

ИСТОЧНИКИ РУДНОЙ REE-Nb МИНЕРАЛИЗАЦИИ БУЛДЫМСКОГО КАРБОНАТИТ-УЛЬТРАБАЗИТОВОГО КОМПЛЕКСА (Rb-Sr И Sm-Nd ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ)

© 2017 г. И. Л. Недосекова, Д. В. Елизаров*, Е. Л. Кунаккузин*

Карбонатиты с редкометалльно-редкоземельной минерализацией в Булдымском массиве гипербазитов, залегающем в докембрийских породах вишневогорской свиты, в кровле Вишневогорского миаскитового интрузива, впервые описаны Н.В. Свяжиным [1966]. Позднее карбонатиты с промышленным пирохлоровым оруденением установлены В.Я. Левиным в Булдымском, Халдихинском, Спирихинском гипербазитовых массивах, залегающих в обрамлении миаскитовых интрузий Ильмено-Вишневогорского миаскит-карбонатитового комплекса [Левин, 1983; Левин и др., 1997]. В 80-х гг. XX в. разведаны Булдымское, Спирихинское и Халдихинское REE-Nb-месторождения [Левин и др., 1997; Золоев и др., 2004], а также открыто Ильменское рудопроявление ниобия и редких земель, связанные с карбонатитами в массивах ультрабазитов [Поляков, Недосекова, 1990].

Наиболее изученное среди них Булдымское месторождение связано с карбонатитами и сопровождающими их апогипербазитовыми карбонат-флогопит-рихтеритовыми метасоматитами, которые формируют линейные тела мощностью до 50 м и протяженностью в сотни метров в Булдымском ультрабазитовом массиве. В пределах месторождения выделено несколько рудных зон со средним содержанием 0.164% Nb₂O₅ [Золоев и др., 2004]. Ранние карбонатиты доломит-кальцитового состава (сёвиты) – массивные, крупнозернистые – содержат тетраферрифлогопит, рихтерит и рудные акцессорные пирохлор, циркон, магнетит, ильменит, пирротин, пирит. Поздние доломитовые карбонатиты (бефорситы) образуют менее мощные жилы и содержат редкоземельную акцессорную минерализацию – монацит, эшинит, редкоземельный пирохлор, ферсмит, а также флогопит (замещаемый хлоритом), винчит, апатит, магнетит, ильменит, циркон, иногда стронцианит.

Рудная ниобиевая минерализация месторождений булдымского карбонатит-ультрабазитового комплекса представлена собственно пирохлором, U-пирохлором (гатчеттолитом), Ti-пирохлором (бе-тафитом) и REE-содержащими разновидностями пирохлоров [Левин и др., 1997; Недосекова, При-

бавкин, 2015]. Кроме того, в значительных количествах присутствуют колумбит, эшинит, монацит, хроммагнезиочевкинит [Поляков, Недосекова, 1990; Лебедева, Недосекова, 1993; Левин и др., 1997; Недосекова, 2007]. Рудные концентрации пирохлора установлены в кальцит-доломитовых карбонатитах (сёвитах III) и сопровождающих их щелочных редкометалльных метасоматитах Булдымского и Спирихинского массивов [Левин и др., 1997; Золоев и др., 2004]. Колумбит, эшинит, монацит, хроммагнезиочевкинит приурочены к доломитовым карбонатитам, а также сопровождающим их карбонат-флогопит-рихтеритовым, флогопит-рихтеритовым и флогопитовым метасоматитам [Недосекова, 2007; Недосекова и др., 2009].

Для оценки источников вещества рудной REE-Nb минерализации булдымского комплекса нами были проведены исследования изотопных составов Sr и Nd рудных минералов и вмещающих их пород. Изучены пирохлорсодержащие доломит-кальцитовые карбонатиты и метасоматиты, а также рудные ниобиевые минералы – пирохлоры и эшиниты Булдымского REE-Nb месторождения.

Исследование изотопного состава (Rb/Sr и Sm/Nd) выполнено в лаборатории геохронологии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты). Содержание элементов определяли методом изотопного разбавления с добавлением калиброванного изотопного трассера. Измерения осуществляли на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 RPQ (TIMS) в статическом режиме.

Измерения изотопного состава неодима и концентраций Sm и Nd проводили на семиканальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 RPQ (TIMS) в статическом двухленточном режиме с применением ренийевых и танталовых лент. Среднее значение отношения ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в стандарте La Jolla за период измерений составило 0.511835 ± 18 (N = 15). Ошибка в отношениях ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd составляет 0.3% (2σ) – среднее значение из семи измерений в стандарте BCR. Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе не превышала 0.004%. Холостое внутрिलाбораторное загрязнение по Nd равно 0.3 нг,

* ГИ КНЦ РАН, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14.

Таблица 1. Изотопные Sm-Nd и Rb-Sr данные для пироксолов (обр. 3296, K218, K2-21) и эшинита (K2-23) из карбонатитов и щелочных метасоматитов булдымского ультрабазит-карбонатитового комплекса, Булдымское месторождение, Урал

№ п/п	Обр.	Sm, г/т	Nd, г/т	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	2σ%	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ abs	εNd ₂₆₈
1	K2-18	391	2603	0.090700	0.3	0.512315	0.000011	-2.68
2	3296-Т	127	117	0.068640	0.3	0.512160	0.000016	-4.95
3	K2-21	2928	11154	0.158650	0.3	0.512232	0.000017	-6.62
4	K2-23	1191	13803	0.052200	0.3	0.512217	0.000009	-3.27
5	K2-23-1	4762	37701	0.076342	0.3	0.512254	0.000016	-3.37
	Обр.	Rb, г/т	Sr, г/т	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	2σ%	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ abs	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ₂₆₈
1	K2-18	41.4	3772	0.030976	1.4	0.70785	0.00018	0.70773
2	3296-1	8.73	7058	0.003580	1.4	0.70428	0.00015	0.70427
3	K2-21	1.26	2990	0.001189	1.4	0.70716	0.00016	0.70716
4	K2-23	1.02	1156	0.002489	1.4	0.70619	0.00018	0.70618

Примечание. Содержание элементов определяли методом изотопного разбавления с добавлением калиброванного изотопного трассера. Измерения изотопного состава элементов проводили на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 RPQ (TIMS) в статическом режиме (ГИ КНЦ, г. Апатиты). Первичные отношения изотопов Sr и εNd рассчитаны на возраст 268 млн лет [Недосекова, Беляцкий, 2012]. 1 – U-пироксолов из слюдитов Булдымского ультрабазитового массива (обр. K2-18, Западный карьер); 2 – пироксолов из доломит-кальцитовых карбонатитов (сёвитов III) (обр. 3296, Булдымский массив); 3 – REE-содержащий фторкальциопироксолов из флогопитовых метасоматитов (обр. K2-21, Булдымский массив, Западный карьер); 4, 5 – ниобиеэшинит из слюдитов Булдымского массива (обр. K2-23, Западный карьер).

по Sm – 0.06 нг. Точность определения концентраций Sm и Nd составляет ±0.5%. Изотопные отношения нормализованы по ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219, а затем пересчитаны на принятое отношение ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в стандарте La Jolla = 0.511860. При расчете величин εNd(T) использованы современные значения CHUR по [Bouvier et al., 2008] (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.512630, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.1960) и DM по [Goldstein, Jacobsen, 1988] (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd = 0.513151, ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd = 0.2136).

Изотопный состав Sr и содержание Rb и Sr определяли на масс-спектрометре МИ-1201-Т в одноленточном режиме на танталовых лентах. На ленты подготовленные пробы наносили в нитратной форме. Изотопный состав Sr во всех измеренных образцах был нормализован к величине, рекомендованной NIST SRM-987, равной 0.71034 ± 0.00026. Погрешности изотопного состава (95%-й доверительный интервал) ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr не превышают ±0.04%, определения ⁸⁷Rb/⁸⁶Sr – ±1.4%. Точность установления концентрации Rb и Sr составляет ±1.0%. Холостое внутрिलाбораторное загрязнение по Rb равно 2.5 нг, по Sr – 1.2 нг.

С помощью Rb-Sr и Sm-Nd методов исследованы изотопные составы Na-Ca-пироксолов из доломит-кальцитовых карбонатитов; U-пироксолов, REE-содержащего пироксолов, а также эшинита из флогопитовых метасоматитов Булдымского массива. Результаты анализов приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Рудная REE-Nb минерализация (U-пироксолов, REE-содержащие пироксолов и эшиниты) Булдымского месторождения имеет значительные вариации первичных изотопных отношений стронция и неодиима (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₂₆₈ = 0.70428–0.70785; εNd₂₆₈ = -2.65...-6.61), рассчитанных на возраст 268 млн лет, полученный при датировании цирконов из поздних доломитовых карбонатитов и со-

провожающих их редкометалльных метасоматитов Булдымского массива и соответствующий позднеколлизийному этапу развития Уральской складчатой области [Недосекова, 2012; Недосекова, Беляцкий, 2012; Недосекова и др., 2014, 2016].

Так, U-пироксолов из флогопитовых метасоматитов Булдымского массива имеет умеренно обогащенные (εNd₂₆₈ = -2.65) изотопные составы неодиима, при этом он обогащен радиогенным стронцием (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr₂₆₈ = 0.70774). Пироксолов доломит-кальцитовых карбонатитов Булдымского месторождения обладает менее радиогенным составом изотопов стронция, но обогащен нерадиогенным неодимом (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr₂₆₈ = 0.70428, εNd₂₆₈ = -4.91), близким составом ранних доломит-кальцитовых карбонатитов [Недосекова и др., 2009; Nedosekova et al., 2013]. REE-содержащие пироксолов и эшинит из доломитовых карбонатитов (бефорситов), образующиеся на позднекарбонатитовой стадии, показывают значительные вариации изотопных отношений Sr и Nd и характеризуются радиогенными составами изотопов стронция (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr₂₆₈ = +0.70618...+0.70716) и минимальными отрицательными значениями εNd₂₆₈ (-3.23...-6.61), что свидетельствует об участии коровых флюидов в рудообразовании позднекарбонатитовой стадии.

На диаграмме ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr–εNd составы изотопов Sr и Nd рудных Nb-REE-минералов Булдымского месторождения находятся за пределами полей изотопных составов ультрабазитов и карбонатитов Булдымского массива (см. рис. 1). Лишь состав пироксолов кальцит-доломитовых карбонатитов наблюдается в мантийной области умеренно обогащенных составов типа EM1 и близок составам кальцит-доломитовых карбонатитов Булдымского комплекса [Nedosekova et al., 2013]. Значительные вариации

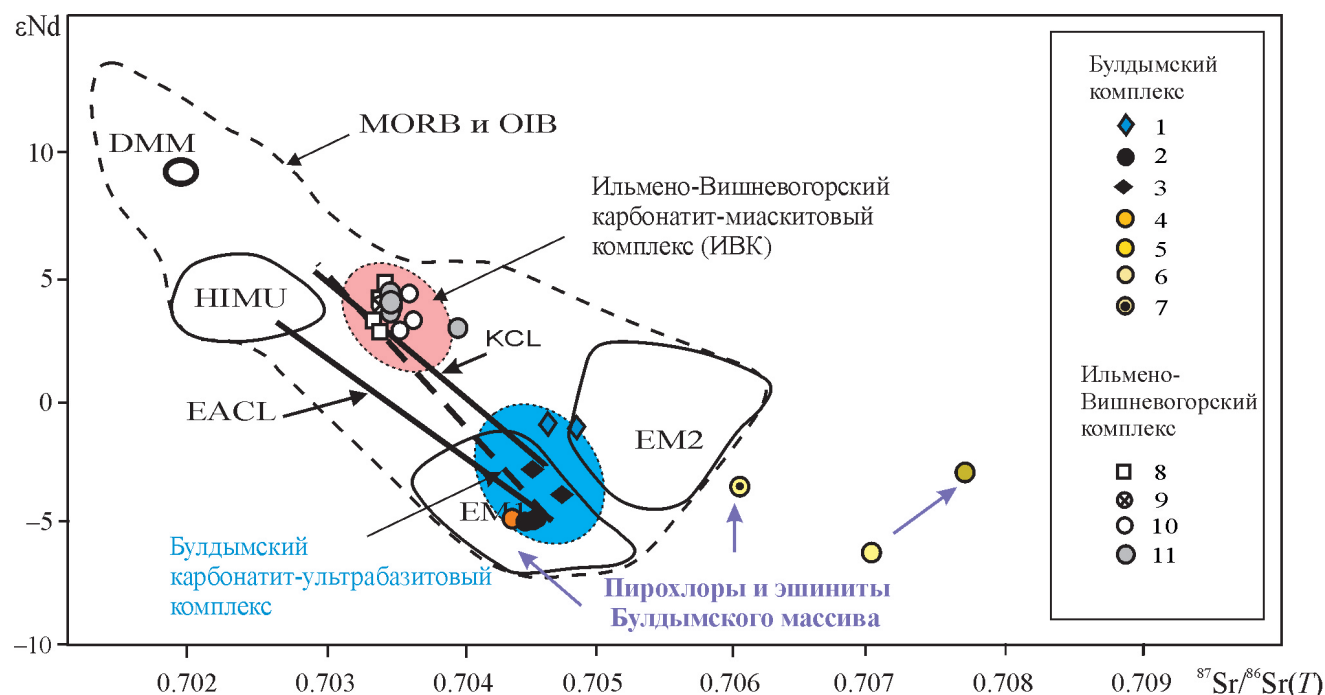


Рис. 1. Диаграмма $\epsilon Nd-(^{87}Sr/^{86}Sr)_{перв}$ для пород и редкометалльных минералов Булдымского комплекса (Урал).

Для сравнения приведены мантийные резервуары DMM, HIMU, EM1, EM2, MORB и OIB [Hofman, 1997; Zindler, Hart, 1986], а также составы пород Ильмено-Вишневогорского комплекса, Урал; линия кольских карбонатитов (KCL) [Kramm, 1993] и восточно-африканских карбонатитов (EACL) [Bell, Petersen, 1991]. Первичные изотопные составы рудных минералов и рудовмещающих пород Булдымского комплекса рассчитаны на возраст 268 млн лет [Недосекова, 2012; Недосекова и др., 2014, 2016]. 1–7 – Булдымский карбонатит-ультрабазитовый комплекс: 1 – ультрабазиты, 2 – доломит-кальцитовые карбонатиты (сёвиты), 3 – доломитовые карбонатиты (бефорситы), 4 – пирокслор из сёвитов, 5 – U-пирокслор из флогопитовых метасоматитов, 6 – REE-содержащий пирокслор, 7 – эшнит из флогопитовых метасоматитов; 8–11 – Ильмено-Вишневогорский карбонатит-миаскитовый комплекс (ИВК): 8 – миаскиты, 9 – ранние карбонатиты (сёвиты I), 10 – поздние карбонатиты (сёвиты II), 11 – пирокслоры ИВК.

изотопных отношений в рудных минералах, вероятно, связаны с участием коровых флюидов в процессах щелочного метасоматоза и рудообразования в Булдымском массиве.

Необходимо отметить, что изотопные составы Sr и Nd рудных Nb-REE-минералов Булдымского массива также существенно отличаются (более радиогенным изотопным составом стронция и менее радиогенным неодима) от таковых руд и пород месторождений Ильмено-Вишневогорского миаскит-карбонатитового комплекса [Недосекова и др., 2009; Nedosekova et al., 2013] (см. рис. 1).

Таким образом, исследования радиогенных изотопов Nd и Sr в рудных ниобиевых минералах и рудовмещающих породах Булдымского ультрабазит-карбонатитового комплекса показали значительные вариации изотопных составов в собственно рудных минералах (при обогащенности радиогенными изотопами стронция и нерадиогенными изотопами неодима – $^{87}Sr/^{86}Sr = +0.70427...+0.70773$, $\epsilon Nd = -2.65...-6.61$), что может свидетельствовать о контаминации и участии в рудообразовании коровых компонентов наряду с мантийными. Эти данные в совокупности с результатами датирования

подтверждают, что формирование REE-Nb-руд Булдымского месторождения в значительной мере связано с метасоматическими процессами, переотложением и контаминацией рудного вещества, происходившими на позднеколлизийном этапе (P_1) становления Уральской складчатой области.

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 17-05-00154.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Золов К.К., Левин В.Я., Мормилль С.И., Шардакова Г.Ю. Минерагения и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург, 2004. 336 с.
- Лебедева И.О., Недосекова И.Л. О процессе эшнитизации пирокслора из карбонатитов Булдымского массива (Вишневые горы, Урал) // Зап. ВМО. 1993. № 2. С. 69–75.
- Левин В.Я. Проблемы интрузивного щелочного магматизма Урала // Вопросы геологической корреляции и металлогении Урала. М.: Наука, 1983. С. 100–110.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 270 с.

- Недосекова И.Л.* Новые данные по карбонатитам Ильмено-Вишневогорского комплекса (Ю. Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49, № 2. С. 146–164.
- Недосекова И.Л.* Возраст и источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Ю. Урал): геохимические и Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb и Lu-Hf изотопные данные // Литосфера. 2012. № 5. С. 77–95.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В.* Возраст и источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Ю. Урал): изотопные Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb и Lu-Hf данные // Докл. АН. 2012. Т. 446, № 1. С. 71–76.
- Недосекова И.Л., Прибавкин С.В.* Рудная ниобиевая минерализация редкометалльных месторождений и рудопроявлений Ильмено-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса (Южный Урал) // Ежегодник-2014. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 162. 2015. С. 175–183.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Беляцкий Б.В.* U-Pb-возраст и Lu-Hf изотопные системы цирконов Ильмено-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса, Ю. Урал // Литосфера. 2014. № 5. С. 19–32.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В., Белоусова Е.А.* Редкие элементы и изотопный состав гафния как индикаторы генезиса циркона при эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал, Россия) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 6. С. 1135–1154.
- Недосекова И.Л., Владыкин Н.В., Прибавкин С.В., Баянова Т.Б.* Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс: происхождение, рудоносность, источники вещества (Урал, Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 2. С. 157–181.
- Поляков В.О., Недосекова И.Л.* Минералогия апогипербазитовых фенитов и карбонатитов южной части Ильменских гор // Минералы месторождений и зон техногенеза рудных районов Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1990. С. 24–35.
- Свяжгин Н.В.* Доломитовые карбонатиты Вишневогорского комплекса ультраосновных и щелочных пород // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1966. № 5. С. 65–72.
- Bell K., Petersen T.* Nd and Sr Isotope Systematics of Shombole Volcano, East Africa, and the Links between Nephelinite, Phonolites and Carbonatites // Geology. 1991. V. 19. P. 582–585.
- Bouvier A., Vervoort J.D., Patchett P.J.* The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets // Earth Planet. Sci. Lett. 2008. V. 273 (1–2). P. 48–57.
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B.* Nd and Sr isotopic systematics of river water suspended material implications for crystal evolution // Earth Plan. Sci. Lett. 1988. V. 87. P. 249–265.
- Hofmann A.W.* Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism // Nature. 1997. V. 385. P. 219–229.
- Kramm U.* Mantle components of carbonatite from the Kola Alkaline Province, Russia and Finland: A Nd-Sr Study // Eur. J. Mineral. 1993. V. 5. P. 985–989.
- Nedosekova I.L., Belousova E.A., Sharygin V.V., Belyatsky B.V., Baynova T.B.* Origin and evolution of the Il'meny-Vishnevogorsky carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-elements compositions, Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb and Lu-Hf isotope data // Mineralogy and Petrology. 2013. V. 107. P. 101–123.
- Zindler A., Hart S.R.* Chemical geodynamics // Ann. Rev. Earth Planet Sci. 1986. V. 4. P. 493–571.