

УДК 552.32:550.93:551.72

ВОЗРАСТ И ПЕТРОГЕНЕЗИС РАННЕНПРОТЕРОЗОЙСКИХ ДИОРИТОВ ДАЕК БАЙКАЛЬСКОГО ВЫСТУПА ФУНДАМЕНТА СИБИРСКОГО КРАТОНА

Т.В. Донская¹, Д.П. Гладкочуб¹, А.Б. Котов², Е.Б. Сальникова², Е.Е. Бадашкова¹,
А.М. Мазукабзов¹, В.П. Ковач², У.С. Ефремова¹

¹Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

²Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

Проведено детальное геологическое, геохронологическое, геохимическое и изотопное изучение диоритов дайки, расположенной в центральной части Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона, а также выполнено сопоставление геохимических и изотопных данных, полученных для диоритов изученной интрузии, с близкозрастными магматическими породами основного и среднего состава южной части Сибирского кратона. Определение возраста U-Pb методом (ID-TIMS) по бадделеиту из диорита дайки, расположенной в районе пос. Онгурен, показало значение 1862 ± 7 млн лет. Полученная оценка является первым надежным определением возраста для раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Байкальского выступа фундамента, входящих в структуру Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса. Дайка имеет северо-восточное простирание. Породы дайки по химическому составу соответствуют диоритам и представляют собой сильно дифференцированные разности ($\text{mg}^{\#} = 36.5—37.4$). Значительных вариаций составов диоритов в краевых и центральных частях дайки отмечено не было. Породы характеризуются низкими содержаниями TiO_2 , P_2O_5 , Nb , высокими концентрациями Th , Zr , Ba , легких редкоземельных элементов и обнаруживают низкие отрицательные значения $\varepsilon_{\text{Nd}}(T) = -5.9\dots-6.2$. Предполагается, что источником диоритов была обогащенная субконтинентальная литосферная мантия. Анализ геохимических и изотопных данных, полученных для раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса в пределах Алданского щита, Байкальского выступа фундамента и Иркутского блока Шарыжалгайского выступа, показал, что большинство пород обнаружили сходные отрицательные значения $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ в диапазоне от -4.3 до -11.6 и геохимические характеристики, соответствующие породам, формирование которых связано с плавлением субдукционно-модифицированных литосферных мантийных источников в обстановке постколлизионного растяжения на завершающей стадии становления структуры Сибирского кратона в раннем протерозое.

Диориты, U-Pb возраст, геохимия, ранний протерозой, Сибирский кратон

AGE AND PETROGENESIS OF PALEOPROTEROZOIC DIORITES FROM DIKES OF THE BAIKAL UPLIFT OF THE SIBERIAN CRATON

Т.В. Донская, Д.П. Гладкочуб, А.Б. Котов, Е.Б. Сальникова, Е.Е. Бадашкова,
А.М. Мазукабзов, В.П. Ковач, У.С. Ефремова

We carried out a detailed geological, geochronological, geochemical, and isotope study of diorites from a dike located in the central part of the Baikal uplift of the Siberian craton. The geochemical and isotope data obtained for diorites of the studied intrusion were compared with coeval mafic and intermediate igneous rocks of the southern part of the Siberian craton. The U-Pb (ID-TIMS) baddeleyite age of 1862 ± 7 Ma has been estimated for diorite from a dike located in the area of the Onguren Village. The obtained data are the first reliable age determination for the Paleoproterozoic mafic and intermediate igneous rocks of the Baikal uplift, which are part of the South Siberian postcollisional magmatic belt. The dike is of NE strike. The dike rocks correspond in chemical composition to diorites and are highly differentiated varieties ($\text{mg}^{\#} = 36.5—37.4$). There are no significant variations in the composition of diorites in the marginal and central parts of the dike. The rocks are characterized by low contents of TiO_2 , P_2O_5 , and Nb , high contents of Th , Zr , Ba , and LREE, and low negative values of $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ (-5.9 to -6.2). We assume that the diorites formed from the enriched subcontinental lithospheric mantle. The obtained geochemical and isotope data show similar negative values of $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ from -4.3 to -11.6 for most of Paleoproterozoic mafic and intermediate igneous rocks of the South Siberian postcollisional magmatic belt within the Aldan Shield, the Baikal uplift, and the Irkut block of the Sharyzhalgai uplift. These rocks correspond in geochemical features to rocks resulted from the melting of subduction-modified lithospheric mantle sources in the postcollisional extension setting at the final Paleoproterozoic stage of formation of the Siberian craton.

Diorites, U-Pb age, geochemistry, Paleoproterozoic, Siberian craton

ВВЕДЕНИЕ

Сибирский кратон был сформирован в раннем протерозое в результате объединения архейских и раннепротерозойских террейнов в единую структуру [Розен, 2003; Gladkochub et al., 2006; Smelov, Timofeev, 2007; Глебовицкий и др., 2008; Pisarevsky et al., 2008; Donskaya, 2020; Priyatkina et al., 2020]. Индикатором финального становления структуры кратона является Южно-Сибирский постколлизионный магматический пояс, который протягивается вдоль его южного края от Ангаро-Канского выступа на западе до западной части Алданского щита на востоке (рис. 1) [Диденко и др., 2003; Ларин и др., 2003; Donskaya, Gladkochub, 2021]. Магматические породы Южно-Сибирского пояса представлены главным образом гранитоидами и вулканитами кислого состава с возрастом 1.84—1.88 млрд лет при подчиненном количестве пород основного—среднего состава. Однако так же как и гранитоиды, магматические породы основного—среднего состава отмечаются практически во всех выступах фундамента южной части Сибирского кратона, а именно в пределах Присаянского, Шарыжалгайского и Байкальского выступов и на Алданском щите (см. рис. 1) [Неймарк и др., 1998; Шохонова и др., 2010; Gladkochub et al., 2010; Попов и др., 2012; Гладкочуб и др., 2013; Мехонюшин и др., 2016; Ernst et al., 2016; Донская и др., 2019, 2020; Туркина, Капитонов, 2019; Ivanov et al., 2019; Donskaya, Gladkochub, 2021; Ковач и др., 2023; Туркина, Изох, 2023; Туркина и др., 2023]. В то же время надежные U-Pb оценки возраста по циркону и бадделеиту получены только для долеритов и габброидов Шарыжалгайского выступа фундамента и западной части Алданского щита (табл. 1) [Попов и др., 2012; Гладкочуб и др., 2013; Мехонюшин и др., 2016; Ernst et al., 2016; Ivanov et al., 2019; Туркина, Капитонов, 2019; Ковач и др., 2023; Туркина и др., 2023]. Что касается Байкальского выступа фундамента, то раннепротерозойский возраст магматических пород основного состава оценивается здесь только по косвенным данным. В частности, значение возраста 1.84 млрд лет принимается для долеритов из комбинированных долерит-риолитовых даек Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса на основании возраста риолитов из этих даек [Шохонова и др., 2010], а возраст 1.88 млрд лет допускается для базальтов и андезибазальтов малокосинской свиты аkitканской серии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса как наиболее близкий возрасту самых древних вулканитов кислого состава аkitканской серии [Неймарк и др., 1998; Донская и др., 2008; Шохонова и др., 2010]. Раннепротерозойский возраст долеритов из некоторых даек западно-прибайкальской части Байкальского выступа фундамента оценивается на основании близости их геохимических и изотопных характеристик магматическим породам основного состава Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса [Донская и др., 2023]. Таким образом, до настоящего времени не было получено и опубликовано ни одной надежной U-Pb оценки возраста по циркону или бадделеиту для раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Байкальского выступа фундамента. Целью настоящей работы являлось получить U-Pb оценку возраста по бадделеиту для диорита дайки, прорывающей породы Байкальского выступа фундамента, а также провести петрографическое, геохимическое и изотопное изучение этих диоритов и реконструировать состав их источника. Кроме того, проведено сопоставление геохимических и изотопных данных для диоритов изученной интрузии с близковозрастными магматическими породами основного—среднего состава как в Байкальском выступе фундамента, так и на других участках южной части Сибирского кратона.

КРАТКИЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Байкальский выступ фундамента Сибирского кратона представляет собой выход на поверхность пород, входящих в структуру раннепротерозойского Аkitканского орогенного пояса, выделяющегося на нескольких тектонических схемах внутреннего строения кратона (см. рис. 1) [Розен, 2003; Gladkochub et al., 2006; Pisarevsky et al., 2008; Donskaya, 2020]. Аkitканский орогенный пояс разделяет архейские Анабарский и Алданский супертеррейны (см. рис. 1) и подразделяется на четыре региональные зоны (с юга на север): Голоустенскую, Сарминскую, Чуйскую и Тонодскую, породы которых сформировали единый Аkitканский орогенный пояс на временном интервале 1.95—2.00 млрд лет [Donskaya, 2020].

Сарминская зона Аkitканского орогенного пояса расположена в центральной части Байкальского выступа фундамента и сложена мезоархейскими гранитоидами [Donskaya et al., 2009], раннепротерозойскими метаморфическими породами сарминской серии [Галимова и др., 2009; Ефремова и др., 2024а, 2024б], гранитоидами кочериковского комплекса с возрастом 1.91 млрд лет [Бибикова и др., 1987], гранитоидами приморского и ирельского комплексов, а также вулканогенно-осадочными породами аkitканской серии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса с возрастом 1.84—1.88 млрд лет, входящими в Южно-Сибирский постколлизионный магматический пояс, протягивающийся вдоль всего южного фланга Сибирского кратона [Donskaya, Gladkochub, 2021]. Архейские и раннепротерозойские породы сарминской зоны Байкальского выступа фундамента прорываются многочисленными дайками, которые фиксируют несколько этапов протерозойского базитового магматизма [Gladkochub et al., 2010; Ernst et al., 2016, 2023; Гладкочуб и др., 2019; Донская и др., 2023]: палеопротерозойский

Таблица 1.

U-Pb оценка возраста магматических пород основного—среднего состава в Южно-Сибирском постколлизионном магматическом поясе (с добавлениями после [Донская и др., 2020])

Выступ фундамента Сибирского кратона	Комплекс/серия/массив (обозначение на рис. 1)	Характеристика пород основного состава	Датируемая порода	Возраст, млн лет	Метод, минерал для датирования	Литературный источник
Приаянский выступ (Бирюсинский блок)	Саяно-Бирюсинский вулканоплутонический пояс, мальцевская толща елашской серии (Е)	Долериты, габбро-долериты, андезибазальты	Вулканиты кислого состава из ассоциации с андезибазальтами	1872 ± 10 1874 ± 10	SIMS SHRIMP-II, циркон	[Донская и др., 2019]
Приаянский выступ (Урикско-Ийский грабен)	Усть-Игнокский массив (УИ)	Габбро, габбро-диориты	Кварцевый диорит	1836 ± 10	»	[Донская и др., 2020]
	Полуденный массив (П)	Габбро, монцодиориты	Монцодиорит	1873 ± 10	»	[Туркина и др., 2023]
	Дайки района р. Китой (К)	Габбро-диориты	Габбро-долерит	1864 ± 4	ID-TIMS, циркон	[Гладкочуб и др., 2013]
	Малозадайский массив (МЗ)	Габбронориты	Габбронорит	1863 ± 1	ID-TIMS, бадделейт	[Мехонюшин и др., 2016; Ernst et al., 2016]
Шарыжалгайский выступ	Небольшие массивы района р. Китой (КЖ)	Долериты, лампрофирсы	Лампрофир	1865 ± 2	ID-TIMS, циркон	[Ivanov et al., 2019]
	Дайки района р. Большой Залой (БЗ)	Габбро-диориты	Габбро-долерит	1858 ± 7	SIMS SHRIMP-II, циркон	[Туркина и др., 2023]
	Тойсукский массив (Т)	Монцодиориты, габбро-диориты	»	1855 ± 4	»	»
			»	1851 ± 8	»	»
			Монцодиорит	1837 ± 6	»	»
	Северо-Байкальский вулканоплутонический пояс, малокоинская свита акитканской серии (М)	Базальты, андезибазальты	Дашит	1878 ± 4	ID-TIMS, циркон	[Туркина, Капитонов, 2019]
Байкальский выступ	Дайки района пос. Онгурен (О)	Диориты	Диорит	1862 ± 7	ID-TIMS, бадделейт	[Донская и др., 2008]
	Северо-Байкальский вулканоплутонический пояс, комбинированные дайки и дайки долеритов района руч. Светлый (СБ)	Долериты	Риолит из комбинированной долерит-риолитовой дайки	1844 ± 11	SIMS SHRIMP-II, циркон	[Шохонова и др., 2010]
	Судуматский комплекс, дайки (СУ)	Долериты	Долерит	1874 ± 4	ID-TIMS, бадделейт	[Ковач и др., 2023]
	Каларо-нимырский комплекс, дайки (КН)	»	Долерит	1869 ± 2	»	[Ernst et al., 2016]
Алданский щит	Чинейский комплекс, массивы, дайки (Ч)	Габбронориты, габбро	Габбронорит	1867 ± 3	ID-TIMS, циркон	[Попов и др., 2009]
	Куранахский комплекс, дайки (КУ)	Долериты, габбро-долериты	Долерит	1867 ± 9	»	[Попов и др., 2012]

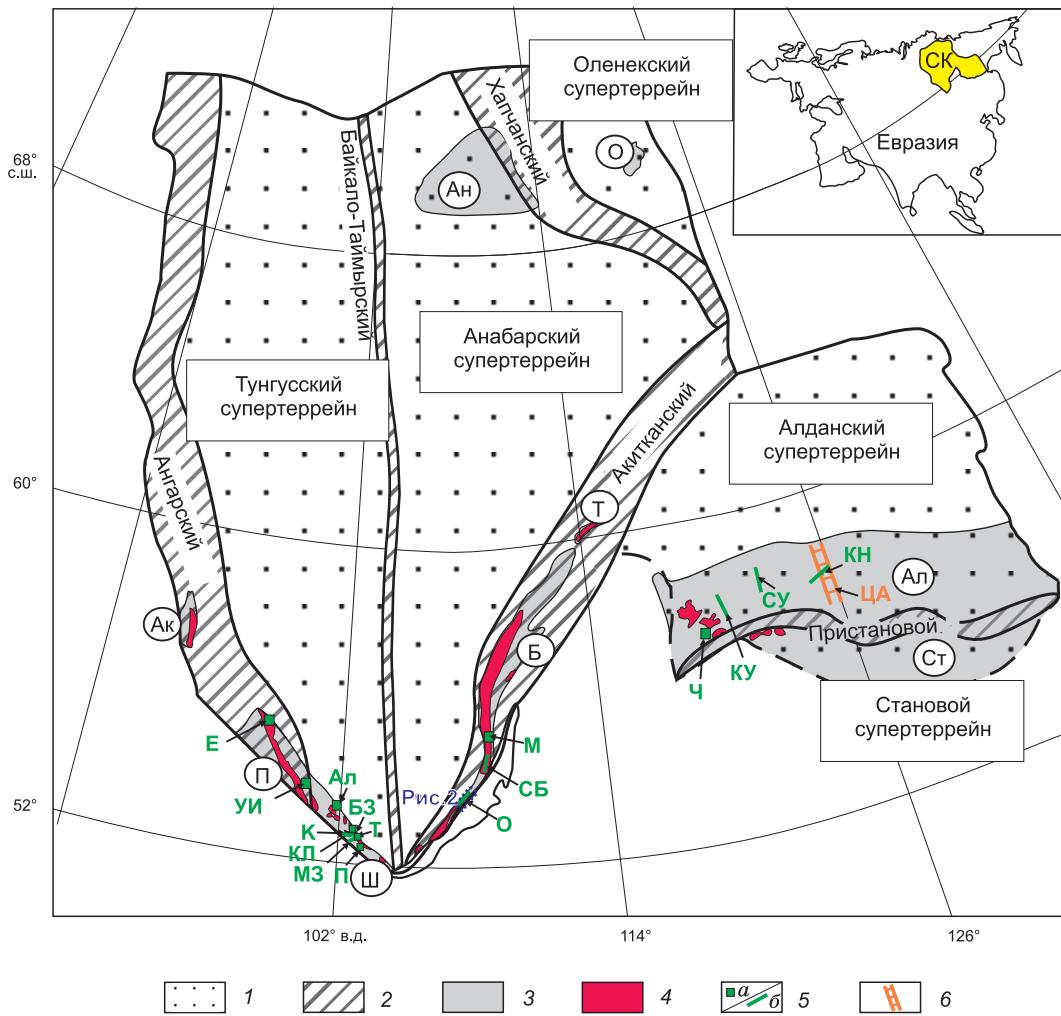


Рис. 1. Упрощенная тектоническая схема Сибирского кратона и выходы раннепротерозойских пород Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса (модифицированная после [Donskaya, Gladkochub, 2021]).

1 — архейские и раннепротерозойские супертеррейны; 2 — раннепротерозойские орогенные пояса; 3 — выступы фундамента; 4—6 — раннепротерозойский Южно-Сибирский постколлизионный магматический пояс: 4 — граниты и вулканиты кислого состава; 5 — магматические породы основного состава: *a* — интрузии и вулканиты, *b* — дайки; 6 — щелочные породы.

Буквы в кружках — выступы фундамента: Ак — Ангаро-Канский выступ, Ал — Алданский щит, Аи — Анабарский щит, Б — Байкальский выступ, О — Оленекский выступ, П — Присаянский выступ, Ст — Становой выступ, Т — Тонодский выступ, Ш — Шарыжалгайский выступ. Буквами обозначены интрузии и дайки магматических пород основного—среднего состава Южно-Сибирского пояса (описание см. в табл. 1 и в тексте): Ал — Алзагайский массив, Б3 — дайки района р. Большой Задой, Е — елашская серия, К — дайки района р. Китой, КЛ — небольшие массивы района р. Китой, КН — каларо-нимнырский комплекс, КУ — куранахский комплекс, М3 — Малозадайский массив, М — малокосинская свита аkitканской серии, О — дайки района пос. Онгурен, П — Полуденный массив, СУ — сулуматский комплекс, СБ — дайки района руч. Светлый (Северо-Байкальский вулканоплутонический пояс), Т — Тойсукский массив, УИ — Усть-Игнокский массив, ЦА — Центрально-Алданская карбонатовая провинция, Ч — чинейский комплекс. На врезке — район исследования, СК — Сибирский кратон.

(1.84—1.88 млрд лет), позднепалеопротерозойский (1.75 млрд лет) и неопротерозойский (715—725 млрд лет). Раннедокембрийские породы Сарминской зоны и протерозойские дайки переходят в позднерифейскими и вендинскими осадочными толщами нуганской свиты и байкальской серии [Станевич и др., 2007; Мазукабзов и др., 2018; Gladkochub et al., 2019].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Шесть образцов отобрали из дайки, расположенной в центральной части Байкальского выступа фундамента Сибирской платформы (рис. 2). Для всех образцов были проведены петрографические ис-

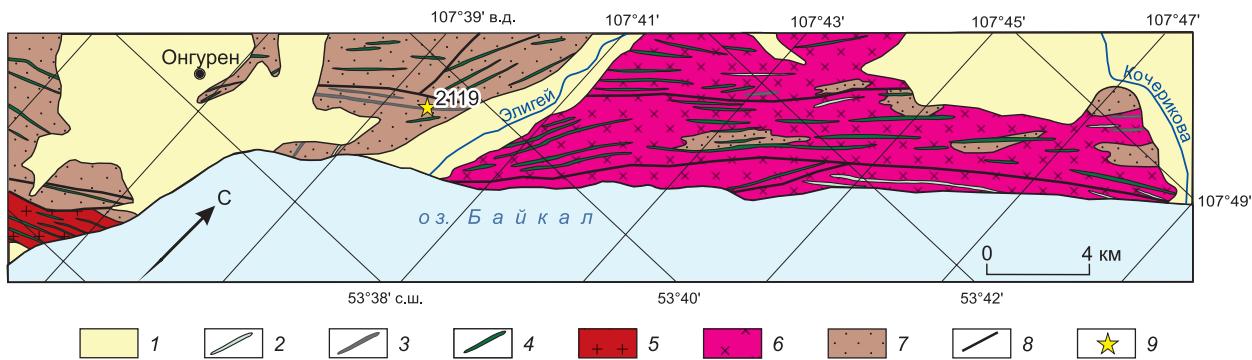


Рис. 2. Геологическая карта центральной части западного побережья оз. Байкал (Сарминская зона Акитканского орогенного пояса) (модифицированная после [Донская и др., 2023]).

1 — кайнозойские осадки, 2 — неопротерозойские дайки, 3 — раннепротерозойские дайки, 4 — дайки неясного возраста, 5 — раннепротерозойские гранитоиды приморского комплекса Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса, 6 — раннепротерозойские гранитоиды кочериковского комплекса, 7 — раннепротерозойские метаморфические породы сарминской серии, 8 — главные разломы, 9 — место отбора пробы 2119 на геохронологические исследования.

следования, а также установлены содержания петрогенных оксидов, редких и редкоземельных элементов. Для двух образцов было выполнено определение изотопного состава Nd, а для одного образца определение возраста методом ID-TIMS.

Определение содержаний петрогенных оксидов выполнено методом силикатного анализа в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по методике [Pashkova et al., 2019]. Определение содержаний редких и редкоземельных элементов проведено методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (аналитик С.В. Пантелейева). Химическое разложение проб для ICP-MS анализа проведено методом сплавления с метаборатом лития по методике [Panteleeva et al., 2003], что позволило достичь полного разложения всех минералов. Правильность результатов анализа контролировалась с помощью международных стандартных образцов BHVO-2, BCR-2, GSP-2, G-2. Ошибка определений содержаний редких и редкоземельных элементов методом ICP-MS составляла 2–10 %.

Sm-Nd изотопные исследования были выполнены в ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург. Выделение Sm и Nd проводилось по методике, описанной в [Котов и др., 1995]. Изотопный состав Nd и концентрации Sm и Nd были определены на многоколлекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-261 в статическом режиме. Измеренные отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ нормализованы к отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ и приведены к отношению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511860$ в Nd стандарте La Jolla. Точность определения концентраций Sm и Nd составила 0.5 %, изотопных отношений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.5\%$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.005\%$ (2σ). Средневзвешенное значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в Nd стандарте JNdI по результатам семи измерений отвечает 0.512104 ± 8 . Уровень холостого опыта за время исследований составлял 0.03–0.20 нг для Sm и 0.1–0.5 нг для Nd. При расчете величин $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ и модельных возрастов $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ использованы современные значения для однородного хондритового резервуара (CHUR), по [Jacobsen, Wasserburg, 1984], и деплетированной мантии (DM), по [Goldstein, Jacobsen, 1988].

Выделение бадделеита из образца диорита проводилось в ИЗК СО РАН с использованием «водной» методики, опубликованной в статье [Söderlund, Johansson, 2002]. Всего из пробы весом около 1.5 кг было выделено > 100 зерен бадделеита размером от 20 до 65 мкм.

U-Pb геохронологические исследования (ID-TIMS) бадделеита выполнены в ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург. Для изотопного анализа были использованы наиболее прозрачные, однородные кристаллы бадделеита, подвергнутого многоступенчатому удалению поверхностных загрязнений в спирте, ацетоне, 1 М HNO₃ и 1 М HCl, при этом после каждой ступени они промывались особо чистой водой. Химическое разложение бадделеита выполнялось по модифицированной методике Т.Е. Кроу [Krogh, 1973] в тefлоновых микрокапсулах, помещенных в резервуар для разложения системы Рагг, $^{235}\text{U}-^{202}\text{Pb}$ изотопный индикатор добавлялся непосредственно перед разложением. Изотопные анализы выполнены на масс-спектрометре TRITON TI при помощи счетчика ионов. Точность определения концентраций U и Pb, а также U/Pb отношений составила 0.5 %. Холостое загрязнение не превышало 1–2 пг Pb и 0.2 пг U. Обработка экспериментальных данных проводилась при помощи программам PbDAT [Ludwig, 1991] и ISOPLOT [Ludwig, 2003]. При расчете возрастов использованы общепринятые значения констант распада урана [Steiger, Jäger, 1977]. Поправки на обычный свинец введены в соответствии с модельными величинами [Stacey, Kramers, 1975]. Все ошибки приведены на уровне 2σ .

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Геологические и петрографические исследования. Дайка была изучена в правом борту руч. Элигей (район пос. Онгурен, Западное Прибайкалье) (см. рис. 2). Дайка прорывает кварциты и слюдисто-кварцевые сланцы харгитуйской свиты сарминской серии, время накопления которых оценивается в диапазоне 1.95—2.10 млрд лет [Ефремова и др., 2024б], а возраст метаморфизма составляет 1.95 млрд лет [Савельева и др., 2019]. Видимая мощность дайки 25 м. Дайка имеет северо-восточное простиранье (аз. прост. 65°) и крутые углы падения. Центральные части дайки сложены крупнозернистыми разностями, в то время как в краевых частях отмечаются более мелкозернистые разности (рис. 3).

Диориты центральной части дайки представляют собой крупнозернистые образования офитовой структуры (см. рис. 3, а). Основными пордообразующими минералами диоритов являются плахиоклаз и клинопироксен, который почти полностью замещен роговой обманкой. В свою очередь, роговая обманка иногда замещается биотитом и эпидотом. Плахиоклазы преимущественно соссюритизированы. Аксессорные минералы представлены рудным минералом, сферулитом, апатитом, цирконом и бадделеитом. В интерстициях отмечаются гранофировые срастания кварца и плахиоклаза. Кроме этого, кварц выполняет мелкие прожилки в породе.

Диориты краевой части обнаруживают более мелкозернистую текстуру и микроофитовую и микропойкилоофитовую структуру (см. рис. 3, б). По минеральному составу и проявлениям вторичных изменений породы краевой части полностью идентичны диоритам центральной части дайки (см. рис. 3, б).

U-Pb геохронологические исследования. Проба № 2119 крупнозернистого диорита была отобрана из центральной части дайки. Из пробы был выделен бадделеит, представленный главным образом игольчатыми и псевдопризматическими прозрачными и полупрозрачными кристаллами темно-коричневого и коричневого цвета с однородным внутренним строением. U-Pb изотопные исследования были выполнены для трех микронавесок (2—3 зерна) и единичного зерна бадделеита (табл. 2). Изученный бадделеит характеризуется незначительной возрастной дискордантностью (0.9—3.0 %). Точки изотопного состава бадделеита аппроксимируются дискордией (рис. 4), верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 1862 ± 7 млн лет (СКВО = 0.36, нижнее пересечение практически отвечает нулю). Полученное значение возраста можно интерпретировать как возраст кристаллизации бадделеита и, следовательно, как возраст формирования диоритов.

Геохимические и изотопные исследования. Породы обнаруживают содержания $\text{SiO}_2 = 56.0—57.1$ мас. % и $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 4.8—5.3$ мас. % (табл. 3, рис. 5, а). На классической TAS диаграмме [Шарпенок и др., 2013] точки составов изученных пород попадают в поле диоритов (см. рис. 5). Породы представляют собой сильно дифференцированные разности ($\text{mg}\# = 36.5—37.4$) (табл. 3). Вариаций составов диоритов в краевых и центральных частях дайки отмечено не было. Породы характеризуются близкими низкими содержаниями $\text{TiO}_2 = 1.09—1.17$ мас. % и $\text{P}_2\text{O}_5 = 0.14—0.19$ мас. % (см. табл. 3), а также обнаруживают фракционированное распределение редкоземельных элементов $(\text{La}/\text{Yb})_n = 6.5—7.3$ и слабо выраженную отрицательную европиевую аномалию ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.84—0.88$) (рис. 6, а). Для диоритов характерны низкие концентрации $\text{Nb} = 8.0—9.9$ г/т и высокие содержания $\text{Th} = 8.4—9.9$ г/т, $\text{Zr} = 160—192$ г/т, $\text{Ba} = 662—767$ г/т, легких редкоземельных элементов $(\Sigma(\text{La}, \dots, \text{Eu}) = 120—136$ г/т (см. табл. 3). На мультиэлементных диаграммах отмечаются отрицательные аномалии по $\text{Nb}-\text{Ta}$, P , Ti и положительные аномалии по $\text{Th}-\text{U}$ и $\text{Zr}-\text{Hf}$ (рис. 6, б).

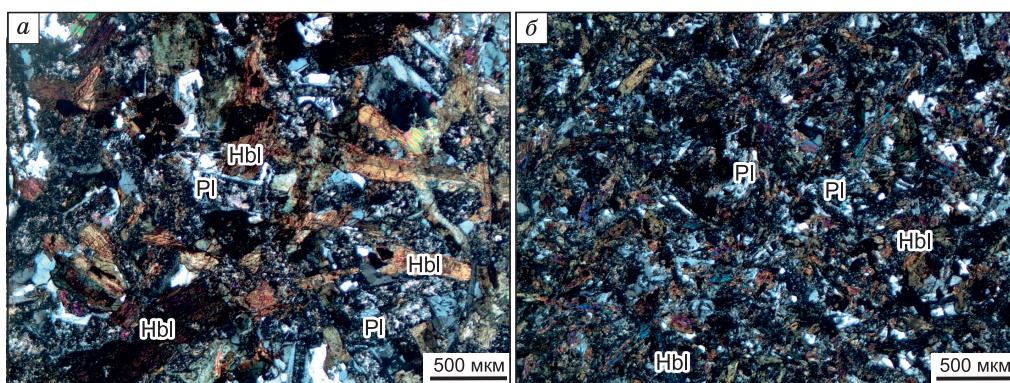


Рис. 3. Микрофотографии шлифов диоритов из центральной части дайки, обр. 2119 (а) и из краевой части дайки, обр. 2122 (б).

Николи скрещены. Hbl — роговая обманка, Pl — плахиоклаз.

Таблица 2. Результаты U-Pb геохронологических исследований бадделеита (пр. 2119)

№ п/п	Размерная фракция (мкм) и характеристика бадделеита	U/Pb*	Pb_c / Pb_t	Изотопные отношения					Rho	Возраст, млн лет		
				$^{206}\text{Pb} / ^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}^a$	$^{208}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}^a$	$^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}^6$	$^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}^6$		$^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb} / ^{206}\text{Pb}$
1	30-45, 2 зер., т.-кор., иг.	2.50	0.17	155	0.1147 ± 2	0.0420 ± 1	5.1297 ± 256	0.3244 ± 9	0.73	1841 ± 9	1811 ± 5	1875 ± 7
2	30-45, 3 зер., т.-кор., иг.	3.13	0.07	1770	0.1140 ± 1	0.0117 ± 1	5.1561 ± 102	0.3271 ± 5	0.87	1843 ± 4	1825 ± 4	1864 ± 2
3	30-45, 3 зер., кор., иг.	3.08	0.02	1246	0.1144 ± 1	0.0167 ± 1	5.1654 ± 108	0.3273 ± 5	0.78	1847 ± 4	1826 ± 4	1871 ± 2
4	30-45, 1 зер., кор., иг.	3.18	0.01	719	0.1141 ± 2	0.0105 ± 1	5.2207 ± 144	0.3320 ± 6	0.82	1856 ± 6	1848 ± 5	1865 ± 3

Примечание. Pb_c — обычный свинец; Pb_t — общий свинец; ^a — измеренные изотопные отношения; ⁶ — изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный свинец; Rho — коэффициент корреляции ошибок отношений $^{207}\text{Pb} / ^{235}\text{U} — ^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$. Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам. т.-кор. — кристаллы бадделеита темно-коричневого цвета, кор. — кристаллы бадделеита коричневого цвета, иг. — игольчатые кристаллы бадделеита.

* Вес зерен бадделеита не определялся.

Изученные диориты обнаруживают низкие значения отношения $^{143}\text{Nd} / ^{144}\text{Nd}$, равные 0.511341—0.511363, низкие величины отношения $^{147}\text{Sm} / ^{144}\text{Nd}$ (0.1156—0.1186) и значения $\varepsilon_{\text{Nd}}(T) = -5.9 \dots -6.2$ (табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученная U-Pb оценка возраста по бадделеиту (1862 ± 7 млн лет) из диорита дайки, расположенной в центральной части Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона, позволила надежно зафиксировать возраст раннепротерозойского этапа базитового магматизма в данном регионе, который соответствует времени формирования магматических пород Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса (1.84—1.88 млрд лет), что еще раз подтверждает тот факт, что внедрение раннепротерозойских даек в южной части Сибирского кратона отражает этап постколлизионного растяжения, связанный с коллапсом раннепротерозойских орогенов, завершающих финальную стадию формирования структуры кратона [Диденко и др., 2003; Ларин и др., 2003; Donskaya, 2020; Donskaya, Gladkochub, 2021].

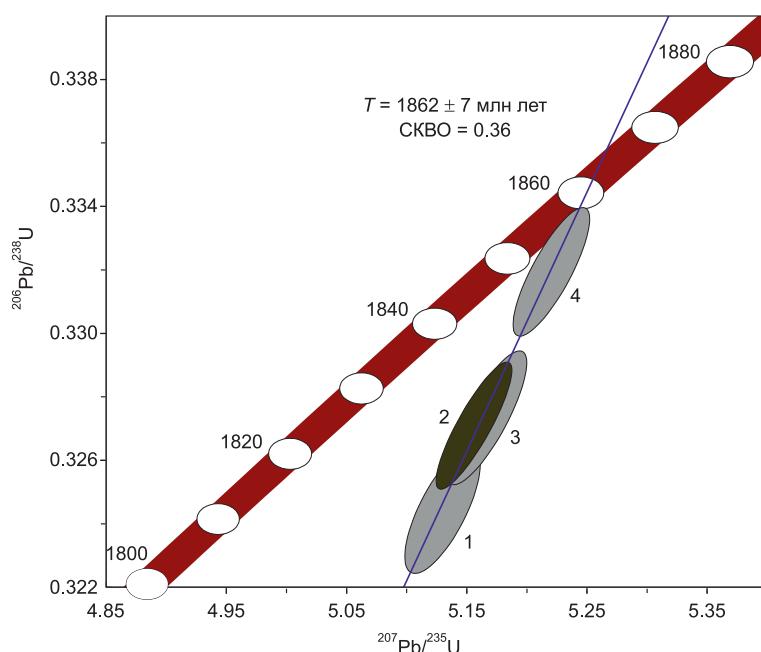


Рис. 4. Диаграмма с конкордией для бадделеита из диорита дайки района пос. Онгурен (пр. 2119).

Номера точек на диаграмме соответствуют порядковым номерам в табл. 2.

Таблица 3.

Химический состав диоритов дайки района пос. Онгурен

Компонент	2119	2120	2121	2122	2123	2124
SiO ₂ , мас. %	56.60	56.03	56.73	56.85	56.89	57.09
TiO ₂	1.09	1.13	1.17	1.14	1.15	1.17
Al ₂ O ₃	14.17	14.09	14.28	13.89	14.26	14.21
Fe ₂ O ₃	3.62	3.39	2.99	2.71	2.82	3.22
FeO	7.63	8.01	7.90	8.49	8.22	7.81
MnO	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.16
MgO	2.99	3.09	3.00	3.05	3.07	3.03
CaO	6.36	6.20	6.21	6.11	6.06	5.87
Na ₂ O	2.87	2.82	2.81	2.88	2.87	2.86
K ₂ O	1.88	1.99	2.20	2.43	2.40	2.29
P ₂ O ₅	0.14	0.16	0.18	0.18	0.18	0.19
П.п.п.	2.22	2.42	2.35	2.00	2.04	2.33
H ₂ O ⁻	0.22	0.17	0.11	0.07	0.06	0.05
CO ₂	<0.06	<0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
Сумма	99.94	99.65	100.15	100.03	100.24	100.35
Co, г/т	41	41	40	43	42	43
Ni	28	27	26	28	28	28
V	270	270	260	270	280	270
Cr	22	32	30	37	24	26
Rb	71	80	78	87	68	93
Sr	273	286	236	266	223	285
Y	32	31	28	30	28	32
Zr	171	186	166	174	160	192
Nb	9.03	9.63	8.12	9.30	8.04	9.88
Ba	662	676	718	702	691	767
La	30.16	28.21	28.91	28.57	26.99	30.22
Ce	64.55	62.48	60.37	61.07	56.55	65.03
Pr	7.56	7.11	6.97	7.18	6.65	7.46
Nd	26.86	25.64	24.56	25.47	23.50	26.62
Sm	5.77	5.27	5.24	5.20	4.84	5.66
Eu	1.44	1.45	1.34	1.42	1.29	1.47
Gd	4.90	4.97	4.47	4.76	4.33	4.94
Tb	0.80	0.81	0.73	0.77	0.66	0.86
Dy	4.95	4.99	4.47	4.87	4.31	5.33
Ho	1.07	1.05	0.91	1.03	0.92	1.12
Er	3.00	2.98	2.61	2.89	2.60	3.14
Tm	0.42	0.44	0.38	0.42	0.38	0.45
Yb	2.79	2.83	2.55	2.79	2.43	2.99
Lu	0.39	0.42	0.39	0.45	0.35	0.48
Hf	4.62	4.51	4.27	4.53	4.00	4.73
Ta	0.64	0.66	0.62	0.63	0.52	0.67
Th	9.34	9.64	8.67	9.38	8.37	9.89
U	3.59	1.88	2.03	1.74	1.63	2.16
mg#	36.5	37.0	37.3	36.9	37.4	37.2
(La/Yb) _n	7.0	6.5	7.3	6.6	7.2	6.5
Eu/Eu*	0.84	0.88	0.86	0.88	0.87	0.86
(Nb/La) _{pm}	0.29	0.33	0.27	0.31	0.29	0.32
(La/Sm) _n	3.00	3.07	3.16	3.15	3.20	3.06

Примечание. mg# = Mg × 100/(Mg + Fe²⁺), где Mg = MgO/40.31, Fe²⁺ = (Fe₂O₃_{общ} × 0.8998 × 0.85)/71.85; Eu/Eu* = Eu_n/(√(Sm_n × Gd_n)). n — значения нормализованы по составу хондрита [Wakita et al., 1970], pm — значения нормализованы по составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989].

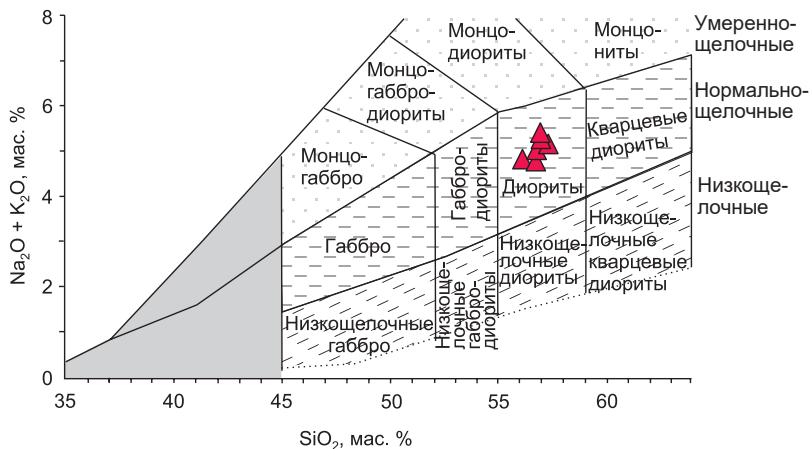


Рис. 5. Классификационная диаграмма $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ — SiO_2 [Шарпенок и др., 2013] для диоритов дайки района пос. Онгурен (красные треугольники).

Серое поле — область распространения пород ультраосновного состава.

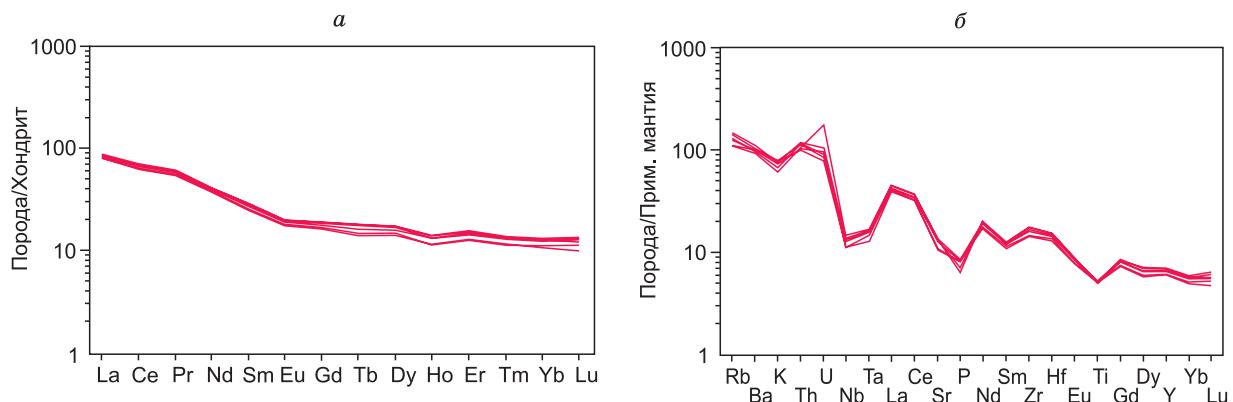


Рис. 6. Распределение редкоземельных элементов (нормализация к хондриту [Wakita et al., 1970]) (а) и мультиэлементные диаграммы (нормализация к составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989]) (б) для диоритов дайки района пос. Онгурен.

Таблица 4. Sm-Nd изотопные данные для диоритов дайки района пос. Онгурен

Номер образца	Возраст, млн лет	Содержание, мкг/г		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$
		Sm	Nd			
2119	1862	5.20	26.49	0.1186	0.511363 ± 4	-6.2
2122	1862	5.26	27.51	0.1156	0.511341 ± 3	-5.9

Изученные породы характеризуются хорошо выраженным отрицательными Nb-Ta и Ti аномалиями на мультиэлементных спектрах (см. рис. 6, б) и отрицательными значениями $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ (см. табл. 4). На диаграмме Th/Yb — Nb/Yb [Pearce, 2008] фигутивные точки диоритов располагаются выше поля N-MORB—E-MORB—OIB (рис. 7, а). В совокупности перечисленные характеристики диоритов могут свидетельствовать, что данные породы были сформированы либо за счет плавления мантийных источников, либо содержащих субдукционный компонент, либо контаминированных коровыми материалами. Важно отметить, что магматические породы основного—среднего состава, проанализированные на других участках Байкальского выступа фундамента и для которых, на основании косвенных данных, допускался близкий диоритам раннепротерозойский возраст [Шохонова и др., 2010; Донская и др., 2023], обнаруживают определенное сходство геохимических и изотопных характеристик с изученными диоритами. Всем этим породам свойственны отрицательные Nb аномалии на мультиэлементных диаграммах [Шохонова и др., 2010; Донская и др., 2023], сходные низкие значения отношения $(\text{Nb}/\text{La})_{\text{pm}}$, сопостави-

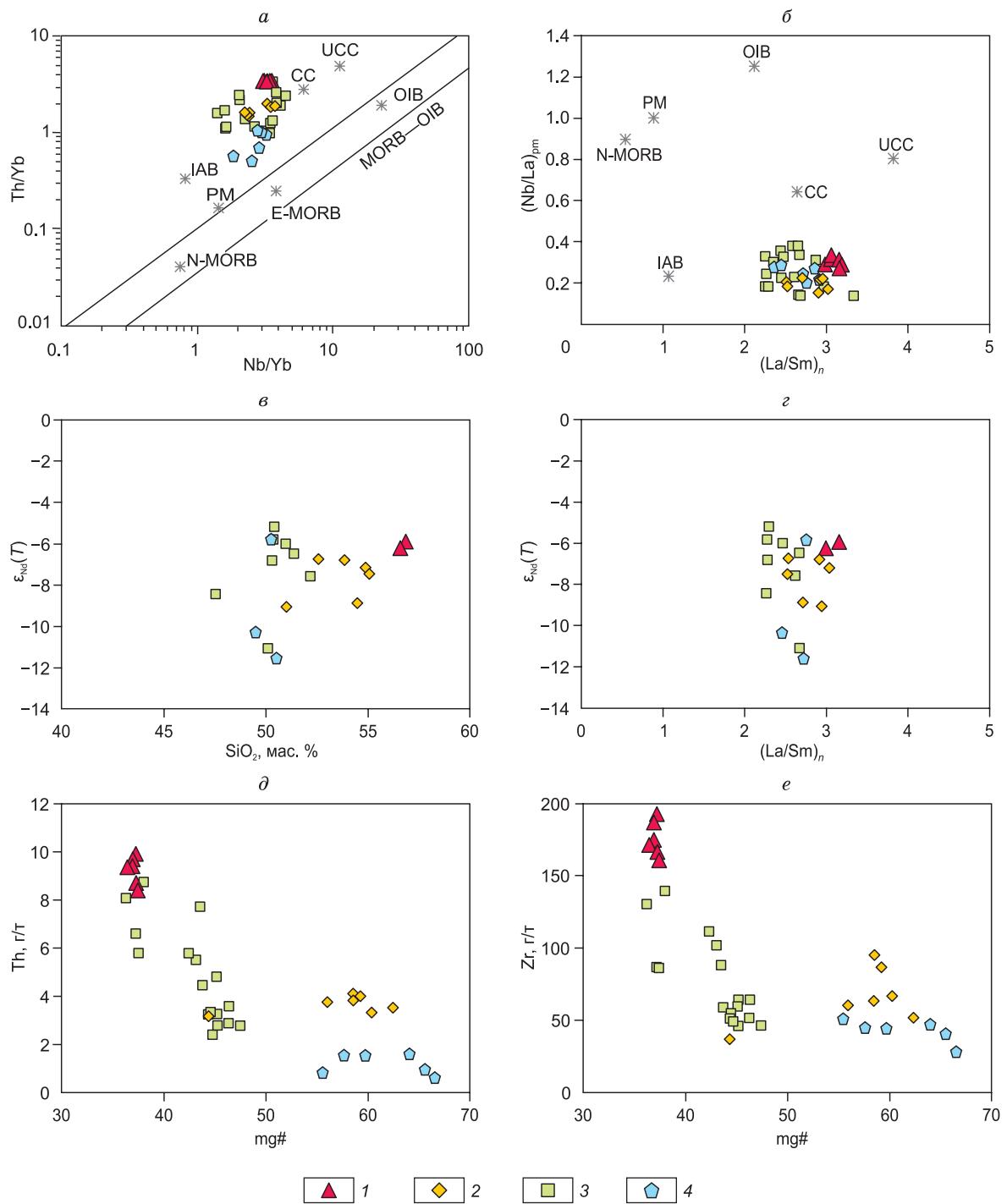


Рис. 7. Диаграммы Th/Yb — Nb/Yb [Pearce, 2008] (a), $(\text{Nb}/\text{La})_{\text{pm}}$ — $(\text{La}/\text{Sm})_n$ (b), $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ — SiO_2 (c), $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ — $(\text{La}/\text{Sm})_n$ (d), Th — $\text{mg}\#$ (e), Zr — $\text{mg}\#$ (e) для раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона.

1 — диориты дайки района пос. Онгурен, 2 — базальтоиды малокосинской свиты аkitанской серии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса [Шохонова и др., 2010], 3 — долериты комбинированных долерит-риолитовых даек Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса [Шохонова и др., 2010], 4 — долериты даек западно-прибайкальской части Байкальского выступа фундамента [Донская и др., 2023]. pm — составы нормализованы к составу примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989], n — составы нормализованы к составу хондрита [Wakita et al., 1970]. Здесь и далее: CC — континентальная кора (средний состав), IAB — островодужные базальты, N-MORB и E-MORB — базальты срединно-океанических хребтов (N — нормальный тип, E — обогащенный тип), OIB — базальты океанических островов, PM — примитивная мантия, UCC — верхняя континентальная кора. Точки составов N-MORB, E-MORB, OIB и PM нанесены по [Sun, McDonough, 1989], точка состава IAB, по [Dendorf et al., 2000], точки составов CC и UCC, по [Rudnick, Fountain, 1995].

мые с базальтами океанических дуг (рис. 7, б), а также близкие отрицательные значения $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$, варьирующие от -4.6 до -11.6 (см. рис. 7, в, г).

Специфическими характеристиками диоритов дайки района пос. Онгурен являются высокие концентрации Zr и Th (см. табл. 2), которые в большинстве своем выше, чем в остальных раннепротерозойских базитах региона (см. рис. 7, д, е). В связи с тем, что диориты дайки района пос. Онгурен имеют и значения mg# преимущественно ниже, чем остальные магматические породы основного—среднего состава (см. рис. 7, д, е), то повышенные содержания Zr и Th в этих диоритах можно связать с процессом фракционной кристаллизации родоначального расплава.

Все магматические породы основного—среднего состава Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона, несмотря на разные значения mg# (см. рис. 7, д, е), обнаруживают близкие друг другу низкие значения отношений $(\text{Nb/La})_{\text{pm}}$ и высокие значения отношений $(\text{La/Sm})_n$, а также, соответственно, отсутствие корреляционного тренда между этими отношениями (см. рис. 7, б). Кроме того, не отмечается корреляций между $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ и SiO_2 и $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$ и $(\text{La/Sm})_n$ для раннепротерозойских базитов региона (см. рис. 7, в, г). Отсутствие отмеченных корреляций, которые характерны для контамированных пород, так как содержание SiO_2 и отношение $(\text{La/Sm})_n$ являются индикаторами коровой контаминации [Puchtel et al., 1997; Туркина, 2023; Туркина и др., 2023], указывает на малую вероятность контаминации коровым материалом мантийных источников в промежуточной камере.

Все раннепротерозойские базиты Байкальского выступа фундамента, в том числе диориты дайки района пос. Онгурен, имеют высокие значения отношения Ce/Nb и на диаграмме $\text{Ce/Nb}—\text{Th/Nb}$ [Saunders et al., 1988] располагаются внутри и вблизи полей субдукционно связанных магматических источников и достаточно далеко от точек составов континентальной коры (рис. 8, а). Кроме того, все магматические породы основного—среднего состава попадают в поле SZLM (субдукционно-модифицированная литосферная мантия) на диаграмме $\text{Th/Nb}—\text{TiO}_2/\text{Yb}$ (см. рис. 8, б) [Pearce et al., 2021]. Таким образом, для всех раннепротерозойских базитов Байкальского выступа фундамента можно предполагать формирование в результате плавления субдукционно-модифицированных мантийных источников. В то же время отмечаются и определенные отличия индикаторных отношений химических элементов в раннепротерозойских магматических породах основного—среднего состава Байкальского выступа, в частности Th/Nb , TiO_2/Yb , Th/Ce (см. рис. 8), что указывает на некоторые отличия в составах источников пород. Например, для базальтоидов малокосинской свиты аkitканской серии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса в качестве источника рассматривалась обогащенная субконтинентальная литосферная мантия, для долеритов комбинированных долерит-риолитовых даек этого же пояса источником могла быть тугоплавкая часть литосферной мантии метасоматизированная субдукционными флюидами [Шохонова и др., 2010]. Специфической характеристикой пород изученной дайки является их образование из сильно дифференцированного расплава. Однако в любом случае для всех раннепро-

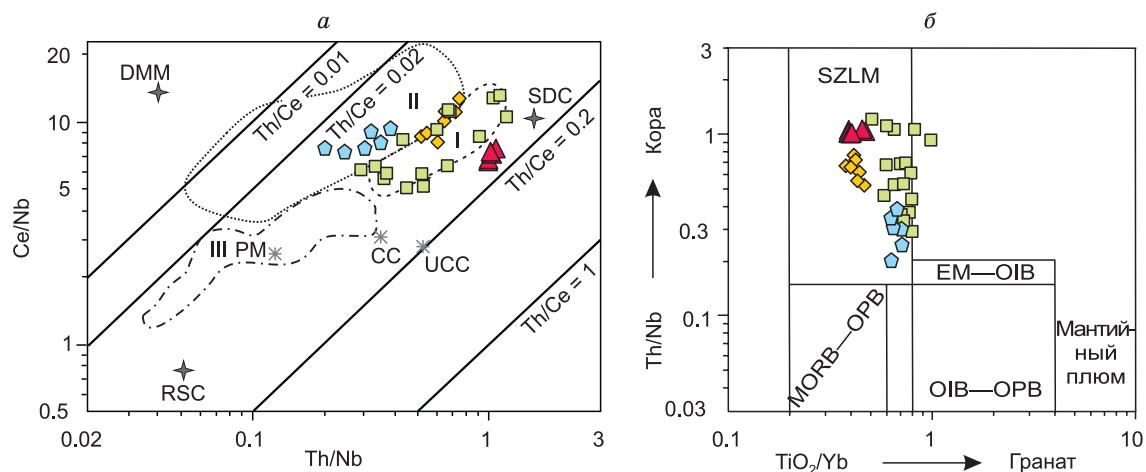


Рис. 8. Диаграммы $\text{Ce/Nb}—\text{Th/Nb}$ [Saunders et al., 1988] (а) и $\text{Th/Nb}—\text{TiO}_2/\text{Yb}$ [Pearce et al., 2021] (б) для раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона.

Усл. обозн. см. на рис. 7. Здесь и далее: DMM — деплетированная MORB мантия, EM — обогащенный компонент, RSC — редкоститовый материал океанической коры, SDC — субдукционный компонент, SZLM — субдукционно-модифицированная литосферная мантия. Поля на диаграмме (а) [Туркина, Ножкин, 2008]: I — базальты островных дуг, II — базальты задугового бассейна Лая, III — базальты океанических плато Онтонг Джава и Броккен Ридж.

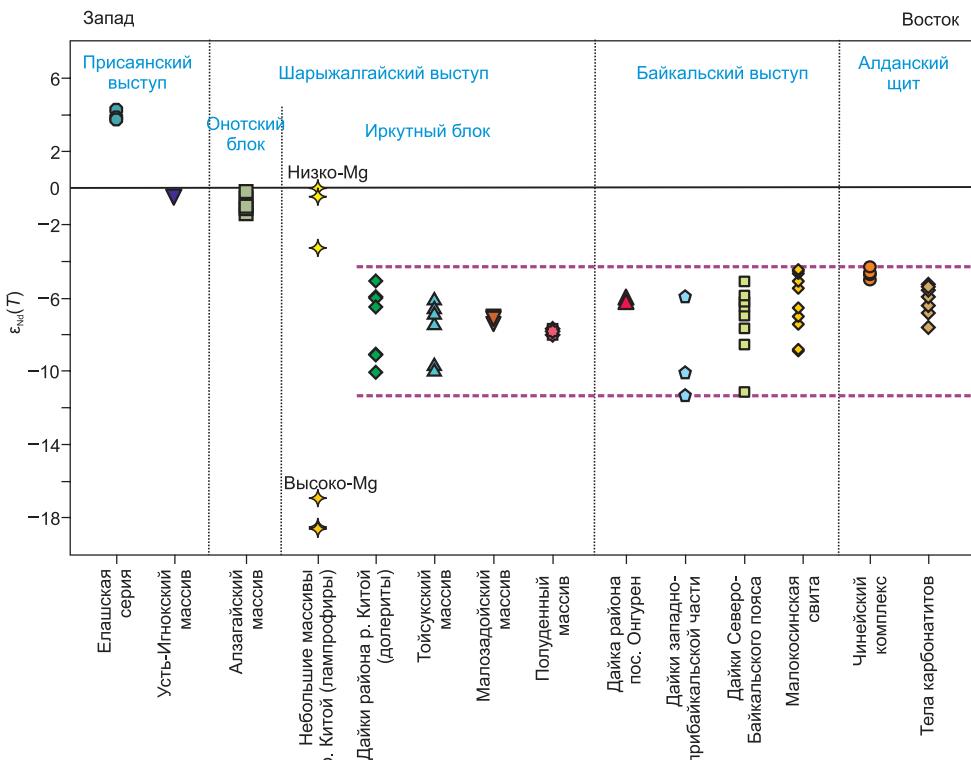


Рис. 9. Значения $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ в магматических породах основного—среднего состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса.

Пунктирными линиями оконтурено поле магматических пород с диапазоном значений $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = -4.3 \dots -11.6$. Nd изотопные данные: елашская серия [Донская и др., 2019; Ножкин и др., 2021], Усть-Игнокский массив [Донская и др., 2020], Алзагайский массив [Туркина и др., 2022], небольшие массивы района р. Китой (лампрофиры) [Ivanov et al., 2019], дайки района р. Китой (долериты) [Donskaya, Gladkochub, 2021; Туркина, Изох, 2023], Тойсукский массив [Туркина, Капитонов, 2019; Туркина, Изох, 2023], Малозадойский массив [Туркина, Изох, 2023], Полуденный массив [Туркина, Изох, 2023], дайка района пос. Онгурен (см. табл. 4), дайки западно-прибайкальской части [Gladkochub et al., 2009; Донская и др., 2023], дайки Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса [Шохонова и др., 2010], малокосинская свита акитанской серии Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса [Неймарк и др., 1998; Шохонова и др., 2010], чинейский комплекс [Гонгальский и др., 2008a], тела карбонатитов Центрально-Алданской карбонатитовой провинции [Doroshkevich et al., 2018].

терозойских магматических пород основного—среднего состава Байкальского выступа фундамента в качестве преобладающего источника можно рассматривать обогащенную субконтинентальную литосферную мантию.

В определенной степени близкие раннепротерозойским долеритам, диоритам и базальтоидам Байкальского выступа фундамента изотопные и геохимические характеристики обнаруживают магматические породы основного—среднего состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса, распространенные в пределах Алданского щита и Иркутского блока Шарыжалгайского выступа фундамента (рис. 9). В частности, отрицательные значения $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$, варьирующиеся от -4.3 до -4.9, имеют габброиды чинейского комплекса Алданского щита [Гонгальский и др., 2008a], а величины $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ в диапазоне от -5.1 до -10.1 характерны для большинства раннепротерозойских долеритов, габброидов, монцодиоритов Иркутского блока Шарыжалгайского выступа фундамента (см. рис. 9) [Туркина, Капитонов, 2019; Donskaya, Gladkochub, 2021; Туркина, Изох, 2023]. Отметим также, что сходные отрицательные значения $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$, равные -5.2...-7.6, имеют карбонатиты Центрально-Алданской карбонатитовой провинции (рис. 9) [Doroshkevich et al., 2018]. Кроме того, все базиты Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса с отрицательными значениями $\epsilon_{\text{Nd}}(T)$ в диапазоне от -4.3 до -11.6 попадают в поле субдукционно-модифицированных литосферных мантийных источников на диаграмме Th/Nb—TiO₂/Yb (рис. 10, a) [Pearce et al., 2021].

Таким образом, большинство раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса от Алданского щита (через Байкальский выступ фундамента) до Иркутского блока Шарыжалгайского выступа (см. рис. 1, 9, 10, a) были сформированы в результате плавления обогащенных субконтинентальных литосферных мантийных ис-

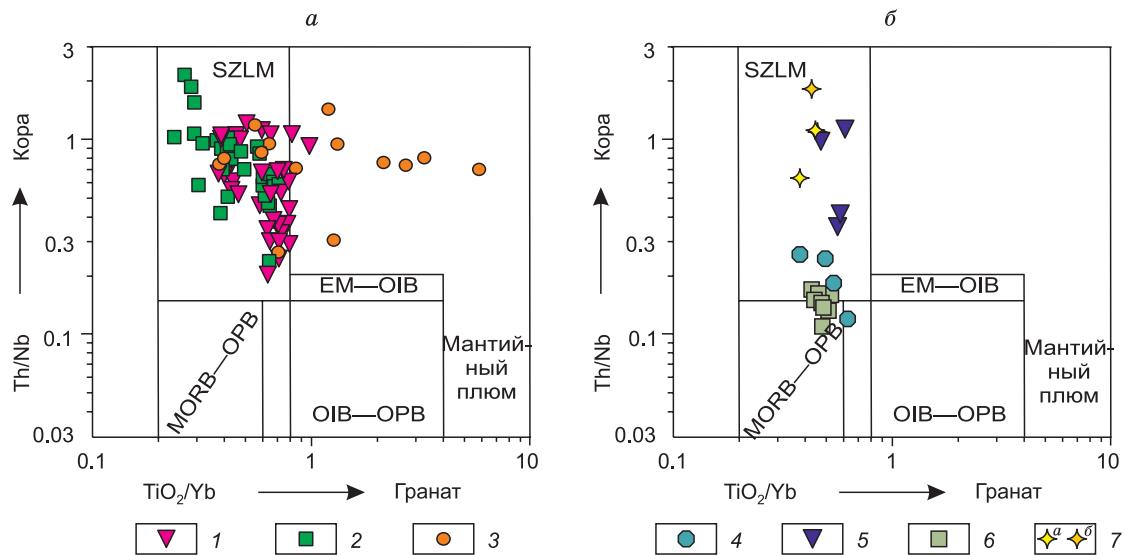


Рис. 10. Диаграмма Th/Nb — TiO_2/Yb [Pearce et al., 2021] для раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса:

а — породы Алданского щита, Байкальского выступа фундамента и Иркутского блока Шарыжалгайского выступа фундамента (за исключением лампрофиров небольших массивов района р. Китой), *б* — породы Присаянского выступа и западной части Шарыжалгайского выступа. Геохимические данные: 1 — Байкальский выступ фундамента (см. табл. 3 и [Шохонова и др., 2010; Донская и др., 2023]), 2 — Иркутский блок Шарыжалгайского выступа фундамента (за исключением лампрофиров небольших массивов района р. Китой) [Donskaya, Gladkochub, 2021; Туркина, Изох, 2023], 3 — Алданский щит (чинейский комплекс) [Гонгальский и др., 2008б; Гонгальский, 2010; Gongalsky et al., 2016], 4 — елашская серия Бирюсинского блока Присаянского выступа фундамента [Донская и др., 2019], 5 — Усть-Игнокский массив Урикско-Ильинского грабена Присаянского выступа фундамента [Донская и др., 2020], 6 — Алзагайский массив Онотского блока Шарыжалгайского выступа фундамента [Туркина и др., 2022], 7 — небольшие массивы района р. Китой Иркутского блока Шарыжалгайского выступа фундамента: *а* — низко-Mg лампрофирсы, *б* — высоко-Mg лампрофирсы [Ivanov et al., 2019].

точников, характеризующихся отрицательными значениями $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$. О.М. Туркина и А.Э. Изох [2023] сделали предположение, что формирование субконтинентальной литосферной мантии с такими изотопными и геохимическими характеристиками под южной частью Сибирского кратона могло быть связано с архейскими субдукционными процессами.

Существенно отличающиеся изотопные и геохимические характеристики были зафиксированы для базитов западной части Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса (Присаянский выступ и западная часть Шарыжалгайского выступа) (см. рис. 1, 9, 10, *б*). Большинство магматических пород основного состава в этой части пояса имеют положительные или слабоотрицательные значения $\varepsilon_{\text{Nd}}(T)$, а составы некоторых пород располагаются в зоне сочленения литосферного и деплетированного астеносферного мантийных источников на диаграмме Th/Nb — TiO_2/Yb (см. рис. 10, *б*) [Pearce et al., 2021], что позволяет допускать их формирование в результате смешения этих двух источников в разных пропорциях [Донская и др., 2019; Donskaya, Gladkochub, 2021; Туркина, Изох, 2023]. Вероятно, вовлечение в плавление астеносферного мантийного источника было связано с процессами деламинации литосферы в юго-западной части Сибирского кратона на финальной стадии становления его структуры [Donskaya, Gladkochub, 2021]. Однако в любом случае основным источником раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса является субконтинентальная литосферная мантия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение возраста U-Pb методом (ID-TIMS) по бадделеиту из диорита дайки, расположенной в районе пос. Онгурен, показало значение 1862 ± 7 млн лет. Полученная оценка является первым надежным определением возраста для раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Байкальского выступа фундамента, входящих в структуру Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса.

Изученная дайка сложена диоритами офитовой структуры, представленными крупнозернистыми разностями в центральной части и мелкозернистыми в краевых частях, но которые не обнаруживают

отличий в петрографических, геохимических и изотопных характеристиках. Породы представляют собой сильно дифференцированные разности. Диориты характеризуются низкими содержаниями TiO_2 , P_2O_5 , Nb , высокими концентрациями Th , Zr , Va , легких редкоземельных элементов и обнаруживают низкие отрицательные значения $\varepsilon_{Nd}(T) = -5.9...-6.2$. Предполагается, что источником этих диоритов была обогащенная субконтинентальная литосферная мантия.

Большинство раннепротерозойских магматических пород основного—среднего состава Южно-Сибирского постколлизионного магматического пояса в пределах Алданского щита, Байкальского выступа фундамента и Иркутского блока Шарыжалгайского выступа обнаружили сходные отрицательные значения $\varepsilon_{Nd}(T)$ в диапазоне от -4.3 до -11.6 и геохимические характеристики, соответствующие породам, формирование которых связано с плавлением субдукционно-модифицированных литосферных мантийных источников в обстановке постколлизионного растяжения.

Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

Геологические и геохимические исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00196, <https://rscf.ru/project/23-17-00196/>, геохронологические исследования — при финансовой поддержке государственной темы НИР FMUW-2022-0003 (ИГГД РАН).

ЛИТЕРАТУРА

Бибикова Е.В., Кориковский С.П., Кирнозова Т.И., Сумин Л.В., Аракелянц М.М., Федоровский В.С., Петрова З.И. Определение возраста пород Байкало-Витимского зеленокаменного пояса изотопно-геохронологическими методами // Изотопное датирование процессов метаморфизма и метасоматоза / Ред. Ю.А. Шуколюков. М., Наука, 1987, с. 154—164.

Галимова Т.Ф., Пермяков С.А., Бобровский В.Т., Пашкова А.Г., Бормоткина Л.А., Поваринцева С.А., Матвейчук А.А., Намолова М.М., Садриев В.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-48 — Иркутск. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009, 574 с.

Гладкочуб Д.П., Писаревский С.А., Мазукабзов А.М., Седерлунд У., Скляров Е.В., Донская Т.В., Эрнст Р.Е., Станевич А.М. Первые свидетельства палеопротерозойского постколлизионного базитового магматизма в Присаянском выступе фундамента Сибирского кратона // ДАН, 2013, т. 450, № 4, с. 440—444.

Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Эрнст Р.Е., Седерлунд У., Мазукабзов А.М., Шохонова М.Н. Расширение ареала Тимптонской крупной магматической провинции (~1.75 млрд лет) Сибирского кратона // Геодинамика и тектонофизика, 2019, т. 10, № 4, с. 829—839.

Глебовицкий В.А., Хильтова В.Я., Козаков И.К. Тектоническое строение Сибирского кратона: интерпретация геолого-геофизических, геохронологических и изотопно-геохимических данных // Геотектоника, 2008, № 1, с. 12—26.

Гонгальский Б.И. Особенности основного магматизма Удокан-Чинейского рудного района (Северное Забайкалье) // Литосфера, 2010, № 3, с. 87—94.

Гонгальский Б.И., Суханов М.К., Гольцман Ю.В. Sm-Nd изотопная система Чинейского анортозит-габброноритового plutона (Восточное Забайкалье) // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии. М., ИГЕМ РАН, 2008а, с. 57—60.

Гонгальский Б.И., Криволуцкая Н.А., Арискин А.А., Николаев Г.С. Строение, состав и формирование Чинейского анортозит-габброноритового массива в Северном Забайкалье // Геохимия, 2008б, № 7, с. 691—720.

Диденко А.Н., Козаков И.К., Бибикова Е.В., Водовозов В.Ю., Хильтова В.Я., Резницкий Л.З., Иванов А.В., Левицкий В.И., Травин А.В., Шевченко Д.О., Рассказов С.В. Палеомагнетизм нижнепротерозойских гранитоидов Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирского кратона и геодинамические следствия // ДАН, 2003, т. 390, № 3, с. 368—373.

Донская Т.В., Бибикова Е.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Баянова Т.Б., ДеВаэле Б., Диденко А.Н., Бухаров А.А., Кирнозова Т.И. Петрогенезис и возраст вулканитов кислого состава Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса, Сибирский кратон // Петрология, 2008, т. 16, № 5, с. 452—479.

Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Львов П.А., Демонтерова Е.И., Мотова З.Л. Саяно-Бирюсинский вулканоплутонический пояс (южная часть Сибирского кратона): возраст и петрогенезис // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (1), с. 18—40.

Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Лепехина Е.Н., Львов П.А., Демонтерова Е.И., Мотова З.Л. Раннепротерозойский базитовый магматизм Южно-Сибирского постколлизион-

ногого магматического пояса (на примере Усть-Игнокского массива Урикско-Ийского грабена) // Геология и геофизика, 2020, т. 61 (9), с. 1165–1180.

Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Демонтерова Е.И., Ефремова У.С. Геохимические критерии разделения протерозойских долеритов даек центральной части Байкальского выступа фундамента Сибирского кратона // Геохимия, 2023, т. 68, № 5, с. 488–507.

Ефремова У.С., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Иванов А.В., Брянский Н.В. Раннепротерозойские отложения иликтинской свиты как индикаторы эволюции Акитканского орогена (юг Сибирского кратона) // Геология и геофизика, 2024а, т. 65 (5), с. 631–654.

Ефремова У.С., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Иванов А.В., Брянский Н.В. Разделение раннепротерозойской харгитуйской свиты сарминской серии (Акитканский орогенный пояс, Сибирский кратон) на разновозрастные толщи на основании результатов U–Pb-изотопного анализа циркона // ДАН, 2024б, т. 517, № 1, с. 1119–1125.

Ковач В.П., Самсонов А.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Адамская Е.В., Бортников В.В., Степанова А.В., Ерофеева К.Г., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М., Сковитина Т.М. Аркозовые песчаники кебектинской серии Угуйского грабена (Алданский щит): возраст, источники и обстановки накопления // ДАН, 2023, т. 512, № 1, с. 12–20.

Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Яковлева С.З., Бережная Н.Г., Мыскова Т.А. Этапы формирования континентальной коры центральной части Алданской гранулитогнейской области: U–Pb и Sm–Nd изотопные данные по гранитоидам // Петрология, 1995, т. 3, № 1, с. 99–110.

Ларин А.М., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Коваленко В.И., Рыцк Е.Ю., Яковлева С.З., Бережная Н.Г., Ковач В.П., Булдыгеров В.В., Срывацев Н.А. Северо-Байкальский вулканоплутонический пояс: возраст, длительность формирования и тектоническое положение // ДАН, 2003, т. 392, № 4, с. 506–511.

Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Хубанов В.Б., Мотова З.Л., Корнилова Т.А. Отложения рифтогенного этапа развития пассивной окраины Палеоазиатского океана (Байкальский сегмент) // ДАН, 2018, т. 478, № 5, с. 566–569.

Мехонюшин А.С., Эрнст Р.Е., Седерлунд У., Гамильтон М.А., Колотилина Т.Б., Изох А.Э., Поляков Г.В., Толстых Н.Д. Связь платиноносных ультрамафит-мафитовых интрузивов с крупными изверженными провинциями (на примере Сибирского кратона) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (5), с. 1043–1057.

Неймарк Л.А., Ларин А.М., Немчин А.А., Овчинникова Г.В., Рыцк Е.Ю. Геохимические, геохронологические (U–Pb) и изотопные (Pb, Nd) свидетельства анорогенного характера магматизма Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса // Петрология, 1998, т. 6, № 2, с. 139–164.

Ножкин А.Д., Туркина О.М., Савко К.А. Геохимия и изотопный состав палеопротерозойских гранитов и кислых вулканитов Елашского грабена: свидетельства гетерогенности раннедокембрийской коры // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (10), с. 1432–1446.

Попов Н.В., Котов А.Б., Постников А.А., Сальникова Е.Б., Шапорина М.Н., Ларин А.М., Яковлева С.З., Плоткина Ю.В., Федосеенко А.М. Возраст и тектоническое положение Чинейского расслоенного массива (Алданский щит) // ДАН, 2009, т. 424, № 4, с. 517–521.

Попов Н.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Постников А.А., Тимофеев В.Ф., Березкин В.И., Ларин А.М., Федосеенко А.М., Яковлева С.З. Диабазы куранахского комплекса западной части Алдано-Станового щита: возраст и тектоническое положение // ДАН, 2012, т. 442, № 3, с. 365–368.

Розен О.М. Сибирский кратон: тектоническое районирование, этапы эволюции // Геотектоника, 2003, № 3, с. 3–21.

Савельева В.Б., Данилова Ю.В., Шумилова Т.Г., Иванов А.В., Данилов Б.С., Базарова Е.П. Эпигенетическая графитизация в фундаменте Сибирского кратона — свидетельство миграции обогащенных углеводородами флюидов в палеопротерозое // ДАН, 2019, т. 486, № 2, с. 217–222.

Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Постников А.А., Немеров В.К., Писаревский С.А., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Корнилова Т.А. Северный сегмент Палеоазиатского океана в неопротерозое: история седиментогенеза и геодинамическая интерпретация // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (1), с. 60–79.

Туркина О.М. Вариации редкоэлементного и изотопного состава неоархейских мafических гранулитов юго-запада Сибирского кратона: следствие различных мантийных источников или коровой контаминации // Петрология, 2023, т. 31, № 2, с. 182–201.

Туркина О.М., Ножкин А.Д. Океанические и рифтогенные метавулканические ассоциации зеленокаменных поясов северо-западной части Шарыжалгайского выступа, Прибайкалье // Петрология, 2008, т. 16, № 5, с. 501–526.

Туркина О.М., Капитонов И.Н. Источники палеопротерозойских коллизионных гранитоидов (Шарыжалгайский выступ, юго-запад Сибирского кратона): от литосферной мантии до верхней коры // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (4), с. 489—513.

Туркина О.М., Изох А.Э. Гетерогенная субконтинентальная литосферная мантия под южным флангом Сибирского кратона: свидетельства по составу палеопротерозойских мafических ассоциаций // Геология и геофизика, 2023, т. 64 (10), с. 1369—1391.

Туркина О.М., Изох А.Э., Лавренчук А.В., Шелепов Я.Ю. Состав и изотопные параметры метабазальтов и габброидов Онотского гранит-зеленокаменного блока (юго-запад Сибирской платформы) как индикаторы эволюции литосферной мантии от архея к палеопротерозою // Петрология, 2022, т. 30, № 5, с. 520—544.

Туркина О.М., Сухоруков В.П., Родионов Н.В. Палеопротерозойские шошонитовые мafические ассоциации Иркутского блока (Шарыжалгайский выступ, юго-запад Сибирского кратона): U-Pb возраст и условия образования циркона // Геология и геофизика, 2023, т. 64 (6), с. 808—822.

Шарпенок Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. TAS-диаграмма сумма щелочей — кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород // Региональная геология и металлогенез, 2013, № 56, с. 40—50.

Шохонова М.Н., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Падерин И.П. Палеопротерозойские базальтоиды Северо-Байкальского вулканоплутонического пояса Сибирского кратона: возраст и петрогенезис // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (8), с. 1049—1072.

Donskaya T.V. Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic granitoids // Precambrian Res., 2020, v. 348, 105869, doi: [10.1016/j.precamres.2020.105869](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105869).

Donskaya T.V., Gladkochub D.P. Post-collisional magmatism of 1.88—1.84 Ga in the southern Siberian Craton: An overview // Precambrian Res., 2021, v. 367, 106447, doi: [10.1016/j.precamres.2021.106447](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106447).

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Poller U., Mazukabzov A.M., Bayanova T.B. Discovery of Archaean crust within the Akitkan orogenic belt of the Siberian craton: New insight into its architecture and history // Precambrian Res., 2009, v. 170, p. 61—72, doi: [10.1016/j.precamres.2008.12.003](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.12.003).

Dorendorf F., Wiechert U., Wörner G. Hydrated sub-arc mantle: a source for the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka/Russia // Earth Planet. Sci. Lett., 2000, v. 175, p. 69—86, doi: [10.1016/S0012-821X\(99\)00288-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00288-5).

Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izokh A.E., Klemd R., Ponomarchuk A.V., Nikolaeva I.V., Vladyskin N.V. Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesiocarbonatites (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield // J. Asian Earth Sci., 2018, v. 154, p. 354—368, doi: [10.1016/j.jseaes.2017.12.030](https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.12.030).

Ernst R.E., Hamilton M.A., Söderlund U., Hanes J.A., Gladkochub D.P., Okrugin A.V., Kolotilina T., Mekhonoshin A.S., Bleeker W., LeCheminant A.N., Buchan K.L., Chamberlain K.R., Didenko A.N. Long-lived connection between southern Siberia and northern Laurentia in the Proterozoic // Nat. Geosci., 2016, v. 9 (6), p. 464—469, doi: [10.1038/ngeo2700](https://doi.org/10.1038/ngeo2700).

Ernst R.E., Gladkochub D.P., Söderlund U., Donskaya T.V., Pisarevsky S.A., Mazukabzov A.M., El Bilali H. Identification of the ca. 720 Ma Irkutsk LIP and its plume centre in southern Siberia: The initiation of Laurentia-Siberia separation // Precambrian Res., 2023, v. 394, 107111, doi: [10.1016/j.precamres.2023.107111](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2023.107111).

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Natapov L.M., Mazukabzov A.M., Stanevich A.M., Sklyarov E.V. Siberian craton and its evolution in terms of the Rodinia hypothesis // Episodes, 2006, v. 29 (3), p. 169—174, doi: [10.18814/epiugs/2006/v29i3/002](https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i3/002).

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Reddy S.M., Poller U., Bayanova T.B., Mazukabzov A.M., Dril S., Todt W., Pisarevsky S.A. Palaeoproterozoic to Eoarchaean crustal growth in southern Siberia: a Nd-isotope synthesis // Geol. Soc. London, Spec. Publ., 2009, v. 323, p. 127—143, doi: [10.1144/SP323.6](https://doi.org/10.1144/SP323.6).

Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Ernst R.E., Wingate M.T.D., Söderlund U., Mazukabzov A.M., Sklyarov E.V., Hamilton M.A., Hanes J.A. Proterozoic mafic magmatism in Siberian craton: An overview and implications for paleocontinental reconstruction // Precambrian Res., 2010, v. 183, p. 660—668, doi: [10.1016/j.precamres.2010.02.023](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2010.02.023).

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean // Gondwana Res., 2019, v. 65, p. 1—16, doi: [10.1016/j.gr.2018.07.007](https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.07.007).

Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material: implications for crustal evolution // Earth Planet. Sci. Lett., 1988, v. 87, p. 249—265, doi: [10.1016/0012-821X\(88\)90013-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(88)90013-1).

Gongalsky B.I., Krivolutskaya N.A., Ariskin A.A., Nikolaev G.S. The Chineysky gabbronorite-anorthosite layered massif (Northern Transbaikalia, Russia): its structure, Fe-Ti-V and Cu-PGE deposits, and parental magma composition // Miner. Deposita, 2016, v. 51, p. 1013—1034, doi: [10.1007/s00126-016-0687-3](https://doi.org/10.1007/s00126-016-0687-3).

Ivanov A.V., Levitskii I.V., Levitskii V.I., Corfu F., Demonterova E.I., Reznitskii L.Z., Pavlova L.A., Kamenetsky V.S., Savatenkov V.M., Powerman V.I. Shoshonitic magmatism in the Paleoproterozoic of the south-western Siberian Craton: An analogue of the modern post-collision setting // *Lithos*, 2019, v. 328—329, p. 88—100, doi: [10.1016/j.lithos.2019.01.015](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.01.015).

Jacobsen S.B., Wasserburg G.J. Sm-Nd isotopic evolution of chondrites and achondrites, II // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1984, v. 67, p. 137—150, doi: [10.1016/0012-821X\(84\)90109-2](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90109-2).

Krogh T.E. A low-contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determination // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1973, v. 37, p. 485—494, doi: [10.1016/0016-7037\(73\)90213-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90213-5).

Ludwig K.R. PbDat for MS-DOS, version 1.21. U.S. Geological Survey Open-File Report 88-542, 1991.

Ludwig K.R. ISOPLOT/Ex, version 3.70. A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ. 4, 2003, 70 p.

Panteeva S.V., Gladkochoub D.P., Donskaya T.V., Markova V.V., Sandimirova G.P. Determination of 24 trace elements in felsic rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry after lithium metaborate fusion // *Spectrochim. Acta, Part B*, 2003, v. 58 (2), p. 341—350, doi: [10.1016/S0584-8547\(02\)00151-9](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00151-9).

Pashkova G.V., Panteeva S.V., Ukhova N.N., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L., Ivanov A.V., Asavin A.M. Major and trace elements in meimechites – rarely occurring volcanic rocks: developing optimal analytical strategy // *Geochem.: Explor. Environ. Anal.*, 2019, v. 19 (3), p. 233—243, doi: [10.1144/geochem2017-099](https://doi.org/10.1144/geochem2017-099).

Pearce J.A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // *Lithos*, 2008, v. 100, p. 14—48, doi: [10.1016/j.lithos.2007.06.016](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016).

Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // *Lithos*, 2021, v. 392—393, 106068, doi: [10.1016/j.lithos.2021.106068](https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106068).

Pisarevsky S.A., Natapov L.M., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Vernikovsky V.A. Proterozoic Siberia: A promontory of Rodinia // *Precambrian Res.*, 2008, v. 160, p. 66—76, doi: [10.1016/j.precamres.2007.04.016](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.016).

Priyatkina N., Ernst R.E., Khudoley A.K. A preliminary reassessment of the Siberian cratonic basement with new U-Pb-Hf detrital zircon data // *Precambrian Res.*, 2020, v. 340, 105645, doi: [10.1016/j.precamres.2020.105645](https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105645).

Puchtel I.S., Haase K.M., Hofmann A.W., Chauvel C., Kulikov V.S., Garbe-Schönberg C.-D., Nemchin A.A. Petrology and geochemistry of crustally contaminated komatiitic basalts from the Vetenry Belt, south-eastern Baltic Shield: Evidence for an early Proterozoic mantle plume beneath rifted Archean continental lithosphere // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, v. 61, p. 1205—1222, doi: [10.1016/S0016-7037\(96\)00410-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(96)00410-3).

Rudnick R.L., Fountain D.M. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective // *Rev. Geophys.*, 1995, v. 33, p. 267—309, doi: [10.1029/95RG01302](https://doi.org/10.1029/95RG01302).

Saunders A.D., Norry M.J., Tarney J. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: Trace element constraints // *J. Petrol., Spec. Lithosphere Issue*, 1988, p. 415—445, doi: [10.1093/petrology/Special_Volume.1.415](https://doi.org/10.1093/petrology/Special_Volume.1.415).

Smelov A.P., Timofeev V.F. The age of the North Asian Cratonic basement: An overview // *Gondwana Res.*, 2007, v. 12, p. 279—288, doi: [10.1016/j.gr.2006.10.017](https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.017).

Söderlund U., Johansson L. A simple way to extract baddeleyite (ZrO_2) // *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2002, v. 3 (2), p. 1—7, doi: [10.1029/2001GC000212](https://doi.org/10.1029/2001GC000212).

Stacey J.S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1975, v. 26, p. 207—221, doi: [10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6).

Steiger R.H., Jäger E. Subcommission on geochronology: convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1977, v. 36, p. 359—362, doi: [10.1016/0012-821X\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90060-7).

Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins* / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. Geol. Soc. London, Spec. Publ. 42, 1989, p. 313—345, doi: [10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19).

Wakita H., Schmitt R.A., Rey P. Elemental abundances of major, minor and trace elements in Apollo 11 lunar rocks, soil and core samples // *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference. Geochim. Cosmochim. Acta Suppl.*, v. 1, 1970, p. 1685—1717.