8 %). В качестве второстепенного минерала отмечается клинопироксен (диопсид), представленный пойкилитовыми включениями в амфиболе. Из аксессуарных минералов встречаются титанит, циркон и апатит, алланит, рудные минералы, которые приурочены к темноцветам. Удлиненно-призматические и таблитчатые кристаллы полевого шпата образуют взаимные заливообразные прорастания с темноцветными минералами. По периферии зерна полевого шпата содержат ламели альбита. Аллотриоморфные таблитчатые выделения щелочного амфибола содержат твердые включения диопсида, слюды, титанита и апатита, из-за чего имеют ситовидную микроструктуру. В гипидиоморфных и таблитчатых кристаллах слюды встречаются мелкие включения зерен циркона и титанита.

Нефелин-содалитовые меланократовые сиениты (обр. БРЗ 5-12) – это массивные или трахитоидные мелко- и среднезернистые породы (рис. 2, б), сложенные преимущественно калиевым полевым шпатом (~40–50 %), клинопироксеном (эгирин и эгирин-диопсид) (~15–20 %), нефелином (~10 %) и содалитом (~10 %). В

качестве второстепенных минералов отмечается аннит (~5 %), амфибол (~2–3 %) и плагиоклаз (~4–5 %). Иногда встречается канкринит. Акцессорные минералы – титанит, апатит, лопарит, флюорит, ловенит, катаплетит, циркон, вкрапленные и гнездобразные выделения титаномагнетита. Содалит вдоль трещин замещается

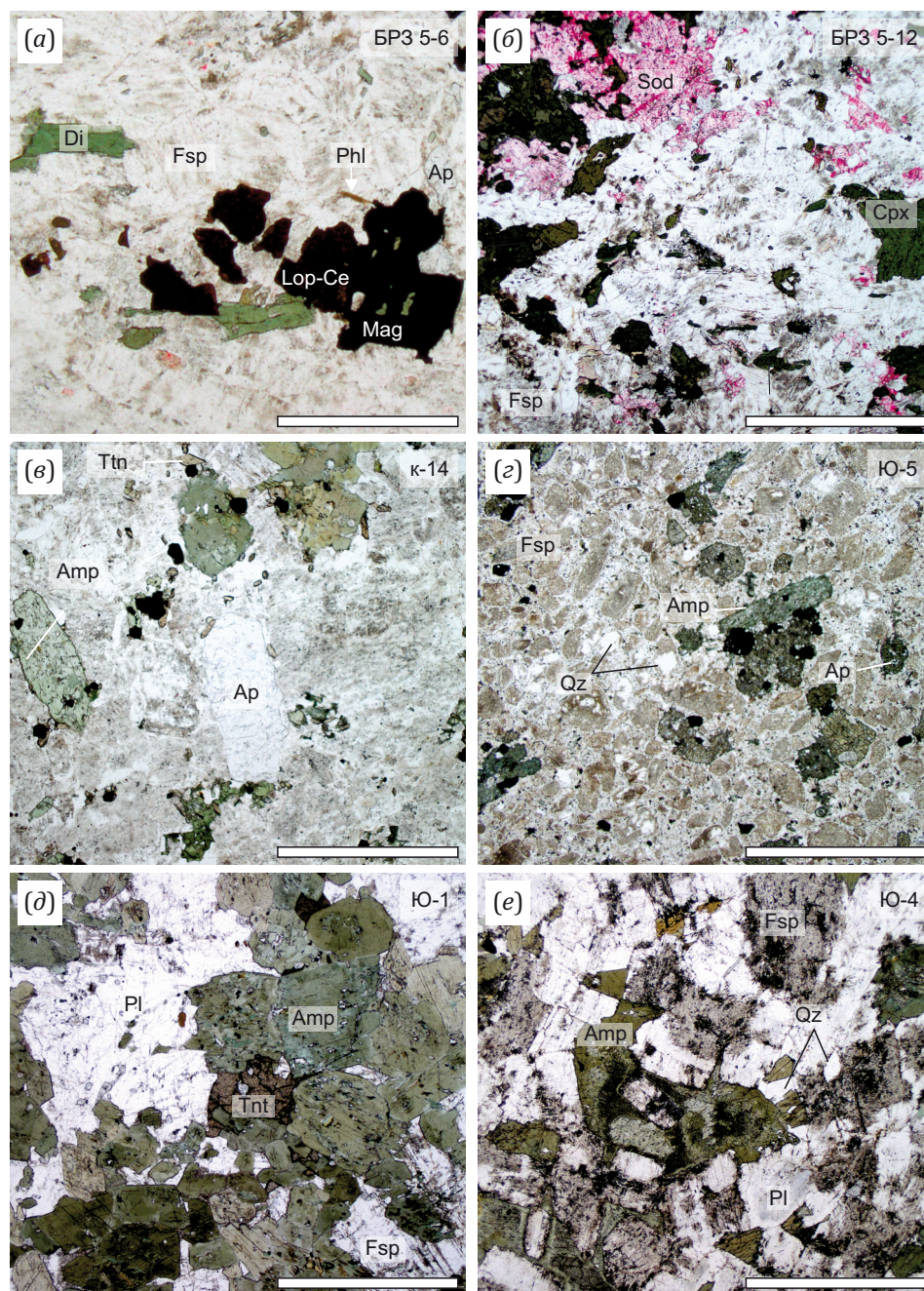


Рис. 2. Микрофотографии пород в проходящем свете, поляризаторы параллельны.

(а) – щелочной сиенит; (б) – нефелиновый сиенит; (в, г) – кварцевые сиениты; (д) – габбро; (е) – диорит. Аббревиатура минералов: Amp – амфибол, Ap – апатит, Di – диопсид, Cpx – клинопироксен, Fsp – калиевый полевой шпат, Lop-Ce – лопарит, Mag – магнетит, Phl – флогопит, Pl – плагиоклаз, Sod – содалит, Tnt – титанит. Масштабный отрезок соответствует 2 мм, на фрагменте (а) – 0.1 мм.

Fig. 2. Plane-polarized light micrographs of rocks.

(а) – alkaline syenite; (б) – nepheline syenite; (в, г) – quartz syenites; (д) – gabbro; (е) – diorite. Mineral abbreviation: Amp – amphibole, Ap – apatite, Di – diopside, Cpx – clinopyroxene, Fsp – potassium feldspar, Lop-Ce – loparite, Mag – magnetite, Phl – phlogopite, Pl – plagioclase, Sod – sodalite, Tnt – titanite. A scale bar corresponds to 2 mm, in fragment (а) – to 0.1 mm.

цеолитом. Удлиненные таблитчатые гипидиоморфные кристаллы калиевого полевого шпата ксеноморфны относительно пироксена и иногда вытянуты преимущественно в одном направлении, что придает породе трахитоидную текстуру. В зернах отмечаются пертитовые вроски альбита, а некоторые зерна калиевого полевого шпата насыщены многочисленными мелкими включениями клинопироксена и титанита. Удлиненные призматические зерна клинопироксена содержат зерна титанита, а также образуют с ним сростки. Аллотриоморфные призматические зерна нефелина и содалита ксеноморфны по отношению ко всем минералам породы и содержат многочисленные минеральные включения клинопироксена. Слюда (аннит) в породе встречается в виде аллотриоморфных таблитчатых чешуек, в качестве включений они содержат мелкие зерна клинопироксена.

Кварцевые (обр. Ю-5) и кварцсодержащие сиениты (обр. к-14) – среднезернистые массивные породы (рис. 2, в, г), сложенные преимущественно калиевым полевым шпатом (микроклин) (~60 %), плагиоклазом (~15 %) и амфиболом (~15 %). В качестве второстепенного минерала отмечается кварц (~5–10 %). Из акцессорных минералов встречается титанит, апатит, циркон, алланит. Таблитчатые гипидиоморфные кристаллы калиевого полевого шпата с микроклиновой решеткой ксеноморфны относительно амфибола и плагиоклаза, но более идиоморфны относительно кварца. По периферии зерен плагиоклаза отмечается наличие мирмецитов. Амфибол содержит включения титанита и рудного минерала.

Щелочные граниты (Ю-7) сложены плагиоклазом (~35–40 %), калиевым полевым шпатом (~30–50 %), кварцем (~20–30 %) и мусковитом (~10 %) с редкими зернами щелочных амфибола и клинопироксена (эгирин). Из акцессорных присутствует рутил, апатит, магнетит и циркон. По полевым шпатам часто образуются вторичные серицит и каолинит. Мусковит образуется по хлориту, который, в свою очередь, замещает биотит.

В юго-западной части массива авторами были отобраны пробы роговообманковых габбро и диоритов.

Габбро (обр. Ю-1) представляет собой среднезернистую массивную породу (рис. 2, д), сложенную преимущественно плагиоклазом (~50–55 %) и амфиболом (роговая обманка) (~30–40 %). В качестве второстепенных минералов отмечается калиевый полевой шпат и слюды (аннит или флогопит). Из акцессорных минералов встречается титанит, циркон и апатит. Присутствует незначительное количество магнетита, сульфидов. Гипидиоморфные короткопризматические зерна амфибола срastaются со слюдой и титанитом. Иногда по слюде развивается эпидот и хлорит. Магнетит образует редкие вкрапленники, а сульфиды – гнездовые образования с сидеронитовой структурой.

Диорит (обр. Ю-4) представляет собой массивную среднезернистую породу (рис. 2, е), сложенную плагиоклазом (~55–60 %) и амфиболом (роговая обманка)

(~15–25 %), с второстепенными слюдами (аннит или флогопит) (~5 %), кварцем (~2–5 %) и калиевым полевым шпатом (1–2 %). Из акцессорных минералов встречается рутил, циркон, титанит, апатит, магнетит, сульфиды. Гипидиоморфные удлиненные таблитчатые зерна плагиоклаза в некоторых участках интенсивно каолинитизированы и серицитизированы. Гипидиоморфные короткопризматические зерна амфибола срastaются со слюдой, оба минерала иногда замещаются хлоритом и эпидотом. Аллотриоморфные зерна кварца ксеноморфны относительно порообразующих минералов. Единичные вытянутые зерна рутила ассоциируют с амфиболом.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb (LA-SF-ICP-MS) ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ

Изотопно-геохронологические исследования проведены для цирконов (рис. 3) из щелочных меланократовых (БРЗ 5-6) и нефелиновых (БРЗ 5-12) сиенитов центральной части, кварцевых (к-14) и кварцсодержащих (Ю-5) сиенитов краев части массива (см. рис. 1, а), дайки щелочных гранитов (Ю-7), а также маломощных даек габбро (Ю-1) и диоритов (Ю-4), прорывающих вмещающие осадочно-терригенные образования. Результаты датирования представлены в Прил. 1, табл. 1.1 и на рис. 4.

Циркон в пробах меланократовых щелочных (обр. БРЗ 5-6) и нефелиновых сиенитов (обр. БРЗ 5-12) представлен зернами призматического габитуса. Содержание $U=177\text{--}1577\text{ г/т}$, $Th/U=0.19\text{--}3.12$. В катодолюминесцентном (КЛ) изображении они имеют секториальное тонкозональное внутреннее строение, типичное для магматических цирконов, а также характеризуются присутствием следов перекристаллизации и редкими каймами обрастания, более яркими в КЛ (см. рис. 3, а, б). Согласно полученным данным время кристаллизации циркона из меланократовых щелочных (обр. БРЗ 5-6) и нефелиновых сиенитов (обр. БРЗ 5-12) составляет 298 ± 2 ($n=15$) и 296 ± 2 млн лет ($n=13$) соответственно (рис. 4, а, б), что, с учетом внутреннего строения цирконов, принимается авторами за возраст формирования этих пород.

Циркон из кварцевых (обр. Ю-5) и кварцсодержащих сиенитов (обр. к-14) представлен бипирамидально-призматическими зернами с четкой секториальной зональностью в КЛ изображениях, реже – с более темной центральной частью, имеющей нарушенную зональность (см. рис. 3, в, г). Содержание U в обеих пробах сиенитов находится в пределах 83–874 и 75–165 г/т соответственно. Th/U отношения варьируются от 0.66 до 1.44. Аналитически значимых различий в возрасте темных и светлых частей выявлено не было (Прил. 1, табл. 1.1). На графике с конкордией (рис. 4, в, г) результаты образуют конкордантные значения возраста 291 ± 2 (обр. к-14) и 293 ± 3 млн лет (обр. Ю-5) соответственно.

Зерна циркона из габбро (обр. Ю-1) и диорита (обр. Ю-4) имеют удлиненную призматическую форму. В

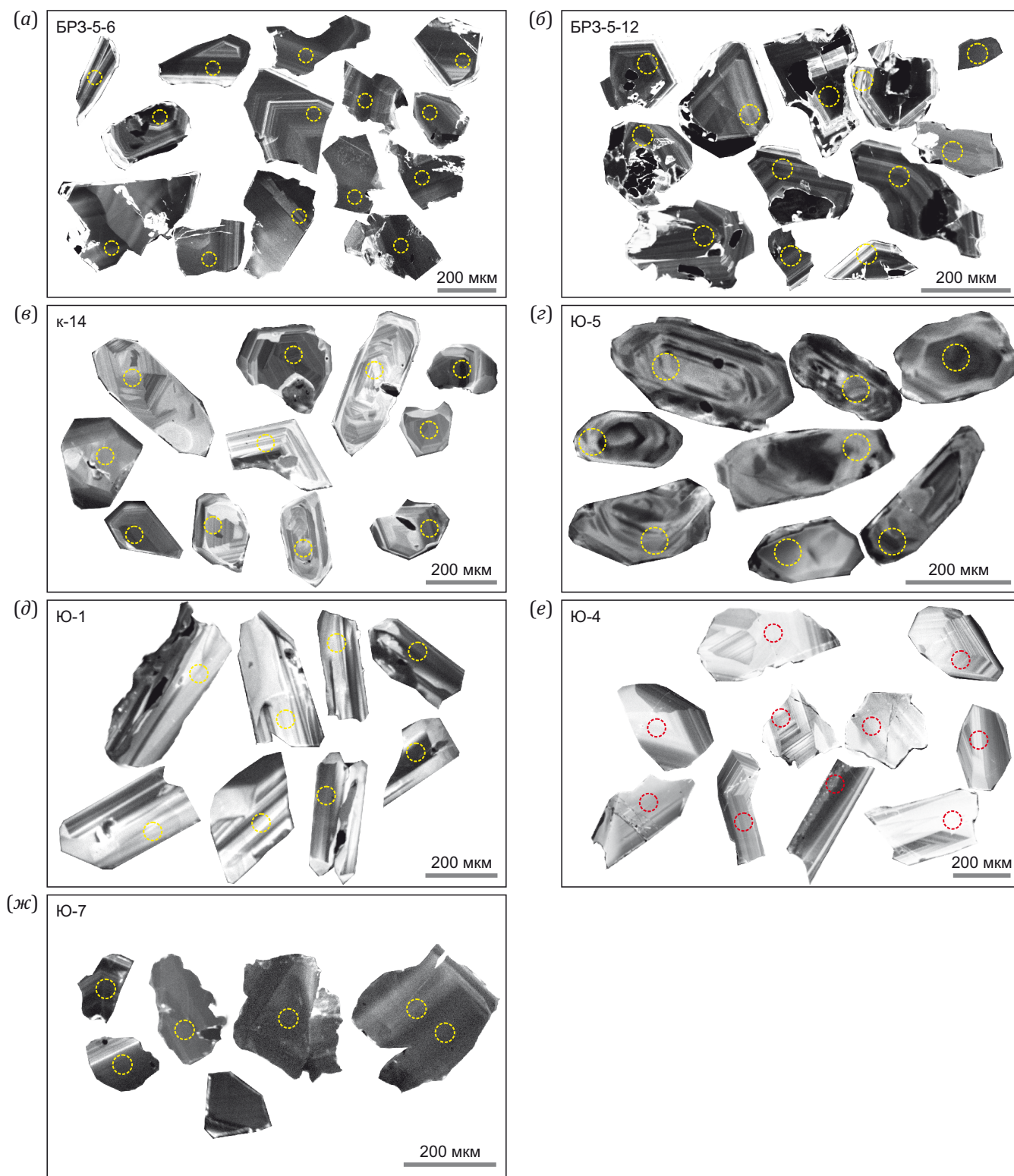


Рис. 3. Изображения представителных зерен циркона, выполненные в режиме КЛ.

(а, б) – щелочные меланократовые (обр. БР3 5-6) и нефелиновые (обр. БР3 5-12) сиениты из центральной части массива вблизи рудной зоны 5; (в, г) – кварцсодержащие и кварцевые сиениты из С-З (обр. к-14) и Ю-З (обр. Ю-5) контакта массива; (д) – габбро (обр. Ю-1) вблизи Ю-З контакта массива; (е) – диорит (обр. Ю-4) вблизи Ю-З контакта массива; (ж) – щелочные граниты (Ю-7) из жильного тела, Ю-З контакт массива.

Fig. 3. Cathodoluminescent images of representative zircon crystals.

(а, б) – alkaline melanocratic (sample БР3 5-6) and nepheline (sample БР3 5-12) syenites from the central part of the massif near the ore zone 5; (в, г) – quartz and quartz-bearing syenites from the N-W (sample к-14) and S-W (sample Ю-5) massif contacts; (д) – gabbro (sample Ю-1) near the S-W massif contact; (е) – diorite (sample Ю-4) near the S-W massif contact; (ж) – alkaline granites (sample Ю-7) from the vein of the S-W massif contact.

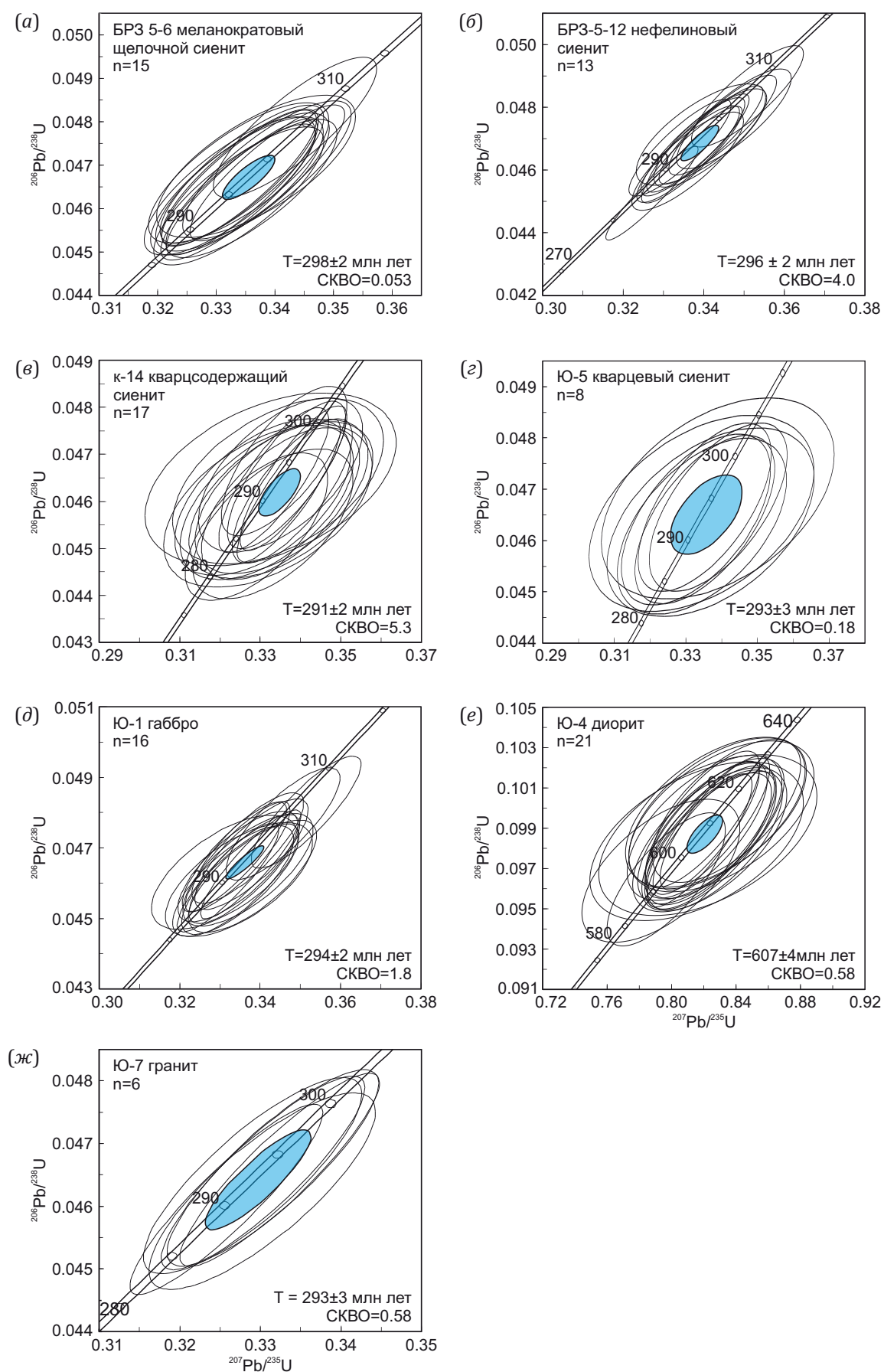


Рис. 4. Диаграммы с конкордией для цирконов из пород массива Бурпала. Условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 4. Diagrams with concordia for zircons from rocks of the Burpala massif. See Fig. 3 for legend.

КЛ изображении цирконы демонстрируют магматическую зональность (см. рис. 3, д, е). В зернах циркона из габбро концентрация урана варьируется от 375 до 1943 г/т, тогда как в цирконе из диорита она составляет 40–238 г/т, Th/U отношения варьируются от 0.19 до 2.48 и от 0.30 до 0.80 соответственно. Конкордантный U-Pb возраст цирконов из габбро составляет 294 ± 2 , а для диорита – 607 ± 4 млн лет.

В пробе жильных лейкократовых гранитов (Ю-7) циркон представлен субидiomорфными и идиоморфными призматическими зернами. В КЛ изображении цирконы характеризуются слабым свечением и относительно однородным внутренним строением, а краевая зона имеет характер тонкоритмичной зональности (см. рис. 3, ж). Содержание U=993–2529, Th/U=0.18–0.86 г/т. U-Pb concorдантный возраст зерен циркона составляет 293 ± 3 млн лет.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно А.Я. Жидкову [Zhidkov, 1961], в массиве Бурпала выделяются три фазы внедрения: в первую образовались трахитоидные нефелиновые сиениты, щелочные сиениты и кварцевые сиениты, во вторую – нефелиновые сиениты, щелочные сиенит-порфиры и щелочные метасоматиты, в третью – жильные породы. В работах [Portnov, Nechaeva, 1967; Arkhangel'skaya, 1974; Andreev, 1981] массив сформировался в две главные фазы: внедрение кварцевых и щелочных сиенитов – в первую, а трахитоидных нефелиновых сиенитов – во вторую. По мнению авторов этих работ, метасоматиты являются более поздними образованиями. Н.В. Владыкин с соавторами [Vladykin et al., 2014] отмечали, что формирование массива происходило в два этапа: ранний – образование шонкинитов и меланократовых сиенитов, главный – внедрение щелочной магмы, при дифференциации которой образовались нефелиновые сиениты, щелочные сиениты, кварцевые сиениты и далее породы жильной фазы (редкометалльные пегматиты, щелочные граниты, апатит-флюоритовые породы и др.).

Полученные авторами возрастные данные по основным фазам щелочного массива Бурпала определяют интервал кристаллизации пород ~ 300 – 289 млн лет. Обращает на себя внимание тот факт, что временной разрыв между формированием основных разновидностей пород, с учетом ошибки метода, частично перекрывается, но позволяет говорить об импульсном характере внедрения и длительности становления пород массива в интервале ~ 7 – 10 млн лет. (рис. 5).

Ранее установленный возраст для щелочных сиенитов [Kotov et al., 2013] ложится в интервал значений, полученных авторами для нефелиновых и щелочных сиенитов. Наиболее вероятно то, что нефелиновые и щелочные сиениты характеризовали первый импульс внедрения, а габбро, кварцевые сиениты и щелочные граниты – второй (рис. 5).

В связи с сильными изменениями в цирконах из метасоматических рудных зон (неопубликованные данные авторов) достоверный возраст рудной минерализации получить пока не удалось. Имеющиеся датировки редкометалльных пегматитов – 283 ± 8 (верхнее пересечение 843 ± 240) млн лет (U-Pb, циркон [Kotov et al., 2013; Vladykin et al., 2014]), скорее всего, не отражают истинный возраст и требуют дополнительного изучения другими методами.

Полученные значения возраста щелочных пород массива Бурпала коррелируют с U-Pb геохронологическими данными для щелочных пород Сынырского комплекса – 289.5 ± 3.2 млн лет (U-Pb, циркон [Izbrodin et al., 2017]). Это свидетельствует о близкой истории становления пород массивов Бурпала и Сыныр в пределах единой рифтогенной Северобайкальской зоны. Предполагается, что формирование родоначальных расплавов последнего связано с процессами взаимодействия позднепалеозойского Сибирского плюма и древней континентальной коры [Rytsk et al., 2017]. Кроме того, возрастной интервал пород массива Бурпала находится в пределах значений для других щелочных комплексов, расположенных в пределах витимского сегмента Западного Забайкалья (рис. 6). Так, в период

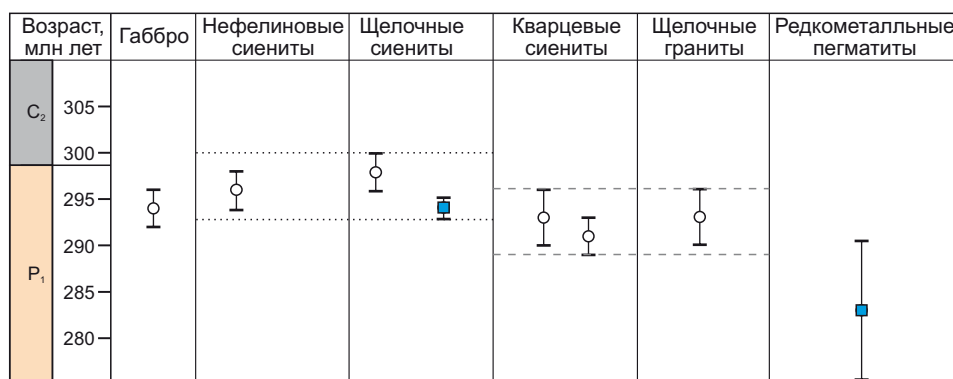


Рис. 5. Результаты геохронологических исследований (U-Pb метод) пород массива Бурпала. Синие значки – данные по [Kotov et al., 2013]. Пунктиром показаны вероятные интервалы магматических этапов (импульсов) магматизма.

Fig. 5. Results of geochronological studies (U-Pb method) of the Burpala massif rocks. Blue marks stand for the data after [Kotov et al., 2013]. The dotted line shows probable pulses of magmatism.

306–290 млн лет формировались щелочные породы Мухальского, Верхнебурульзайского, Инолоктинского, Чининского, Зимовьечинского, Тучинского и Комского массивов [Doroshkevich et al., 2012a, 2012b; Doroshkevich, 2013; Izbrodin et al., 2020]. Считается, что генерация и внедрение первичных магм для этих щелочных комплексов могли быть вызваны активностью мантийного плюма и сопровождающимися процессами рифтогенеза [Yarmolyuk et al., 2013]. Становление этих комплексов совпало с известным максимумом проявления магматических процессов на современной территории Западного Забайкалья и Прибайкалья, в результате которого происходило формирование крупнейшего гранитоидного Ангаро-Витимского батолита, возраст которого оценивается в 314–285 млн лет [Litvinovsky et al., 2011; Khubanov et al., 2021, и ссылки в статье], и синхронного мантийного магматизма, представленного щелочно-базитовыми интрузивами [Tsygankov et al., 2016, и ссылки в статье]. При этом авторами отмечается ведущая роль щелочно-базитовых магм в гранитообразовании, а плюмовая модель согласуется с их

внутриплитным характером [Tsygankov, 2014; Tsygankov et al., 2017; и др.]. Подтверждением этой модели является образование щелочных интрузий, одновозрастных с гранитами и базитами.

При этом исследователями отмечается ничтожная по объему доля базитового магматизма в Западном Забайкалье, как правило, представленного небольшими синплутоническими базитовыми интрузиями, комбинированными дайками, мафическими включениями в гранитоидах [Tsygankov et al., 2016; Khromykh et al., 2016]. Выяснение генетической связи между основными и щелочными породами имеет большое значение для установления условий формирования собственно щелочных сиенитовых массивов. Породы основного состава залегают главным образом далеко за пределами массива Бурпала, реже отмечаются во вмещающих его породах. Они представлены малочисленными дайками шонкинитов [Vladykin et al., 2014], габбро и диоритов и могут свидетельствовать о возможной генетической связи. Однако из-за отсутствия надежных геологических наблюдений (взаимоотношений)

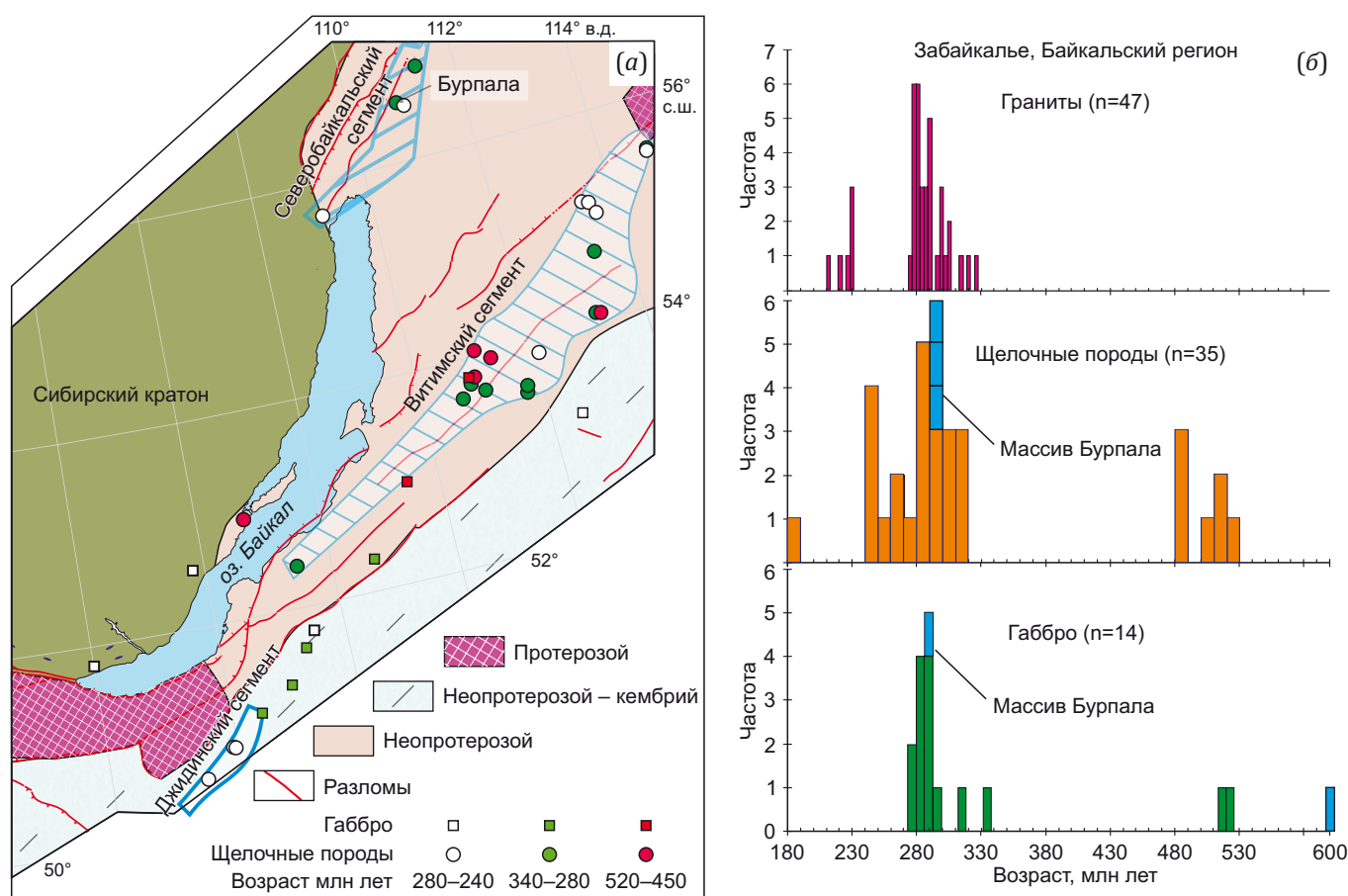


Рис. 6. Схема размещения массивов палеозойских – раннемезозойских щелочных пород Западного Забайкалья (а); сводные гистограммы распределения геохронологических данных для пород массива Бурпала в сравнении с щелочными, основными и кислыми породами Западного Забайкалья (б). Возрастные параметры взяты из работы [Izbrodin et al., 2020, 2022, ссылки в работе].

Fig. 6. Scheme of location of the Paleozoic – Early Mesozoic alkaline rocks of Western Transbaikalia (а); cumulative histograms of the distribution of geochronological data for the rocks of the Burpala massif in comparison with alkaline, basic, and acidic rocks of Western Transbaikalia (б). Age parameters are taken from [Izbrodin et al., 2020, 2022, referred to herein].

их позиция в определенной мере остается условной. Установленный возраст дайки габбро (проба Ю-1) 294 ± 2 млн лет свидетельствует о субсинхронном образовании с породами массива, в частности с кварцевыми сиенитами и гранитами, что позволяет предполагать не только их возрастную, но и возможную генетическую связь.

Иные возрастные характеристики демонстрирует дайка диоритов (проба Ю-4). Ее возраст оценен как 607 ± 4 млн лет. Значительный отрыв во времени (около 310 млн лет) от габбро не позволяет рассматривать их в составе единой серии. В это время в интервале 640–585 млн лет на данной территории [Makrygina et al., 1993; Amelin et al., 1997; Izokh et al., 1998; Rytsk et al., 2004, 2007] происходило образование пироксенит-габбро-норитовых, плагиогранитных, габбро-диорит-плагиогранитных интрузивных комплексов, кислых вулканитов и карбонатитов (Пограничное и Веселое проявления) [Doroshkevich et al., 2007a, 2007b; Ripp et al., 2009], формирование которых было связано с аккреционно-коллизией стадией [Konnikov et al., 1999; Khain et al., 2003].

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных геохронологических исследований цирконов из основных разновидностей пород массива Бурпала ограничивают его кристаллизацию в довольно узком интервале 300–289 млн лет. Внедрение основной фазы массива, представленной щелочными и нефелиновыми сиенитами, происходило в период 300–294 млн лет. Диапазон значений возраста с 296 до 289 млн лет можно интерпретировать как становление кварцевых сиенитов и пород жильной фации. Время образования пород массива Бурпала совпадает с формированием нефелиновых сиенитов Сынырского плутона и некоторых щелочных комплексов витимского сегмента Забайкалья, формирование которых связывают с воздействием плюма. Полученные датировки базитовых даек, которые пространственно ассоциируют с массивом, фиксируют два разновременных геологических события. Образование габбро (294 ± 2 млн лет) субсинхронно с щелочными породами массива, а возраст, полученный по цирконам из диоритов (607 ± 4 млн лет), позволяет говорить об отдельном геологическом событии.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.В. Врублевскому и анонимному рецензенту за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению статьи.

9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

10. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

11. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Amelin Y.V., Ritsk E.Y., Neymark L.A., 1997. Effects of Interaction between Ultramafic Tectonite and Mafic Magma on Nd-Pb-Sr Isotopic Systems in the Neoproterozoic Chaya Massif, Baikal-Muya Ophiolite Belt. *Earth and Planetary Science Letters* 148, (1–2), 299–316. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00046-0).

Andreev G.V., 1981. Petrology of the Formation of Potassium, Nepheline and Alkaline Syenites. Nauka, Novosibirsk, 85 p. (in Russian) [Андреев Г.В. Петрология формации калиевых, нефелиновых и щелочных сиенитов. Новосибирск: Наука, 1981. 85 с.].

Andreev G.V., Sharakhshinov A.O., Litvinovsky B.A., 1969. Intrusions of Nepheline Syenites, West Transbaikalia. Nauka, Moscow, 185 p. (in Russian) [Андреев Г.В., Шаракшинов А.О., Литвиновский Б.А. Интрузии нефелиновых сиенитов Западного Забайкалья. М.: Наука, 1969. 185 с.].

Arkhangelskaya V.V., 1974. Rare-Metal Alkaline Complexes of the Southern Margin of the Siberian Platform. Nedra, Moscow, 128 p. (in Russian) [Архангельская В.В. Редкометальные щелочные комплексы южного края Сибирской платформы. М.: Недра, 1974. 128 с.].

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C., 2004. Improved $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ Microprobe Geochronology by the Monitoring of a Trace-Element-Related Matrix Effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and Oxygen Isotope Documentation for a Series of Zircon Standards. *Chemical Geology* 205 (1–2), 115–140. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.01.003>.

Doroshkevich A.G., 2013. Petrology of Carbonatite and Carbonate-Containing Alkaline Complexes in Western Transbaikalia. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Ulan-Ude, 352 p. (in Russian) [Дорошкевич А.Г. Петрология карбонатитовых и карбонатсодержащих щелочных комплексов Западного Забайкалья: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Улан-Удэ, 2013. 352 с.].

Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Izbrodin I.A., Savatenkov V.M., 2012a. Alkaline Magmatism of the Vitim Province, West Transbaikalia, Russia: Age, Mineralogical, Geochemical and Isotope (O, C, D, Sr and Nd) Data. *Lithos* 152, 157–172. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.05.002>.

Doroshkevich A.G., Ripp G.S., Sergeev S.A., Konopel'ko D.L., 2012b. The U-Pb Geochronology of the Mukhal Alkaline Intrusion (Western Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics* 53 (2), 169–174. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.013>.

Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S., 2007a. Calcite-Bearing Dolomite Carbonatite Dykes from Veseloe, North Transbaikalia, Russia and Possible Cr-Rich Mantle Xenoliths. *Mineralogy and Petrology* 90, 19–49. <https://doi.org/10.1007/s00710-006-0165-1>.

Doroshkevich A.G., Wall F., Ripp G.S., 2007b. Magmatic Graphite in Dolomite Carbonatite at Pogranichnoe, North Transbaikalia, Russia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 153, 339–353. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0150-z>.

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

Izbrodin I., Doroshkevich A., Rampilov M., Lastochkin E., Savatenkov V., Posokhov V., Khubanov V., Redina A., 2022. Age and Petrogenesis of Scapolite Gabbro from the Bambuy Intrusion (Vitim Plateau, Russia) and Their Tectonic Significance. *International Journal of Earth Sciences* 111, 1859–1883. <https://doi.org/10.1007/s00531-022-02202-4>.

Izbrodin I., Doroshkevich A.G., Rampilov M., Elbaev A., Ripp G., 2020. Late Paleozoic Alkaline Magmatism in Western Transbaikalia, Russia: Implications for Magma Sources and Tectonic Settings. *Geoscience Frontiers* 11 (4), 1289–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.12.009>.

Izbrodin I.A., Doroshkevich A.G., Rampilov M.O., Ripp G.S., Lastochkin E.I., Khubanov V.B., Posokhov V.F., Vladyskin N.V., 2017. Age and Mineralogical and Geochemical Parameters of Rocks of the China Alkaline Intrusion (Western Transbaikalia). *Russian Geology and Geophysics* 58 (8), 903–921. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.07.002>.

Izokh A.E., Gibsher A.S., Zhuravlev D.Z., Balykin P.A., 1998. Sm-Nd Age Dating of the Ultramafic-Mafic Massifs of the Eastern Branch of the Baikal-Muya Ophiolite Belt. *Doklady Earth Sciences* 360 (4), 525–529.

Khain E.V., Bibikova E.V., Salnikova E.B., Kröner A., Gibsher A.S., Didenko A.N., Degtyarev K.E., Fedotova A.A., 2003. The Palaeo-Asian Ocean in the Neoproterozoic and Early Paleozoic: New Geochronologic Data and Palaeotectonic Reconstructions. *Precambrian Research* 122 (1–4), 329–358. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00218-8](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00218-8).

Khromykh S.V., Tsygankov A.A., Kotler P.D., Navozov O.V., Kruk N.N., Vladimirov A.G., Travin A.V., Yudin D.S., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D., Antsiferova T.N., Karavaeva G.S., 2016. Late Paleozoic Granitoid Magmatism of Eastern Kazakhstan and Western Transbaikalia: Plume Model Test. *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 773–789. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.018>.

Khubanov V.B., Tsygankov A.A., Burmakina G.N., 2021. The Duration and Geodynamics of Formation of the Angara-Vitim Batholith: Results of U-Pb Isotope (LA-ICP-MS) Dating of Magmatic and Detrital Zircons. *Russian Geology and Geophysics* 62 (12), 1331–1349. <https://doi.org/10.2113/RGG20204223>.

Kogarko L., Lahaye Y., Brey G., 2010. Plume-Related Mantle Source of Super-Large Rare Metal Deposits from the Lovozero and Khibina Massifs on the Kola Peninsula, Eastern Part of Baltic Shield: Sr, Nd and Hf Isotope Systematics. *Mineralogy and Petrology* 98, 197–208. <https://doi.org/10.1007/s00710-009-0066-1>.

Konev A.A., 1982. Nepheline Rocks of the Sayan-Baikal Mountainous Area. Nauka, Novosibirsk, 200 p. (in Russian) [Конев А.А. Нефелиновые породы Саяно-Байкальской горной области. Новосибирск: Наука, 1982. 200 с.].

Konnikov E.G., Tsygankov A.A., Vrublevskaya T.T., 1999. Baikal-Muya Volcano-Plutonic Belt: Structural-Material Complexes and Geodynamics. GEOS, Moscow, 163 p. (in Russian) [Конников Э.Г., Цыганков А.А., Врублевская Т.Т. Байкало-Муйский вулканоплутонический пояс: Структурно-вещественные комплексы и геодинамика. М.: ГЕОС, 1999. 163 с.].

Kotov A.B., Vladyskin N.V., Yarmolyuk V.V., Sal'nikova E.B., Sotnikova I.A., Yakovleva S.Z., 2013. Permian Age of the Burpala Alkaline Pluton, Northern Transbaikalia: Geodynamic Implications. *Doklady Earth Sciences* 453, 1082–1085. <https://doi.org/10.1134/S1028334X13110160>.

Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M., Katzir Y., Be'eri-Shlevin Y., 2011. Origin and Evolution of Overlapping Calc-Alkaline and Alkaline Magmas: The Late Palaeozoic Post-Collisional Igneous Province of Transbaikalia (Russia). *Lithos* 125 (3–4), 845–874. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.04.007>.

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

Makrygina V.A., Konnikov E.G., Neimark L.A., 1993. On the Age of the Granulite-Charnockite Complex in the Nyurundukan Formation of the Northern Baikal Region (Radiochronology Paradox). *Doklady Earth Sciences* 332 (4), 486–490 (in Russian) [Макрыгина В.А., Конников Э.Г., Неймарк Л.А. О возрасте гранулит-чарнокитового комплекса в нюрундунканской свите Северного Прибайкалья (парадокс радиохронологии) // Доклады АН. 1993. Т. 332. № 4. С. 486–490].

Portnov A.M., 1965. Rare-Metal Mineralization of the Alkaline Burpala Massif in the Northern Baikal Region. PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 275 p. (in Russian) [Портнов А.М. Редкометальная минерализация щелочного массива Бурпала в Северном Прибайкалье: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1965. 275 с.].

Portnov A.M., 2018. Is Burpala a Mineralogical Reserve? *Priroda* 5, 73–82 (in Russian) [Портнов А.М. Бурпала – минералогический заповедник? // Природа. 2018. № 5. С. 73–82].

Portnov A.M., Nechaeva E.A., 1967. Nephelinization in the Contact Zones of the Alkaline Burpala Massif. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series* 5, 71–76 (in Russian) [Портнов А.М., Нечаева Е.А. Нефелинизация в приконтактовых зонах щелочного массива Бурпала // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1967. № 5. С. 71–76].

Ripp G.S., Doroshkevich A.G., Posokhov V.F., 2009. Age of Carbonatite Magmatism in Transbaikalia. *Petrology* 17, 73–89. <https://doi.org/10.1134/S0869591109010044>.

Rytsk E.Yu., Makeev A.F., Glebovitsky V.A., Fedoseenko A.F., 2004. Vendian (590±5 Ma) Age of the Padora Group in the Baikal-Muya Foldbelt: U-Pb Zircon Data. *Doklady Earth Sciences* 397 (6), 765–767.

Rytsk E.Yu., Makeev A.F., Glebovitsky V.A., Fedoseenko A.F., 2007. Early Vendian Age of Multiple Gabbro-Granite Complexes of the Karalon-Mamakan Zone, Baikal-Muya Belt: New U-Pb Zircon Data. *Doklady Earth Sciences* 415, 911–914. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07060189>.

Rytsk E.Yu., Velikoslavinskii S.D., Smyslov S.A., Kotov A.B., Glebovitskii V.A., Bogomolov E.S., Tolmacheva E.V., Kovach V.P., 2017. Geochemical Peculiarities and Sources of Late Paleozoic High-K and Ultrapotassic Syenite of the Synnyr and Tas Massifs (Eastern Siberia). *Doklady Earth Sciences* 476, 1043–1047. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17090070>.

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

Tsygankov A.A., 2014. Late Paleozoic Granitoids in Western Transbaikalia: Sequence of Formation, Sources of Magmas, and Geodynamics. *Russian Geology and Geophysics* 55 (2), 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.004>.

Tsygankov A.A., Burmakina G.N., Khubanov V.B., Buyantuev M.D., 2017. Geodynamics of Late Paleozoic Batholith-Forming Processes in Western Transbaikalia. *Petrology* 25, 396–418. <https://doi.org/10.1134/S0869591117030043>.

Tsygankov A.A., Khubanov V.B., Travin A.V., Lepekhiina E.N., Burmakina G.N., Antsiferova T.N., Udoratina O.V., 2016. Late Paleozoic Gabbroids of Western Transbaikalia: U-Pb and Ar-Ar Isotopic Ages, Composition, and Petrogenesis. *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 790–808. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.019>.

Upton B.G.J., Emeleus C.H., Heaman L.M., Goodenough K.M., Finch A.A., 2003. Magmatism of the Mid-Proterozoic Gardar Province, South Greenland: Chronology, Petrogenesis and Geological Setting. *Lithos* 68 (1–2), 43–65. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(03\)00030-6](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(03)00030-6).

Vladykin N.V., Sotnikova I.A., 2017. Petrology, Mineralogical and Geochemical Features and Mantle Sources of the Burpala Rare-Metal Alkaline Massif, Northern Baikal Region. *Geoscience Frontiers* 8 (4), 711–719. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.04.006>.

Vladykin N.V., Sotnikova I.A., Kotov A.B., Yarmolyuk V.V., Salnikova E.B., Yakovleva S.Z., 2014. Structure, Age, and Ore Potential of the Burpala Rare-metal Alkaline Massif, Northern Baikal Region. *Geology Ore Deposits* 56, 239–256. <https://doi.org/10.7868/S0016777014040066>.

Vorontsov A.A., Izoh A.E., Yarmolyuk V.V., Komaritsyna T.Y., Nikiforov A.V., Perfilova O.Y., Dril S.I., Rizvanova N.G., Dushkin E.P., 2021. Evolution of Syenite Magmas: Insights from the Geology, Geochemistry and O-Nd Isotopic Characteristics of the Ordovician Saibar Intrusion, Altai-Sayan Area, Russia. *Minerals* 11 (5), 473. <https://doi.org/10.3390/min11050473>.

Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Kozlovsky A.M., 2013. Late Paleozoic - Early Mesozoic Within-Plate Magmatism in North Asia: Traps, Rifts, Giant Batholiths, and the Geodynamics of Their Origin. *Petrology* 21, 101–126. <https://doi.org/10.1134/S0869591113010062>.

Zhidkov A.Ya., 1961. New Northern Baikal Alkaline Province and Some Features of Nepheline Content in Rocks. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 140 (1), 181–184 (in Russian) [Жидков А.Я. Новая Северо-Байкальская щелочная провинция и некоторые черты нефелиноности пород // Доклады АН СССР. 1961. Т. 140. № 1. С. 181–184].

Zhidkov A.Ya., Mirkina S.L., Golubchina M.I., 1963. The Absolute Age of Alkaline and Nepheline Syenites of the North-Baikal Highlands. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 149 (1), 152–155 (in Russian) [Жидков А.Я., Миркина С.Л., Голубчина М.И. Об абсолютном возрасте щелочных и нефелиновых сиенитов Северобайкальского нагорья // Доклады АН СССР. 1963. Т. 149. № 1. С. 152–155].

Таблица 1.1. Результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования циркона из пород массива Бурпала

Table 1.1. The U-Pb LA-ICP-MS dating of zircon from the Burpala massif rocks

№	U, ppm	Pb ²⁰⁶ , ppm	Th/U	Изотопные отношения				Изотопные отношения					Возраст, млн лет								D, %	
				U ²³⁸ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ	Rho	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	2σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	2σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	2σ	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²	2σ		
к-14 кварцсодержащий сиенит																						
1	371	15	0.91	21.636	1.36	0.053	2.28	0.338	1.80	0.046	1.36	0.76	333	102	291	8	296	9	289	8	87	
2	181	7	0.87	21.997	1.41	0.053	2.62	0.329	2.19	0.045	1.41	0.64	311	117	287	8	289	11	289	9	92	
3	121	5	0.92	21.692	1.45	0.053	3.01	0.335	2.61	0.046	1.45	0.56	322	134	291	8	294	13	284	10	90	
4	146	6	1.40	21.763	1.44	0.053	2.79	0.335	2.39	0.046	1.44	0.60	327	125	290	8	293	12	292	9	89	
5	874	35	1.36	21.631	1.34	0.053	2.08	0.337	1.55	0.046	1.34	0.86	327	93	291	8	295	8	291	7	89	
6	145	6	0.84	21.968	1.43	0.053	2.84	0.333	2.43	0.046	1.43	0.59	336	126	287	8	292	12	290	10	86	
7	688	28	1.28	21.510	1.36	0.053	2.12	0.338	1.60	0.046	1.36	0.85	322	95	293	8	296	8	293	8	91	
8	124	5	1.18	21.697	1.48	0.052	3.07	0.331	2.70	0.046	1.48	0.55	290	138	291	8	290	14	298	10	100	
9	384	15	0.67	21.478	1.37	0.053	2.27	0.337	1.78	0.047	1.37	0.77	308	102	293	8	295	9	298	9	95	
10	83	3	0.77	21.519	1.61	0.052	4.16	0.333	3.83	0.046	1.61	0.42	285	184	293	9	292	19	271	14	103	
11	189	8	0.80	21.478	1.44	0.052	2.89	0.335	2.48	0.047	1.44	0.58	297	129	293	8	293	13	287	10	99	
12	129	5	0.99	21.538	1.55	0.052	3.56	0.334	3.19	0.046	1.55	0.49	299	158	293	9	293	16	308	12	98	
13	144	6	0.88	21.749	1.46	0.052	3.04	0.332	2.65	0.046	1.46	0.55	302	135	290	8	291	13	303	11	96	
14	122	5	0.95	21.782	1.55	0.053	3.54	0.332	3.18	0.046	1.55	0.49	308	157	289	9	291	16	292	11	94	
15	525	21	1.27	21.529	1.36	0.052	2.19	0.333	1.67	0.046	1.36	0.81	291	98	293	8	292	9	305	8	101	
16	292	12	0.66	21.340	1.39	0.052	2.36	0.336	1.90	0.047	1.39	0.73	288	106	295	8	294	10	306	9	102	
17	108	4	0.99	21.725	1.48	0.053	3.16	0.335	2.78	0.046	1.48	0.53	324	140	290	8	294	14	307	11	90	
Ю-1 габбро																						
1	375	15	0.60	21.692	1.43	0.053	2.65	0.335	2.23	0.046	1.43	0.64	317	118	291	8	293	11	313	11	92	
2	847	34	2.48	21.664	1.36	0.052	2.07	0.332	1.55	0.046	1.36	0.88	296	93	291	8	291	8	293	8	98	
3	1529	62	1.55	21.395	1.35	0.052	2.06	0.334	1.54	0.047	1.35	0.88	281	93	295	8	293	8	305	8	105	
4	547	22	1.31	21.552	1.36	0.053	2.17	0.336	1.67	0.046	1.36	0.81	312	97	292	8	294	9	300	8	94	
5	381	15	0.24	21.687	1.39	0.053	2.25	0.335	1.78	0.046	1.39	0.78	320	101	291	8	293	9	302	11	91	
6	480	20	1.24	21.281	1.36	0.052	2.17	0.337	1.68	0.047	1.36	0.81	289	98	296	8	295	9	295	8	102	
7	167	7	0.52	21.594	1.43	0.052	2.66	0.331	2.24	0.046	1.43	0.64	283	119	292	8	291	11	292	11	103	
8	725	30	1.71	20.829	1.35	0.053	2.11	0.351	1.59	0.048	1.35	0.85	336	94	302	8	306	8	312	8	90	
9	497	21	1.52	20.973	1.36	0.053	2.16	0.346	1.67	0.048	1.36	0.82	314	97	300	8	301	9	300	8	96	

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

№	U, ppm	Pb ²⁰⁶ , ppm	Th/U	Изотопные отношения				Изотопные отношения					Возраст, млн лет								D, %
				U ²³⁸ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ	Rho	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	2σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	2σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	2σ	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²	2σ	
10	560	23	0.19	21.519	1.38	0.052	2.30	0.334	1.82	0.046	1.38	0.76	297	103	293	8	293	9	312	12	99
11	511	21	1.24	21.650	1.41	0.053	2.39	0.338	1.92	0.046	1.41	0.73	336	106	291	8	296	10	307	9	87
12	592	24	0.22	21.390	1.37	0.052	2.14	0.334	1.64	0.047	1.37	0.83	281	97	295	8	293	8	284	9	105
13	1943	79	1.47	21.492	1.35	0.053	2.03	0.338	1.51	0.047	1.35	0.90	316	91	293	8	295	8	290	8	93
14	334	13	0.45	21.711	1.39	0.053	2.30	0.333	1.84	0.046	1.39	0.75	310	103	290	8	292	9	283	9	94
15	250	10	1.02	21.561	1.40	0.053	2.43	0.337	1.97	0.046	1.40	0.71	319	108	292	8	295	10	287	9	92
16	755	31	1.35	21.358	1.37	0.052	2.19	0.338	1.70	0.047	1.37	0.80	303	98	295	8	296	9	300	8	97
Ю-7 гранит																					
1	2529	102	0.33	21.687	1.34	0.052	2.01	0.331	1.48	0.046	1.34	0.91	290	90	291	8	290	7	291	8	100
2	1054	43	0.67	21.510	1.38	0.052	2.15	0.334	1.66	0.046	1.38	0.83	293	97	293	8	293	8	310	9	100
3	1063	43	0.86	21.455	1.37	0.052	2.10	0.337	1.59	0.047	1.37	0.86	305	94	294	8	295	8	288	8	96
4	2094	86	0.30	21.468	1.35	0.053	2.03	0.337	1.50	0.047	1.35	0.90	312	91	294	8	295	8	294	8	94
5	1320	54	0.25	21.492	1.35	0.052	2.06	0.335	1.54	0.047	1.35	0.88	301	92	293	8	294	8	297	9	98
6	993	40	0.18	21.626	1.38	0.053	2.20	0.335	1.71	0.046	1.38	0.81	314	98	291	8	294	9	320	11	93
Ю-4 диорит																					
1	111	10	0.40	10.014	1.45	0.061	2.70	0.834	2.27	0.100	1.45	0.64	627	114	614	17	616	21	600	25	98
2	92	8	0.49	10.166	1.40	0.061	2.44	0.822	1.97	0.098	1.40	0.71	630	103	605	16	609	18	618	21	96
3	102	9	0.41	10.102	1.43	0.061	2.57	0.827	2.14	0.099	1.43	0.67	627	109	609	17	612	20	619	24	97
4	100	9	0.59	10.110	1.40	0.060	2.37	0.821	1.92	0.099	1.40	0.73	614	101	608	16	609	18	626	20	99
5	49	4	0.47	10.041	1.54	0.061	3.22	0.831	2.85	0.100	1.54	0.54	625	136	612	18	614	26	629	31	98
6	61	5	0.72	10.020	1.52	0.060	3.17	0.827	2.79	0.100	1.52	0.54	611	134	613	18	612	26	587	25	100
7	52	4	0.67	10.167	1.64	0.060	3.70	0.815	3.35	0.098	1.64	0.49	611	156	605	19	605	31	627	31	99
8	195	17	0.42	10.076	1.37	0.060	2.20	0.827	1.69	0.099	1.37	0.81	621	93	610	16	612	16	640	20	98
9	232	20	0.46	10.099	1.36	0.060	2.16	0.821	1.65	0.099	1.36	0.82	612	92	609	16	609	15	637	19	99
10	177	15	0.42	10.055	1.39	0.060	2.26	0.819	1.78	0.099	1.39	0.78	597	97	611	16	607	16	672	21	102
11	121	10	0.56	10.367	1.40	0.060	2.37	0.796	1.90	0.096	1.40	0.74	602	101	594	16	595	17	661	21	99
12	204	17	0.41	10.163	1.37	0.060	2.16	0.817	1.64	0.098	1.37	0.84	615	91	605	16	606	15	658	19	98

Таблица 1.1 (продолжение)
Table 1.1 (continued)

№	U, ppm	Pb ²⁰⁶ , ppm	Th/U	Изотопные отношения				Изотопные отношения					Возраст, млн лет								D, %
				U ²³⁸ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ	Rho	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	2σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	2σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	2σ	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²	2σ	
13	106	9	0.66	10.026	1.53	0.060	3.10	0.828	2.72	0.100	1.53	0.56	614	131	613	18	613	25	594	25	100
14	141	12	0.31	10.166	1.43	0.061	2.54	0.826	2.10	0.098	1.43	0.68	640	107	605	17	612	19	620	26	94
15	113	10	0.40	10.162	1.44	0.061	2.52	0.823	2.09	0.098	1.44	0.69	630	107	605	17	610	19	605	24	96
16	128	11	0.35	10.128	1.45	0.060	2.55	0.821	2.13	0.099	1.45	0.68	618	109	607	17	609	20	661	27	98
17	116	10	0.38	10.137	1.43	0.061	2.46	0.824	2.02	0.099	1.43	0.71	628	104	607	17	610	19	632	24	97
18	56	5	0.41	10.160	1.48	0.061	2.80	0.823	2.39	0.098	1.48	0.62	631	118	605	17	610	22	611	27	96
19	40	4	0.56	10.136	1.65	0.061	3.73	0.822	3.39	0.099	1.65	0.49	623	157	607	19	609	31	591	33	97
20	52	4	0.67	10.321	1.50	0.059	2.93	0.793	2.55	0.097	1.50	0.59	583	125	596	17	593	23	650	26	102
21	68	6	0.60	10.099	1.48	0.060	2.81	0.820	2.41	0.099	1.48	0.62	609	119	609	17	608	22	601	24	100
БРЗ-5-12 нефелиновый сиенит																					
1	661	27	0.20	21.268	1.36	0.053	2.18	0.342	1.67	0.047	1.36	0.81	319	97	296	8	298	9	287	10	93
2	3965	158	0.48	22.095	1.35	0.053	1.98	0.327	1.43	0.045	1.35	0.94	307	89	285	8	287	7	271	7	93
3	1064	45	0.23	20.683	1.37	0.053	2.13	0.351	1.62	0.048	1.37	0.84	316	95	304	8	305	9	287	9	96
4	452	18	0.25	21.608	1.38	0.053	2.18	0.336	1.68	0.046	1.38	0.82	318	98	292	8	294	9	286	9	92
5	822	34	0.25	21.395	1.37	0.052	2.08	0.337	1.56	0.047	1.37	0.88	304	93	295	8	295	8	288	9	97
6	798	33	0.26	21.084	1.37	0.053	2.10	0.345	1.58	0.047	1.37	0.87	320	94	299	8	301	8	287	9	93
7	253	11	2.09	21.218	1.40	0.052	2.39	0.339	1.93	0.047	1.40	0.72	298	107	297	8	297	10	294	8	99
8	1205	49	0.21	21.510	1.36	0.053	2.05	0.337	1.51	0.046	1.36	0.90	314	91	293	8	295	8	284	8	93
9	1039	44	0.26	20.995	1.36	0.053	2.17	0.347	1.67	0.048	1.36	0.82	328	97	300	8	303	9	334	11	91
10	938	39	0.27	21.340	1.37	0.052	2.06	0.339	1.53	0.047	1.37	0.89	306	92	295	8	296	8	287	8	96
11	952	39	0.22	21.409	1.35	0.052	2.08	0.334	1.55	0.047	1.35	0.87	284	93	294	8	293	8	283	9	104
12	940	38	0.25	21.501	1.35	0.052	2.08	0.336	1.55	0.047	1.35	0.87	307	93	293	8	294	8	284	8	96
13	1189	49	0.38	21.222	1.36	0.053	2.07	0.342	1.54	0.047	1.36	0.88	315	92	297	8	299	8	297	8	94
Ю-5 кварцевый сиенит																					
1	130	5	1.08	21.547	1.44	0.052	2.78	0.335	2.38	0.046	1.44	0.61	306	124	292	8	294	12	296	10	96
2	75	3	0.80	21.547	1.47	0.052	2.96	0.333	2.55	0.046	1.47	0.57	289	132	292	8	292	13	292	11	101
3	165	7	1.23	21.436	1.44	0.053	2.73	0.339	2.32	0.047	1.44	0.62	319	122	294	8	296	12	292	10	92

Таблица 1.1 (продолжение)

Table 1.1 (continued)

№	U, ppm	Pb ²⁰⁶ , ppm	Th/U	Изотопные отношения				Изотопные отношения					Возраст, млн лет								D, %
				U ²³⁸ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	1σ	Rho	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶	2σ	Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	2σ	Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵	2σ	Pb ²⁰⁸ /Th ²³²	2σ	
4	103	4	1.03	21.608	1.51	0.052	3.26	0.334	2.89	0.046	1.51	0.52	307	145	292	9	293	15	279	11	95
5	81	3	1.17	21.570	1.62	0.053	3.85	0.337	3.51	0.046	1.62	0.46	319	171	292	9	295	18	269	12	92
6	80	3	0.65	21.492	1.68	0.052	4.18	0.334	3.84	0.047	1.68	0.44	294	185	293	10	293	20	282	16	100
7	76	3	0.79	21.358	1.71	0.053	4.26	0.339	3.92	0.047	1.71	0.44	310	188	295	10	296	20	273	15	95
8	146	6	0.93	21.436	1.44	0.052	2.68	0.335	2.26	0.047	1.44	0.63	294	120	294	8	294	12	285	11	100
БРЗ 5-6 меланократовый щелочной сиенит																					
1	1040	43	0.23	21.372	1.39	0.053	2.24	0.339	1.75	0.047	1.39	0.79	312	100	295	8	296	9	352	12	95
2	937	39	0.15	21.177	1.36	0.052	2.13	0.339	1.61	0.047	1.36	0.84	292	96	297	8	296	8	327	11	102
3	576	25	0.20	20.674	1.36	0.052	2.14	0.348	1.63	0.048	1.36	0.84	300	96	305	8	304	9	324	11	102
4	881	37	0.25	21.101	1.37	0.053	2.20	0.344	1.71	0.047	1.37	0.80	315	98	299	8	300	9	300	10	95
5	1034	43	0.17	21.186	1.36	0.052	2.11	0.339	1.59	0.047	1.36	0.85	292	95	297	8	296	8	322	10	102
6	1516	63	0.32	21.277	1.36	0.052	2.08	0.339	1.55	0.047	1.36	0.88	305	93	296	8	297	8	308	9	97
7	1454	61	0.19	21.133	1.35	0.053	2.08	0.344	1.57	0.047	1.35	0.86	318	93	298	8	300	8	343	11	94
8	944	39	0.27	21.295	1.38	0.053	2.24	0.341	1.75	0.047	1.38	0.79	318	100	296	8	298	9	329	11	93
9	809	33	0.23	21.331	1.37	0.052	2.11	0.339	1.59	0.047	1.37	0.86	307	95	295	8	296	8	313	10	96
10	295	12	2.31	21.066	1.41	0.052	2.47	0.342	2.03	0.047	1.41	0.70	298	111	299	8	299	10	348	10	100
11	306	13	2.52	21.133	1.39	0.052	2.33	0.339	1.86	0.047	1.39	0.75	286	105	298	8	296	10	330	10	104
12	341	14	3.29	21.268	1.38	0.052	2.26	0.339	1.78	0.047	1.38	0.78	298	101	296	8	296	9	331	10	99
13	298	12	1.92	21.227	1.38	0.052	2.27	0.339	1.78	0.047	1.38	0.77	301	102	297	8	297	9	324	10	99
14	487	20	3.31	21.268	1.38	0.052	2.25	0.337	1.77	0.047	1.38	0.78	290	101	296	8	295	9	311	9	102
15	927	39	3.12	21.146	1.37	0.052	2.19	0.339	1.68	0.047	1.37	0.82	291	98	298	8	297	9	337	10	102

Примечание. Rho – коэффициент корреляции ошибок отношений Pb²⁰⁷/U²³⁵ и Pb²⁰⁶/U²³⁸; D – процент дискордантности: D=(Pb²⁰⁶-U²³⁸ age/Pb²⁰⁷-Pb²⁰⁶ age)·100 %.

Note. Rho is the coefficient of Pb²⁰⁷/U²³⁵ and Pb²⁰⁶/U²³⁸ error correlation; D is percentage discordance calculated as (Pb²⁰⁶-U²³⁸ age/Pb²⁰⁷-Pb²⁰⁶ age)·100 %.