



## SOURCES AND MECHANISMS OF FORMATION OF ALKALINE RARE-METAL GRANITES AT THE ZASHIKHINSKY MASSIF BASED ON GEOCHEMICAL AND Nd ISOTOPE DATA

N.V. Alymova  , A.A. Vorontsov, S.I. Dril , I.A. Sotnikova 

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

**ABSTRACT.** The intraplate alkaline-granite magmatism essentially contributes to formation of rare-metal strategic raw materials. In the Major Sayan Fault of the East Sayan Mountains, the rocks of the Zashikhinsky (Pz<sub>3</sub>) massif were studied through the isotope-geochemical analysis to identify probable sources of alkaline-granite magma and mechanisms of their evolution resulting in ore accumulations, up to the formation of Nb-Ta deposits. The Nd isotopic characteristics of its alkaline granites were obtained for the first time. Together with the results of mineralogical and geochemical studies, they were applied for modeling its formation, in which crystallization differentiation of alkaline granite melts proceeds simultaneously with their assimilation of the enclosing granite-metamorphic formations.

**KEYWORDS:** Zashikhinsky massif; rare-metal granites; Nb-Ta mineralization; assimilation; crystallization differentiation

**FUNDING:** The studies are performed as part of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation to research theme 0284-2021-0008 "Geochemistry, petrology and ore content of intrusive and volcanic alkaline complexes and deposits of strategic metals, their mantle sources" and RFBR project 20-05-00261\_a "Petrology and geochemistry of rare-metal alkaline granites, transitional in mineral paragenesis from apgaitite to lithium-fluoride, exemplified by the Zashikhinsky deposit".

### SHORT COMMUNICATION

Received: June 1, 2022

Revised: July 11, 2022

Accepted: July 20, 2022

**Correspondence:** Natalya V. Alymova, [alymova@igc.irk.ru](mailto:alymova@igc.irk.ru)

**FOR CITATION:** Alymova N.V., Vorontsov A.A., Dril S.I., Sotnikova I.A., 2022. Sources and Mechanisms of Formation of Alkaline Rare-Metal Granites at the Zashikhinsky Massif Based on Geochemical and Nd Isotope Data. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0648. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0648

## ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ГРАНИТОВ ЗАШИХИНСКОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И Nd ИЗОТОПНЫХ ДАННЫХ

Н.В. Алымова, А.А. Воронцов, С.И. Дриль, И.А. Сотникова

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

**АННОТАЦИЯ.** При формировании месторождений редкометалльного стратегического сырья значимая роль принадлежит проявлениям внутриплитового щелочно-гранитного магматизма. С целью изучения вероятных источников щелочно-гранитных магм и механизмов их эволюции, приводящих к рудным накоплениям, вплоть до образования Nb-Ta месторождений, было проведено изотопно-геохимическое изучение пород Зашихинского массива (Восточно-Саянская зона, Главный Саянский разлом). Впервые получены Nd изотопные характеристики щелочных гранитов массива, которые в совокупности с результатами проведенных ранее минералогических и геохимических исследований позволили предложить модель его формирования, в которой кристаллизационная дифференциация щелочно-гранитных расплавов происходит одновременно с ассимиляцией ими вмещающих гранитных и гранитно-метаморфических комплексов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Зашихинский массив; редкометалльные граниты; Nb-Ta минерализация; ассимиляция; кристаллизационная дифференциация

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Исследования выполнены в рамках государственного задания Минобрнауки РФ на проведение НИР по теме № 0284-2021-0008 «Геохимия, петрология и рудоносность интрузивных и вулканических щелочных комплексов и месторождений стратегических металлов, их мантийные источники» и проекта РФФИ № 20-05-00261\_а «Петрология и геохимия редкометалльных щелочных гранитов, переходных по минеральным парагенезисам от агапитовых к литий-фтористым (на примере Зашихинского месторождения)».

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Среди разновозрастных месторождений редкометалльного стратегического сырья в пределах складчатого обрамления Сибирского кратона значимая роль принадлежит массивам, связанным с проявлениями щелочно-гранитного магматизма. Одним из них является Зашихинский массив в Иркутской области, вмещающий редкометалльное месторождение с самым высоким содержанием тантала в России [Mashkovtsev et al., 2011]. Полученные на сегодняшний день геологические, минералогические и геохимические данные указывают на широкое участие процессов дифференциации при его образовании. Тем не менее по этому массиву, в отличие от других массивов с Ta-Nb минерализацией, полностью отсутствовала изотопная информация, что не позволяло оценивать состав магматического источника.

В статье впервые приведены Nd изотопные характеристики пород Зашихинского массива, которые в совокупности с результатами проведенных ранее минералогических и геохимических исследований позволяют рассмотреть вопрос о происхождении щелочно-гранитных расплавов, продуцирующих рудные концентрации Nb и Ta.

### 2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Зашихинский (Хайламинский по [Arhangel'skaya, Shuriga, 1997; Kostitsyn, Altukhov, 2004]) редкометалльный щелочно-гранитный массив расположен в центральной части зоны Главного Саянского разлома, на участке

сочленения Бирюсинского выступа Сибирского кратона и Дербинского блока Саяно-Енисейского аккреционного пояса. Массив в плане имеет эллипсовидную, вытянутую в северо-западном направлении форму, с площадью выхода на поверхность около 1.3 км<sup>2</sup> (рис. 1). Взаимоотношения с вмещающими интрузивными породами саянского, хойто-окинского и огнитского комплексов секущие. Возраст пород массива, определенный U-Pb [Arhangel'skaya, Shuriga, 1997] и Rb-Sr [Kostitsyn, Altukhov, 2004] методами, соответствует позднему палеозою (252 и 261±4 млн лет соответственно).

В массиве выделяются три разновидности гранитов [Vladykin et al., 2016] (рис. 1): амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые (тип 1) → кварц-альбит-микроклиновые (тип 2) → кварц-альбитовые и альбититы (тип 3), границы между которыми нечеткие, с постепенными переходами. Породы массива характеризуются порфирированной структурой и массивной текстурой и, в зависимости от типа гранитов, вариациями содержаний как породообразующих минералов (в об. %): кварца (20–45), калиевого полевого шпата (5–25), альбита (25–70), так и аксессуарных, в том числе рудных [Alymova, Vladykin, 2021a]. Для амфиболсодержащих кварц-микроклин-альбитовых гранитов (тип 1) характерны порфировые обособления округлого «гороховидного» кварца (3–7 мм) и длиннопризматические крупные зерна амфибола (до 8–10 мм). Щелочной амфибол в последующих разновидностях гранитов встречается крайне редко. В кварц-альбит-микроклиновых гранитах (тип 2), наряду с крупным округлым кварцем, наблюдаются мелкие зерна в основной



**Рис. 1.** Схема геологического строения и разрез Зашихинского массива (по [Vladykin et al., 2016], с изменениями авторов). 1 – четвертичные отложения; 2 – сланцы, микрогнейсы, амфиболиты бирюсинской свиты (PR<sub>1</sub>br<sub>2</sub>); 3–5 – Зашихинский массив: 3 – кварц-альбитовые граниты и альбититы (тип 3), 4 – кварц-альбит-микроклиновые граниты (тип 2), 5 – амфиболсодержащие кварц-микроклин-альбитовые граниты (тип 1); 6–8 – ранне- и среднепалеозойские интрузивные породы: 6 – граниты, сиениты, граносиениты огнитского комплекса, 7 – диориты хойто-окинского комплекса, 8 – пегматоидные амфиболовые граниты саянского комплекса.

**Fig. 1.** Geological structure and section of the Zashikhinsky massif [Vladykin et al., 2016], modified by the authors. 1 – Quaternary deposits; 2 – shales; microgneisses, amphibolites of the Biryusinsk formation (PR<sub>1</sub>br<sub>2</sub>); 3–5 – Zashikhinsky massif: 3 – quartz-albite granites and albite (type 3), 4 – quartz-albite-microcline granites (type 2), 5 – amphibole-containing quartz-microcline-albite granites (type 1); 6–8 – Early Paleozoic and Middle Paleozoic intrusive rocks: 6 – granites, syenites, granosyenites of the Ognit complex, 7 – diorites of the Khoito-Okinsky complex, 8 – pegmatoid amphibole granites of the Sayan complex.

массе породы. Кварц-альбитовые граниты (тип 3) отличаются высоким содержанием альбита, которое может достигать 70–90 об. %, слагая участки мономинеральных альбититов.

**3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ**

Аналитические исследования проводились с использованием научного оборудования ЦКП «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН.

Содержания петрогенных элементов были определены с помощью рентгенофлуоресцентного силикатного анализа на многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ-25 [Amosova et al., 2015]. Определение концентраций редких и редкоземельных элементов выполнено методом ICP-MS на масс-спектрометре «Element 2» (методика МВИ № 002-ХМС2009). Содержание щелочных элементов определено методом фотометрии пламени на атомно-эмиссионном пламенном

спектрофотометре ДФС-12 (методика СТП ИГХ-009-07). Измерения Sm-Nd изотопной системы пород проводились на многоколлекторном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой NEPTUNE по методике [Yang et al., 2010].

Для получения Sm-Nd изотопных характеристик пород были отобраны валовые пробы с минимальными постмагматическими изменениями. Проба 1 (ЗШХ-704) и проба 2 (ЗШХ-700) отвечают рудным разновидностям пород с наиболее высоким содержанием REE, Nb, Ta и являются кварц-альбитовыми гранитами (табл. 1, тип 3).

#### 4. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ И ND ИЗОТОПНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

По соотношению содержаний  $\text{SiO}_2$  и суммы щелочей породы Зашихинского массива отвечают ряду от щелочных гранитов до умеренно щелочных лейкогранитов ( $\text{SiO}_2$  от 65.83 до 84.28 мас. %,  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$  от 8.17

до 11.59 мас. %). Для всех пород отмечается уменьшение содержания щелочей с увеличением концентрации  $\text{SiO}_2$ . Граниты характеризуются высокой железистостью ( $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})=0.89-0.99$ ). По величине индекса  $\text{A}/\text{NK}$  (0.79–1.10) большая часть пород относится к пересыщенным щелочами гранитам по [Maniar, Piccolli, 1989]. Рассматривая характер распределения в породах редкоземельных элементов, следует отметить существенное обогащение тяжелыми лантаноидами ( $(\text{La}/\text{Yb})_n$  варьируется от 0.1 до 0.9) (рис. 2, а, в) и наличие отрицательной европейской аномалии во всех типах пород. Изученные граниты характеризуются высокими содержаниями большинства несовместимых элементов (Li, Rb, Zr, Hf, Ta, Nb, Th, U, REE) [Vladykin et al., 2016].

Основные геохимические характеристики и минеральный состав пород массива отвечают гранитам А-типа [Whalen et al., 1987; Frost C.D., Frost B.R., 2011], образованным во внутриплитной обстановке, и во многом сопоставимы с щелочными гранитоидами Катугинского

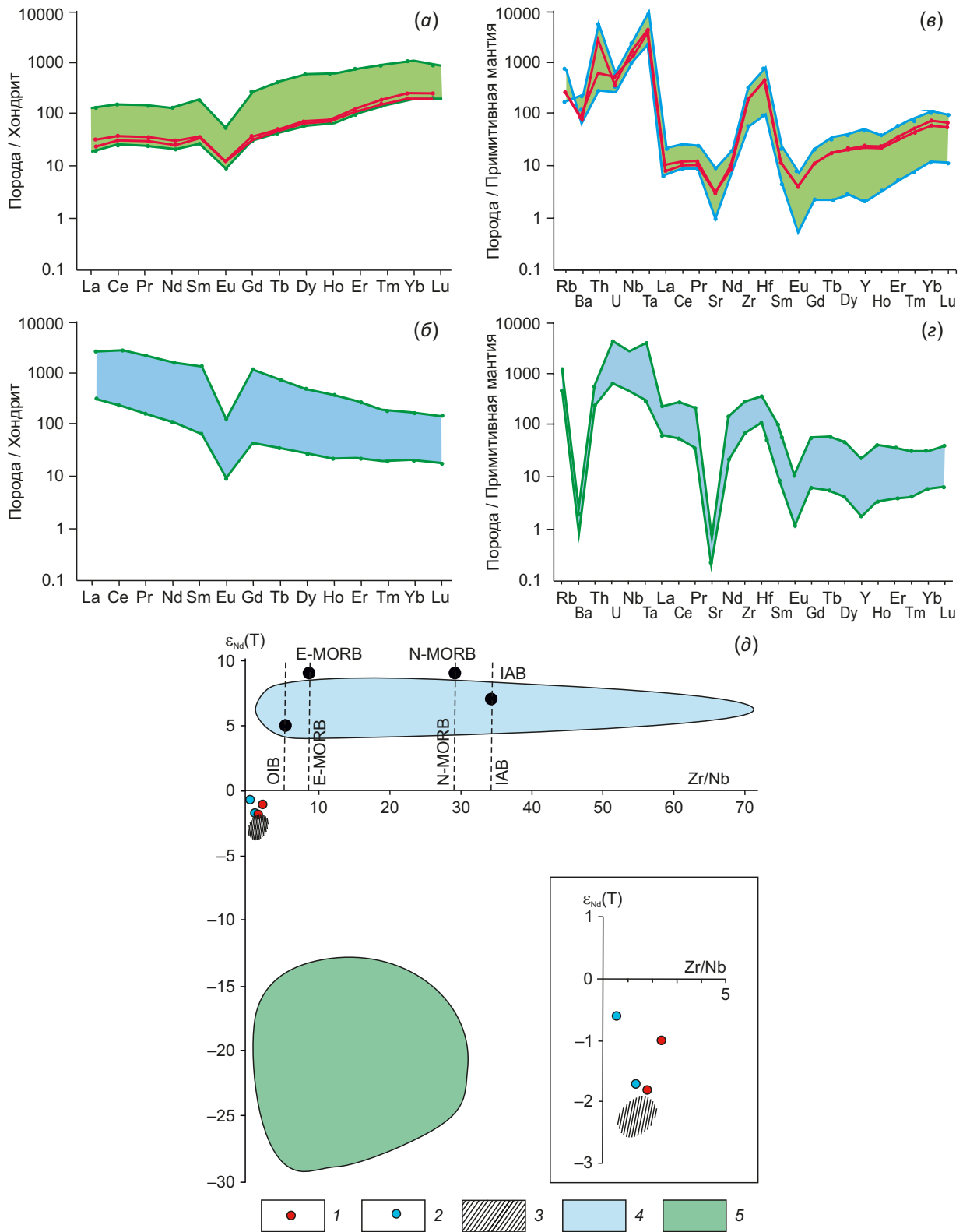
**Таблица 1.** Состав (оксиды в мас. %, редкие элементы в г/т) и Nd изотопные характеристики редкометалльных гранитов Зашихинского массива

**Table 1.** Composition (oxides in wt. %, rare elements in g/t) and Nd isotopic characteristics of rare-metal granites of the Zashikhinsky massif

Проба	ЗШХ-700	ЗШХ-704	Проба	ЗШХ-700	ЗШХ-704
Тип гранита	3	3	Тип гранита	3	3
$\text{SiO}_2$	74.79	76.07	Eu	0.67	0.72
$\text{TiO}_2$	0.04	0.02	Gd	7.55	7.29
$\text{Al}_2\text{O}_3$	14.40	13.72	Tb	1.9	1.87
$\text{Fe}_2\text{O}_3^*$	0.64	0.62	Dy	17.03	18.25
MnO	0.01	0.02	Ho	4.06	4.34
MgO	0.05	0.05	Er	18.06	19.88
CaO	0.40	0.14	Tm	3.97	4.76
$\text{Na}_2\text{O}$	6.56	6.01	Yb	34	43
$\text{K}_2\text{O}$	2.47	2.56	Lu	5.02	6.2
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.02	0.02	Hf	131	165
ппп	0.39	0.60	Ta	202	231
Ba	0.03	0.03	Th	69	318
Sr	0.37	0.37	U	13.66	8.13
Zr	0.32	0.32	Zr/Nb	2.39	1.77
сумма	100.48	100.55	Yb/Ta	0.17	0.18
Rb	212	202	Y/Nb	0.10	0.09
Y	117	127	Nb/U	85.04	177.21
Zr	2776	2549	Th/La	11.42	39.09
Nb	1162	1441	Sm**	4.16	4.83
Ba	602	764	Nd**	14.57	19.63
La	6.06	8.14	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.17384	0.14983
Ce	21	24	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.51255	0.51247
Pr	3.12	3.5	$\pm 2s$	8	7
Nd	12.05	14.74	$\epsilon\text{Nd}(T)$	-1.0	-1.8
Sm	5.49	5.55			

Примечание.  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  представляет общее железо. Sm\*\*, Nd\*\* определены методом изотопного разбавления.

Note.  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  represents total iron. Sm\*\*, Nd\*\* were determined by isotopic dilution.



**Рис. 2.** Редкоэлементный состав гранитов Зашихинского (а, в) и Катугинского (б, г) массивов, нормированный к хондриту и составу примитивной мантии [McDonough, Sun, 1995]. Соотношение изотопного состава Nd и Zr/Nb пород (д).

1 – граниты Зашихинского массива; 2 – граниты Катугинского массива; 3 – область гранитов огнитского комплекса; 4 – область пород Халдзан-Бурегтейского массива [Kovalenko et al., 2009]; 5 – область пород Южно-Сибирского постколлизийного магматического пояса [Donskaya, 2019].

**Fig. 2.** Rare-element composition for granites of the Zashikhinsky (a, e) and Katuginsky (b, g) massifs are normalized to chondrite and primitive mantle composition [McDonough, Sun, 1995]. The ratio between Nd isotopic composition and Zr/Nb of rocks (d).

1 – granite of the Zashikhinsky massif; 2 – granite of the Katuginsky massif; 3 – granite area of the Ognit complex; 4 – rocks of the Halzan-Buregтей massif [Kovalenko et al., 2009]; 5 – rocks of the South-Siberian post-collisional magmatic belt [Donskaya, 2019].

комплекса (рис. 2, б, г). Однако для последних характерно умеренное обогащение легкими лантаноидами ( $(La/Yb)_n$  варьируется от 13 до 24) и наличие резких отрицательных аномалий Ba, Sr, Eu, Y.

Полученные изотопно-геохимические данные щелочных гранитов Зашихинского массива приведены в табл. 1. Породы характеризуются значениями  $\epsilon_{Nd}(T)$   $-1.0$  и  $-1.8$ , которые близки к  $\epsilon_{Nd}(T)$  для гранитов Катугинского массива [Gladkochub et al., 2017] и на диаграмме  $\epsilon_{Nd}(T) - Zr/Nb$  образуют общее поле составов (рис. 2, д).

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

**Качественная оценка возможных магматических источников.** Существуют многочисленные модели образования щелочно-гранитных массивов с описанием вероятных источников родоначальных магм и механизмов их эволюции [Kovalenko et al., 2009; Gladkochub et al., 2017; Larin et al., 2015; Yarmolyuk et al., 2016; и др.]. Различие в составе исходных гранитоидных магм связано с рядом факторов, в том числе с разной степенью вклада мантийного и корового компонента. Примером значительной доли мантийного вещества при формировании гранитов является Халдзан-Бурегтейский массив (Монголия), в породах которого вариации  $\epsilon_{Nd}(T)$  составляют  $+4.4...+6.5$  (рис. 2, д). Образование щелочных пород этого массива, характеризующихся разнообразием – от собственно щелочных и редкометалльных гранитов через нордмаркиты, сиениты, пантеллериты до щелочных базитов, обусловлено глубокой кристаллизационной дифференциацией базитовой магмы [Kovalenko et al., 2009]. В отличие от Халдзан-Бурегтейского массива, в строении Зашихинского массива не обнаружены базитовые тела, состав которых можно было принять за состав первичных мантийных магм, поэтому можно допустить преобладание корового вещества в источнике магнеобразования. Это подтверждается Nd изотопными данными. Величины  $\epsilon_{Nd}(T)$ , рассчитанные на возраст 252 млн лет, для двух проб составляют  $-1.0$  и  $-1.8$ . Вариации значений  $\epsilon_{Nd}(T)$  незначительны, что свидетельствует об однородности изотопного состава источника. Имеющиеся Nd данные для геологических комплексов, вмещающих Зашихинский массив, указывают на то, что вероятными коровыми компонентами могут быть как среднепалеозойские гранитоиды огнитского комплекса с низкими значениями  $\epsilon_{Nd}$  (от  $-2.0$  до  $-2.3$  [Lykhin, Vorontsov, 2012]), так и докембрийские гранитоидные образования фундамента Сибирского кратона с отрицательными значениями  $\epsilon_{Nd}$  [Donskaya, 2019]. Для них величины  $\epsilon_{Nd}$  пересчитанные на возраст формирования гранитоидов Зашихинского массива, укладываются в диапазон от  $-14.1$  до  $-27.1$ . Зашихинские граниты близки по изотопному составу неодама к щелочным редкометалльным гранитам катугинского комплекса с Nb-Ta минерализацией, для которых в качестве корового компонента, участвующего в магнеобразовании, рассматриваются архейские породы континентальной коры

Чара-Олёмминского геоблока Алданского щита [Larin et al., 2015].

**Роль кристаллизационной дифференциации.** Увеличение содержания элементов с низкими коэффициентами распределения (меньше 1) от амфиболсодержащих гранитов к кварц-альбитовым и альбититам является признаком кристаллизационной дифференциации при формировании пород Зашихинского массива [Alymova, Vladykin, 2021b; Yarmolyuk et al., 2016].

Для выявления природы исходных магм и механизмов формирования щелочно-гранитных массивов были предложены канонические отношения содержания несовместимых элементов [Kovalenko et al., 2009]. Так, например, постоянство величин  $Zr/Nb$ ,  $Yb/Ta$ ,  $Y/Nb$ ,  $Nb/U$ ,  $Th/La$  в разных типах ассоциирующих друг с другом пород указывает на общий для них магматический источник. Изменение этих отношений может свидетельствовать либо о добавлении в область магнеобразования новых порций расплавов с другими соотношениями элементов, либо о появлении минеральных фаз, которые избирательно концентрируют редкие элементы. В случае пород Зашихинского массива, как и Катугинского, на графике в координатах  $\epsilon_{Nd} - Zr/Nb$  фигуративные точки составов смещены в сторону низких значений  $Zr/Nb$  и отклоняются от предполагаемой линии смещения, связывающей составы мантийных источников типа OIB с коровыми источниками, представленными составом огнитских гранитов (или бугульминского комплекса [Vorontsov, 1968]) и гранитно-метаморфических комплексов Сибирского кратона. Такое смещение согласуется с появлением минералов-концентраторов ниобия в остаточных расплавах и подтверждает сделанные ранее выводы о кристаллизационной дифференциации.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Редкометалльные породы Зашихинского массива являются продуктами последовательной кристаллизационной дифференциации щелочно-гранитных магм, сформированных при участии мантийных расплавов с одновременной ассимиляцией корового вещества. Коровым источником могли служить граниты огнитского (или бугульминского) комплекса и гранитно-метаморфические комплексы пород фундамента Сибирского кратона.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

В работе использован каменный материал из коллекции, созданной за долгие годы Н.В. Владыкиным. Авторы посвящают эту работу его светлой памяти.

## 8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 9. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Alymova N.V., Vladykin N.V., 2021a. Features of the Composition of Ore-Forming Minerals in Rare-Metal Alkaline Granites of the Zashikhinsky Massif. *Proceedings of the Russian Mineralogical Society* 150 (1), 76–91 (in Russian) [Алымова Н.В., Владыкин Н.В. Особенности состава рудообразующих минералов в редкометалльных щелочных гранитах Зашихинского массива // Записки российского минералогического общества. 2021. Т. 150. № 1. С. 76–91]. <https://doi.org/10.31857/S0869605521010020>.

Alymova N.V., Vladykin N.V., 2021b. Geochemistry, Mineralogy and Ore Content of Alkaline Granite Magmatism of East Sayan Zone (On the Example of Zashikhinsky Deposit). In: N.V. Vladykin (Ed.), *Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis*. Springer, Cham, p. 63–80. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69670-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69670-2_4).

Amosova A.A., Panteeva S.V., Tatarinov V.V., Chubarov V.M., Finkel'shtein A.L., 2015. X-Ray Fluorescence Determination of Major Rock Forming Elements in Small Samples 50 and 110 mg. *Analytics and Control* 19 (2), 130–138 (in Russian) [Амосова А.А., Пантеева С.В., Татаринов В.В., Чубаров В.М., Финкельштейн А.Л. Рентгенофлуоресцентное определение основных породообразующих элементов из образцов массой 50 и 110 мг // Аналитика и контроль. 2015. Т. 19. № 2. С. 130–138]. <http://dx.doi.org/10.15826/analitika.2015.19.2.009>.

Arhangel'skaya V.V., Shuriga T.N., 1997. Geological Features, Zoning, and Mineralization of the Zashikhinsky Tantalum-Niobium Deposit. *National Geology* 5, 7–10 (in Russian) [Архангельская В.В., Шурига Т.Н. Геологическое строение, зональность и оруденение Зашихинского тантал-ниобиевого месторождения // Отечественная геология. 1997. № 5. С. 7–10].

Donskaya T.V., 2019. Early Proterozoic Granitoid Magmatism of the Siberian Craton. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 410 p. (in Russian) [Донская Т.В. Раннепротерозойский гранитоидный магматизм Сибирского кратона: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск, 2019. 410 с.].

Frost C.D., Frost B.R., 2011. On Ferroan (A-Type) Granitoids: Their Compositional Variability and Modes of Origin. *Journal of Petrology* 52 (1), 39–55. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq070>.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Sklyarova E.V., Kotov A.B., Vladykin N.V., Pisarevsky S.A., Larin A.M., Salnikova E.B. et al., 2017. The Unique Katugin Rare-Metal Deposit (Southern Siberia): Constraints on Age and Genesis. *Ore Geology Reviews* 91, 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.10.002>.

Kostitsyn Yu.A., Altukhov E.N., 2004. The Khailama and Ayskan Massifs of Alkali Granitoids, Eastern Sayan: Age and

Formation Conditions by Rb-Sr Isotopic and Geochemical Data. *Geochemistry International* 42 (3), 195–204.

Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Kovach V.P., Kovalenko D.V., Kozlovskii A.M., Andreeva I.A., Kotov A.B., Salnikova E.B., 2009. Variations in the Nd Isotopic Ratios and Canonical Ratios of Concentrations of Incompatible Elements as an Indication of Mixing Sources of Alkali Granitoids and Basites in the Khaldzan-Buregtei Massif and the Khaldzan-Buregtei Rare-Metal Deposit in Western Mongolia. *Petrology* 17, 227–252. <https://doi.org/10.1134/S0869591109030035>.

Larin A.M., Kotov A.B., Vladykin N.V., Gladkochub D.P., Kovach V.P., Sklyarov E.V., Donskaya T.V., Velikoslavinsky S.D., Zagornaya N.Yu., Sotnikova I.A., 2015. Rare Metal Granites of the Katugin Complex (Aldan Shield): Sources and Geodynamic Formation Settings. *Doklady Earth Sciences* 464, 889–893. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15090056>.

Lykhin D.A., Vorontsov A.A., 2012. New Isotopic Sr-Nd Characteristics of Igneous Rocks and Ores of the Snowy Beryllium Deposit. In: *Geochronometric Isotope Systems, Methods of Their Study, Chronology of Geological Processes*. Proceedings of the V Russian Conference on Isotope Geochronology (June 4–6, 2012). IGEM RAS, Moscow, p. 230–232 (in Russian) [Лыхин Д.А., Воронцов А.А. Новые изотопные Sr-Nd характеристики магматических пород и руд Снежного бериллиевого месторождения // Геохронометрические изотопные системы, методы их изучения, хронология геологических процессов: Материалы V Российской конференции по изотопной геохронологии (4–6 июня 2012 г.). Москва: ИГЕМ РАН, 2012. С. 230–232].

Maniar P.D., Piccoli P.M., 1989. Tectonic Discriminations of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin* 101 (5), 635–643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101%3C0635:TDOG%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101%3C0635:TDOG%3E2.3.CO;2).

Mashkovtsev G.A., Bykhovsky L.Z., Rogozhin A.A., Temnov A.V., 2011. Prospects for the Rational Development of Complex Tantalum-Niobium-Ree Ore Deposits of Russia. *Prospect and Protection of Mineral Resources* 6, 9–13 (in Russian) [Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Рогожин А.А., Темнов А.В. Перспективы рационального освоения комплексных ниобий-тантал-редкоземельных месторождений России // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 9–13].

McDonough W.F., Sun S.-S., 1995. The Composition of the Earth. *Chemical Geology* 120 (3–4), 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).

Vladykin N.V., Alymova N.V., Perfil'ev V.V., 2016. Geochemical Features of Rare-Metal Granites of the Zashikhinsky Massif, East Sayan. *Petrology* 24, 554–568. <https://doi.org/10.1134/S0869591116050052>.

Vorontsov A.E., 1968. Petrology and Geochemistry of the Lower Paleozoic Granitoids of the Bugulma Intrusive Complex (Eastern Sayan). PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Irkutsk, 295 p. (in Russian) [Воронцов А.Е. Петрология и геохимия нижнепалеозойских гранитоидов бугульминского интрузивного комплекса

(Восточный Саян): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 1968. 295 с.].

Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 95, 407–419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>.

Yang Y.-H., Chu Zh. Y., Wu F.-Y., Xia L.-W., Yang J.-H., 2010. Precise and Accurate Determination of Sm, Nd Concentrations and Nd Isotopic Compositions in Geological Samples

by MC-ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 26, 1237–1244. <https://doi.org/10.1039/C1JA00001B>.

Yarmolyuk V.V., Lykhin D.A., Kozlovsky A.M., Nikiforov A.V., Travin A.V., 2016. Composition, Sources, and Mechanisms of Origin of Rare-Metal Granitoids in the Late Paleozoic Eastern Sayan Zone of Alkaline Magmatism: A Case Study of the Ulan Tolgoi Massif. *Petrology* 24, 477–496. <https://doi.org/10.1134/S0869591116050076>.