

УДК [553.98.041: 550.834.52.05]:(235.223)

ИЗОТОПНЫЕ СИСТЕМЫ U–Pb И Lu–Hf В ЦИРКОНЕ И Sm–Nd В ПОРОДАХ РУДОНОСНОГО ДЮМТАЛЕЙСКОГО ИНТРУЗИВА (ТАЙМЫР, РОССИЯ): НОВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА О РОЛИ ДЕПЛЕТИРОВАННОЙ МАНТИИ В ЕГО ОБРАЗОВАНИИ

© 2020 г. К. Н. Малич^{1,*}, Д. К. Лохов², В. Ф. Проскурнин²,
член-корреспондент РАН В. Н. Пучков^{1,**}, И. Ю. Баданина¹, М. А. Червяковская¹

Поступило 29.06.2019 г.

После доработки 18.02.2020 г.

Принято к публикации 20.02.2020 г.

С помощью SHRIMP-, MC–LA–ICP–MS- и TIMS-методов анализа впервые изучены соответственно U–Pb-возраст, изотопный состав гафния циркона и изотопный состав неодима пород Дюмталейского интрузива, являющегося одним из наиболее перспективных объектов на платиноидно-медно-никелевые руды в пределах Таймырской металлогенической провинции. U–Pb-система зерен циркона из монодиорита и габбро Дюмталейского интрузива показала значение возраста от 250.9 ± 3.1 до 253 ± 1 млн лет, что согласуется с временной близостью к пермо-триасовому рубежу и синхронностью с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы. Выявленные изотопные Hf–Nd-параметры ($\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ 6.9–8.5, $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ 2.9–4.2) свидетельствуют о значительной роли вещества деплетированной мантии при магмогенерации Дюмталейского интрузива.

Ключевые слова: циркон, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возраст, Lu–Hf- и Sm–Nd-изотопные системы, деплетированная мантия, Дюмталейский интрузив, Таймыр, толеит-базальтовый магматизм

DOI: 10.31857/S2686739720050114

Таймырская металлогеническая провинция является одной из наиболее перспективных для поиска сульфидных платиноидно-медно-никелевых месторождений Полярной Сибири. В пределах Западного Таймыра платиноидно-медно-никелевые руды связаны с различными по вещественному составу Бинюдинским и Дюмталейским интрузивами, выявленными в соответственно Бинюдинско-Тарейском и Луктахском рудных районах [1]. Предпосылки выявления богатых сульфидных платиноидно-медно-никелевых руд для Дюмталейского интрузива обосновываются сходством их S–Cu-изотопных характеристик с вкрапленными и массивными сульфидными рудами промышленно-рудноносного Талнахского интрузива Норильской провинции [2]. При этом по данным Sm–Nd- и Rb–Sr-изотопных систем, силикатное

вещество Дюмталейского интрузива характеризуется наиболее деплетированным компонентом (ϵNd 4.2; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.70474 [2]) по сравнению с таковым из различно рудоносных ультрамафит-мафитовых интрузивов Полярной Сибири.

Участие деплетированного мантийного субстрата в формировании магматических образований Полярной Арктики было установлено только в пикритах гудчихинской свиты Норильской провинции и меймечитах Маймеча-Котуйской провинции [$\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ от +3.7 до +4.9 [3]], а также базальтах острова Жохова в Восточно-Сибирском море ($\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ от +9.5 до +12.6 [4]). Для подтверждения гипотезы участия вещества деплетированной мантии при образовании рудоносных магм и их временной сопряженности с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы нами на примере различных пород Дюмталейского интрузива, рудоносность которых различна, привлечены принципиально новые данные по Lu–Hf-изотопии циркона (24 анализа) в совокупности с их $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрастом, а также Sm–Nd-изотопными параметрами.

Дюмталейский интрузив расположен в среднем течении р. Верхняя Таймыра на пересечении Южно-Таймырского и Тарейско-Котуйского ре-

¹ Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: dunita@yandex.ru

**E-mail: puchkv@ufaras.ru

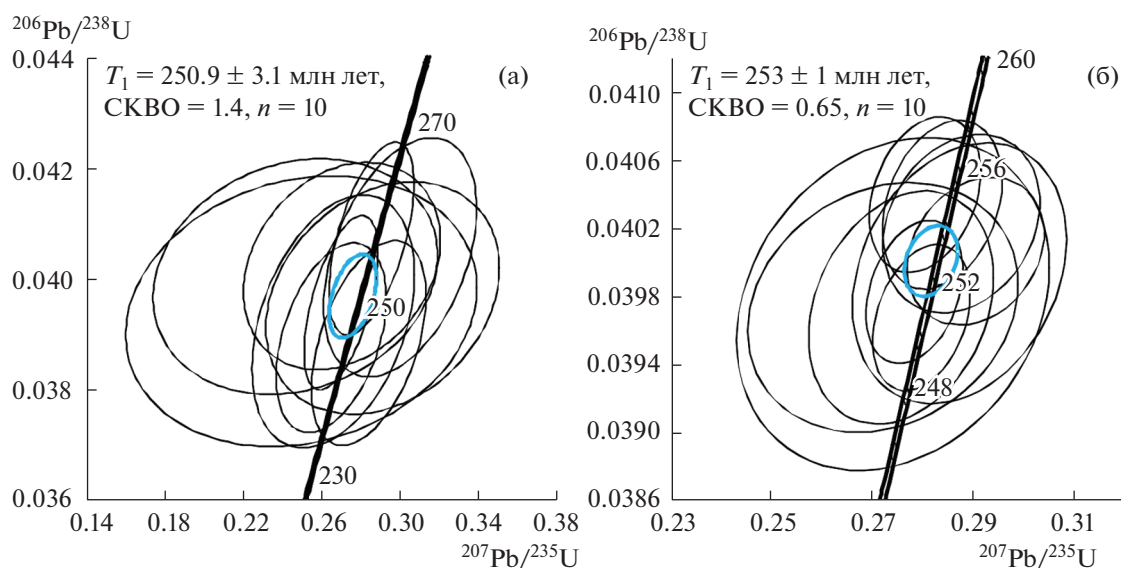


Рис. 1. Диаграммы с конкордией для исследованных зерен циркона из монцодиорита (а) и габбро (б) Дюмталейского интрузива в координатах $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ – $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. Эллипсы – погрешности каждого анализа на уровне 1σ . Погрешности вычисленных значений возраста – 2σ .

гиональных разломов среди вулканогенных и терригенно-угленосных образований (P_2 – T_1). Интрузив прослежен по простиранию на 54 км при ширине ~ 4 км и мощности 598.0–644.0 м серией поисковых и структурно-поисковых скважин и состоит из нескольких зон (сверху вниз): сиенит-диоритовой, феррогаббровой и троктолит-перидотитовой [1]. К средней зоне приурочены титаномagnetитовые (с ванадием) руды, к нижней зоне тяготеют сульфидные медно-никелевые (с платиноидами) руды пентландит-халькопирит-пирротинового состава. Вертикальная зональность массива соответствует характеристикам расслоенного интрузива. Изученные зерна циркона были выделены из образцов монцодиорита (обр. ТП-43-381) и порфиривого габбро (обр. ТП-43-566.4), типичных соответственно для верхней и средней части Дюмталейского интрузива.

Зерна циркона из пород интрузива были выделены в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) с применением изодинамического магнитного сепаратора и тяжелых жидкостей. Датирование циркона было выполнено с помощью вторично-ионного масс-спектрометра SHRIMP-II в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ по общепринятой методике [5, 6]. Определение Lu–Hf-изотопного состава для предварительно продатированных зерен циркона было проведено в ЦКП “Геоаналитик” Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург). Lu–Hf-изотопные анализы выполнены при помощи приставки для лазерной абляции (ESI NWR 213) и мультиколлекторного масс-спектрометра Neptune Plus фирмы “Thermo Scientific” по мето-

дике, охарактеризованной в работах [7, 8]. Конфигурация коллекторов позволяла одновременно регистрировать изотопы ^{172}Yb , ^{174}Yb , ^{175}Lu , ^{176}Hf , ^{177}Hf , ^{178}Hf , ^{179}Hf . Изобарное наложение сигнала изотопа ^{176}Lu на ^{176}Hf корректировалось измерением интенсивности свободного от наложения сигнала изотопа ^{175}Lu и использования рекомендованного значения $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02669$ [9] при вычислении значения $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$. Изобарное наложение ^{176}Yb на ^{176}Hf учитывалось путем измерения сигнала изотопа ^{172}Yb и использования значения $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}$ при вычислении $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$. При анализе зерен циркона длительность работы лазера составляла 50 с при диаметре лазерного пучка 50 мкм, плотности энергии лазерного излучения ~ 13 Дж/см³ и частоте повторения импульсов 20 Гц. Цирконовый стандарт GJ-1 использовался для независимого контроля стабильной работы прибора и воспроизводимости полученных результатов. В течение измерительной сессии среднее значение $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ для стандарта GJ-1 составило 0.282026 ± 0.000015 ($n = 8$), что находится в пределах рекомендованного интервала ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282022 \pm 0.000092$ (2σ), $n = 50$) [10]. Анализ Sm–Nd-системы пород Дюмталейского интрузива осуществлялся с применением метода изотопного разбавления для определения концентраций неодима и самария и термоионизационной масс-спектрометрии (масс-спектрометр “Triton T1”, ЦИИ ВСЕГЕИ) по методике, охарактеризованной в работе [6].

Изученные зерна циркона представлены идиоформными и субидиоморфными прозрачными и

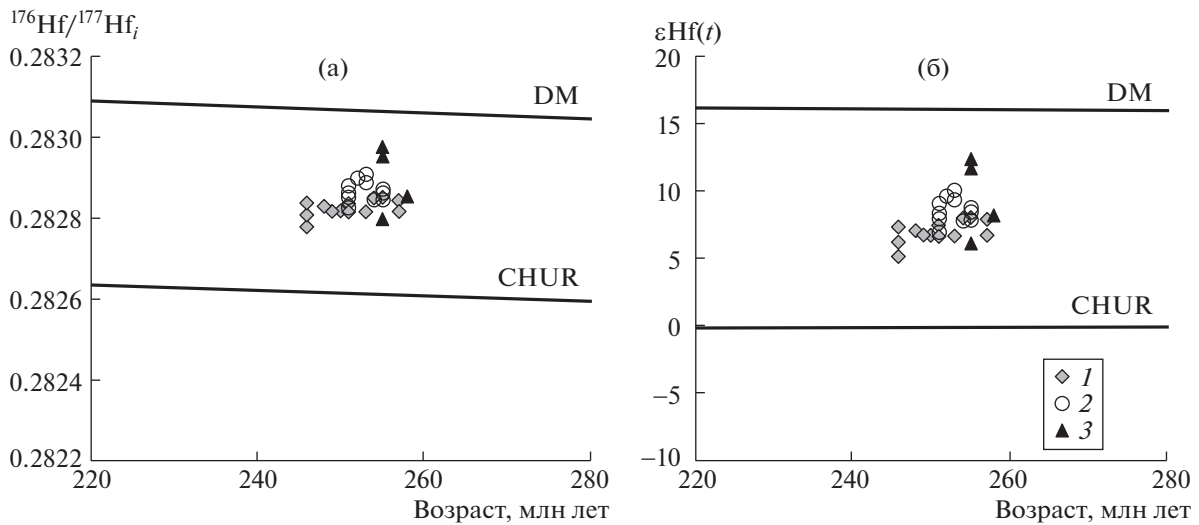


Рис. 2. Бинарные зависимости: (а) начального значения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ от возраста и (б) $\varepsilon\text{Hf}(t)$ от возраста для цирконов Дюмталейского интрузива. 1 – монцодиорит, 2 – габбро, 3 – троктолитовое феррогаббро по [11]. Для сравнения приведены линии изотопной эволюции деплетированной мантии (DM) и хондритового однородного резервуара (CHUR).

полупрозрачными, иногда трещиноватыми кристаллами призматического габитуса, окрашенными в бледно-бежевые тона; коэффициент удлинения варьирует от 1:1 до 2:1. Зерна в наибольшем сечении не превышают 160 микрон и характеризуются в катодолюминесценции блоковым или слабо выраженным секториальным строением, вплоть до полного отсутствия зональности. Проанализированные зерна циркона из монцодиорита (обр. ТП-43-381) и габбро (обр. ТП-43-566.4) обладают сходными значениями $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возраста: $T_1 = 250.9 \pm 3.1$ млн лет

(СКВО = 1.4, $n = 10$) и $T_2 = 253 \pm 1$ млн лет (СКВО = 0.65, $n = 10$) соответственно (рис. 1). Выявленные $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -значения возраста вместе с $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрастом циркона из троктолитового феррогаббро в нижней части Дюмталейского интрузива (256.4 ± 2.4 млн лет [11]) свидетельствуют об их временной близости к пермо-триасовому рубежу и синхронности с толеит-базальтовым магматизмом Сибирской платформы (248.7 ± 0.6 – 250.3 ± 1.1 млн лет [12]).

Зерна циркона из монцодиорита (обр. ТП-43-381) и габбро (обр. ТП-43-566.4) Дюмталейского

Таблица 1. Представительные U–Pb- и Lu–Hf-изотопные данные для циркона Дюмталейского интрузива

№ анализа	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возраст, млн лет	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	Hfi*	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	T_{DM} , млн лет
Монцодиорит, обр. ТП-43-381								
2292-1	248	0.28283	0.00002	0.00060	0.0156	0.28283	7.0	592
2292-2	246	0.28278	0.00002	0.00122	0.0342	0.28278	5.2	670
2292-3	257	0.28282	0.00002	0.00040	0.0100	0.28281	6.7	610
2292-6	246	0.28284	0.00003	0.00077	0.0214	0.28283	7.2	583
2292-8	254	0.28285	0.00002	0.00099	0.0274	0.28285	7.9	565
Габбро, обр. ТП-43-566.4								
2286-2	253	0.28289	0.00003	0.00057	0.0143	0.28289	9.3	506
2286-4	251	0.28283	0.00003	0.00232	0.0598	0.28282	6.9	614
2286-6	253	0.28292	0.00003	0.00215	0.0550	0.28291	10.0	489
2286-7	255	0.28287	0.00004	0.00060	0.0151	0.28287	8.7	532
2286-9	251	0.28286	0.00002	0.00081	0.0196	0.28285	7.9	560

Примечание. *Hfi = $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$, начальный изотопный состав гафния вычислен с использованием $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ отношения и константы распада $^{176}\text{Lu} = 1.865 \times 10^{-11} \text{ г}^{-1}$ [13]. $\varepsilon\text{Hf}(t)$ – отклонение начального отношения $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$ между цирконом и хондритовым однородным резервуаром (CHUR), умноженное на 10^4 . T_{DM} – модельный Hf-возраст.

Таблица 2. Sm–Nd-изотопные данные для пород Дюмталейского интрузива

№ образца	Название породы	Sm, г/г	Nd, г/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	T_{DM} , млн лет
ТП-43-381	Монцодиорит	8.219	35.65	0.1394	0.512691 ± 9	4.2	945
ТП-43-566.4	Габбро	6.199	25.38	0.1477	0.512769 ± 9	2.9	884

Примечание. $\epsilon\text{Nd}(t)$ – отклонение начального отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ между породой и хондритовым однородным резервуаром (CHUR), умноженное на 10^4 . T_{DM} – модельный Nd-возраст.

интрузива обладают повышенным значением начального изотопного состава гафния ($\epsilon\text{Hf}(t)$ варьирует от 5.2 ± 0.7 до 8.0 ± 0.6 и от 6.9 ± 1.0 до 10.0 ± 1.1 соответственно, табл. 1, рис. 2). Средний изотопный состав гафния $\epsilon\text{Hf}(t)$ для циркона обоих образцов перекрывается в пределах погрешности (6.9 ± 0.8 , $n = 13$ и 8.5 ± 0.9 , $n = 11$ соответственно), что также согласуется со средним значением Hf-изотопного состава циркона из троктолитового феррогаббро в нижней части Дюмталейского интрузива ($\epsilon\text{Hf}(t) = 9.5 \pm 2.5$ [11]; рис. 2). По данным Sm–Nd-изотопной систематики, породы Дюмталейского интрузива характеризуются сходными значениями $\epsilon\text{Nd}(t)$ (от 2.9 до 4.2, табл. 2), что соответствует ранее выявленным вариациям $\epsilon\text{Nd}(t)$ для различно рудоносных пород Дюмталейского интрузива ($\epsilon\text{Nd}(t)$ от 2.7 до 4.7 [11]). Характерно, что Hf-изотопные характеристики цирконов и Nd-изотопные параметры пород находятся близко или в поле составов (рис. 3), соответствующих значениям “мантийной последова-

тельности” (mantle array в понимании Д. Вервурта и др. [14]). Подобное соответствие изотопных параметров указывает на магматическое происхождение цирконов [15]. Монцодиорит, габбро и троктолитовое феррогаббро обладают несколько повышенными значениями изотопного состава гафния и неодима, что свидетельствует об участии вещества деплетированной мантии в первичных расплавах Дюмталейского интрузива.

Таким образом, результаты Hf–Nd-изотопной систематики позволили на новом фактическом материале охарактеризовать вещественный источник породных ассоциаций рудоносного Дюмталейского интрузива. Изотопные параметры гафния и неодима ($\epsilon\text{Hf}(t)$ 6.9–8.5, $\epsilon\text{Nd}(t)$ 2.9–4.2) свидетельствуют о значительной роли вещества деплетированной мантии в магмогенерации Дюмталейского интрузива.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны рецензентам и главному редактору акад. Н.С. Бортникову за конструктивные замечания, способствовавшие улучшению рукописи.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН (№ АААА–А18–118052590026–5) при финансовой поддержке Роснедра (гос. контракт № АМ–02–34/14 от 10.06.2013 г.) и РФФИ (гранты № 18–05–70073 и 17–05–00618).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов А.П., Курбатов И.И., Малич К.Н., Сниссар С.Г., Бородин Е.В., Ерыкалов С.П., Кокорин Н.И. // Платина России. Сб. научных трудов. Красноярск: Типография “Знак”. 2011. Т. 7. С. 135–160.
2. Петров О.В., Малич К.Н., Туганова Е.В., Пушкирев Ю.Д., Баданина И.Ю., Крымский Р.Ш., Капитонов И.Н., Туганова С.М., Бочаров С.Н., Богомолов Е.С., Прасолов Э.М., Халенев В.О., Лохов К.И., Матуков Д.И., Дистлер В.В., Служеникин С.Ф., Кнауф В.В., Белоусова Е.А., Гриффин В.Л., Романов А.П. // Известия ВСЕГЕИ. 2008 год. Т. 8 (56). СПб.: Изд. ВСЕГЕИ, 2009. С. 248–262.

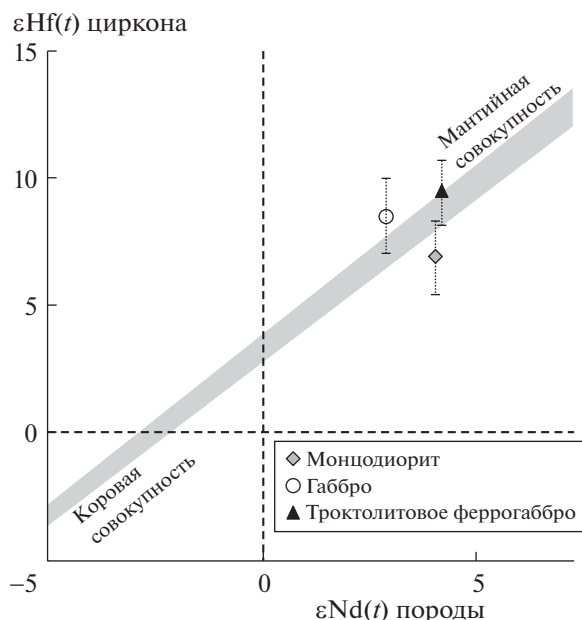


Рис. 3. Диаграмма $\epsilon\text{Hf}(t)$ – $\epsilon\text{Nd}(t)$ для различно рудоносных пород Дюмталейского интрузива. * – данные по [11]. Поля составов для мантейной и коровой совокупности пород (mantle-crustal array) по [14].

3. *Horan M.F., Walker R.J., Fedorenko V.A., Czamanske G.K.* // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59. P. 5159–5168.
4. *Akinin V.V., Gottlieb E.S., Miller E.L., Polzunenkov G.O., Stolbov N.M., Sobolev N.N.* // *Arktos*. 2015. V. 1. P. 9. <https://doi.org/10.1007/s41063-015-0016-6>
5. *Williams I.S.* U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe // *Reviews in Economic Geology*. 1998. V. 7. P. 1–35.
6. *Malitch K.N., Belousova E.A., Griffin W.L., Badanina I.Yu., Pearson N.J., Presnyakov S.L., Tuganova E.V.* // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2010. V. 159. № 6. P. 753–768. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0452-z>
7. *Griffin W.L., Wang X., Jackson S.E., Pearson N.J., O'Reilly S.Y., Xu X., Zhou X.* // *Lithos*. 2002. V. 61. P. 237–269. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00082-8)
8. *Зайцева М.В., Вотяков С.Л.* // *Труды ИГГ УрО РАН*. 2017. № 164. С. 284–289.
9. *DeBievre P., Taylor P.D.P.* Table of the Isotopic Composition of the Elements // *International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes*. 1993. V. 123. P. 149.
10. *Elhlou S., Belousova E., Griffin W.L., Pearson N.J., O'Reilly S.Y.* // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 70. V. 18S. A158. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.06.1383>
11. *Малич К.Н., Баданина И.Ю., Романов А.П., Служеникин С.Ф.* // *Литосфера*. 2016. Т. 16. № 1. С. 107–128.
12. *Reichow M.K., Pringle M.S., Al'mukhamedov A.I., Allen M.B., Andreichev V.L., Buslov M.M., Davies C.E., Fedoseev G.S., Fitton J.G., Inger S., Medvedev A.Ya., Mitchell C., Puchkov V.N., Safonova I.Yu., Scott R.A., Saunders A.D.* // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. V. 277. P. 9–20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.030>
13. *Sherer E., Munker C., Mezger K.* // *Science*. 1996. V. 293. P. 683–687. <https://doi.org/10.1126/science.1061372>
14. *Vervoort J.D., Patchett P.J., Blichert-Toft J., Albarede F.* // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. V. 168. P. 79–99. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00047-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00047-3)
15. *Лохов К.И., Салтыкова Т.Е., Капитонов И.Н., Богомолов Е.С., Сергеев С.А., Шевченко С.С.* // *Региональная геология и металлогения*. 2009. № 38. С. 62–72.

U-Pb AND Lu–Hf ISOTOPE SYSTEMATICS OF ZIRCON AND Sm–Nd ISOTOPE SYSTEMATICS IN ROCKS OF THE DYUMTALEY ORE-BEARING INTRUSION (TAIMYR, RUSSIA): NEW EVIDENCE FOR THE ROLE OF THE DEPLETED MANTLE IN ITS GENESIS

K. N. Malitch^{a,#}, D. K. Lokhov^b, V. F. Proskurnin^b, Corresponding Member of the RAS V. N. Puchkov^{a,##}, I. Yu. Badanina^a, and M. A. Chervyakovskaya^a

^a *Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation*

^b *Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russian Federation*

[#] *E-mail: dunita@yandex.ru*

^{##} *E-mail: puchkv@ufaras.ru*

This study utilized SHRIMP, LA MC-ICP-MS and ID-TIMS analytical techniques and presents for the first time U–Pb age, Lu–Hf-isotope features of zircon and the Nd-isotope composition of variously mineralized rocks from the ore-bearing Dyumtalei intrusion, one of the most promising targets for platinum-group element (PGE)-Cu–Ni ores within the Taimyr metallogenic province. ²⁰⁶Pb/²³⁸U ages of zircon from rock lithologies of the Dyumtalei intrusion indicate their close temporal relationship to a Permo-Triassic boundary and synchronism with a tholeiitic-basalt magmatism of the Siberian platform. Hafnium-neodymium isotope signatures ($\epsilon\text{Hf}_{(t)}$ 6.9–8.5, $\epsilon\text{Nd}_{(t)}$ 2.9–4.2) imply the significant role of the depleted mantle material in magma generation of the Dyumtalei intrusion.

Keywords: zircon, ²⁰⁶Pb/²³⁸U age, Lu–Hf and Sm–Nd isotope systems, depleted mantle, Dyumtalei intrusion, Taimyr, tholeiitic-basalt magmatism