

ИСТОЧНИКИ РУДНОЙ НИОБИЕВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО МИАСКИТ-КАРБОНАТИТОВОГО КОМПЛЕКСА (Rb-Sr И Sm-Nd ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ)

© 2017 г. И. Л. Недосекова, Б. В. Беляцкий

Карбонатиты с промышленным пироксоловым оруденением на Урале открыты в 40-х гг. XX в. и связаны с Ильмено-Вишневогорским миаскит-карбонатитовым комплексом. Это были эндогенные карбонатные жилы с пироксоловой минерализацией, залегающие в миаскитах Вишневогорского массива и слагающие рудные зоны Вишневогорского месторождения – первого в России месторождения ниобия, связанного с карбонатитами, на котором велась промышленная добыча ниобиевого сырья (с 1940-х до 1993 г.). В последующие 50 лет работами УГСЭ и Челябинской ГРЭ открыты более 10 новых месторождений и рудопроявлений ниобия, циркония и редких земель, связанных с карбонатитами Ильмено-Вишневогорского комплекса, – Потанинское месторождение, Светлоозерское, Байдашевское, Ишкульское, Увильдинское рудопроявления и др. [Золоев и др., 2004; Левин и др., 1997].

Редкометалльной минерализации Ильмено-Вишневогорского комплекса посвящены многочисленные исследования: Э.М. Бонштедт-Куплетской [1951]; Е.М. Еськовой, И.И. Назаренко [1960]; Е.М. Еськовой, А. Жабина, Г. Мухитдинова [1964]; А.Ф. Ефимова и др. [1985]; В.А. Попова, В.И. Поповой [2006]; В.О. Полякова, И.Л. Недосековой [1990]; И.О. Лебедевой, И.Л. Недосековой [1993]; В.Я. Левина и др., [1997]; В.А. Муфтахова [2001]; И.Л. Недосековой, С.В. Прибавкина [2015] и др. В породах Ильмено-Вишневогорского комплекса установлены и изучены минералы группы пироксолов (пироксолол, U-пироксолол, мариньякит, бетафит, гидропироксолол), минералы группы эшинита (эшинит, тороэшинит, ниобозшинит, алюмоэшинит), минералы группы колумбита (колумбит, титанколумбит, магнезиоколумбит), циркон, ильменорутит, ферсмит, торрианит, бастнезит, кальциостронцианит, монацит, чевкинит, давидит, бритолит, церит, ортит, барилит, катаплеит.

Основным рудным минералом редкометалльных месторождений Ильмено-Вишневогорского комплекса является пироксолол. Он присутствует во многих разновидностях пород – в миаскитах и сиенитах, особенно в их пегматоидных разновидностях, в миаскит-пегматитах, сиенит-пегматитах, щелочных метасоматитах (альбититах, фенитах, слюдитовых и др.). В наиболее значительных количествах пироксолол встречается в карбонатитах как ранних,

так и поздних стадий карбонатитообразования (сёвиты I и II соответственно), в эндо- и экзоконтакте Вишневогорского миаскитового массива, а также в карбонатитах Центральной щелочной полосы [Левин и др., 1997; Золоев и др., 2004; Недосекова, 2007; Недосекова и др., 2009; Недосекова, Прибавкин, 2015].

Согласно последней номенклатуре пироксоловой группы минералов (на основе преобладающего катиона или аниона в позициях) [Atencio et al., 2010] в Ильмено-Вишневогорском комплексе установлены следующие разновидности пироксолола, которые приурочены к определенным типам пород и определенной эволюционной стадии функционирования щелочно-магматической системы: U-(Ta)-оксикальциопироксололы, фторкальциопироксололы, а также Ta-, REE- и Sr-содержащие фтор- и оксикальциопироксололы [Недосекова, Прибавкин, 2015; Недосекова и др., 2017].

Для оценки источников рудного вещества ниобиевых месторождений Ильмено-Вишневогорского комплекса мы провели исследования изотопного состава Sr и Nd рудных минералов и вмещающих их пород. Изучены коллекции пироксололов миаскит-карбонатитового комплекса (Вишневогорского Zr-Nb месторождения и Увильдинского рудопроявления), переданные нам первооткрывателем этих месторождений В.Я. Левиным, а также авторские коллекции редкометалльных минералов.

Изотопный состав Rb/Sr и Sm/Nd измерен в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре TRITON в статическом режиме регистрации ионных токов. Содержание элементов определяли методом изотопного разбавления с добавлением калиброванного изотопного трассера. Для нормализации использовали значения $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ и $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. Несколько проб исследовано также в ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты). Измерения проводили на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 (RPQ) в статическом режиме. Методика определения изотопного состава Sr и Nd детально описана ранее [Баянова, 2004; Кунакузин и др., 2015].

Полученные Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные характеризуют рудные ниобиевые минералы, формирующиеся на разных стадиях рудообразования: U-(Ta)-оксикальциопироксололы (ранняя карбонати-

Таблица 1. Изотопные Sm-Nd и Rb-Sr данные для U-пирохлора (обр. К37/95-1) из ранних карбонатитов Ильмено-Вишневогорского комплекса, Увильдинское рудопроявление, Южный Урал

Образец	Sm, г/г	Nd, г/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	2s%	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2s abs	ϵNd (425)
К37/95-1	372.5	2931	0.07683	0.1	0.512526	0.0000015	4.33
К37/95-2	333.4	2571	0.07837	0.1	0.512513	0.0000022	3.99
К37/95-3	331.2	2585	0.07743	0.1	0.512524	0.0000028	4.26
К37/95-4	339.2	2670	0.07678	0.1	0.512534	0.0000019	4.49
К37/95-T*	37.0	280	0.08067	0.1	0.512501	0.0000009	3.63
Образец	Rb, г/г	Sr, г/г	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	2s%	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2s abs	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (425)
К37/95-1	9.45	8140	0.00336	2.04	0.703455	0.000018	0.70343

Примечание. Пробы измерены на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре TRITON (ЦИИ ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). Для пробы К37/95-T* измерения изотопного состава элементов проводили на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262L (PRO) в статическом режиме (ГИ КНЦ, г. Апатиты). Первичные отношения изотопов Sr и ϵNd рассчитаны на возраст 425 млн лет [Недосекова, Беляцкий, 2012].

Таблица 2. Изотопные Sm-Nd и Rb-Sr данные для пирохлора из карбонатитов (обр. 331) и миаскит-пегматитов (обр. Дол-21) Ильмено-Вишневогорского комплекса, Вишневогорское месторождение, Урал

№ п/п	Образец	Sm, г/г	Nd, г/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	2 σ %	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2 σ abs	ϵNd (425)
1	331-0	381.0	3876	0.05954	0.1	0.512447	0.000004	3.73
2	331-1	88.4	915	0.05840	0.1	0.512488	0.000003	4.59
3	331-2	202.8	2091	0.05861	0.1	0.512489	0.000003	4.60
4	331-3	159.8	1686	0.05726	0.1	0.512485	0.000004	4.59
5	331-4	351.9	3656	0.05818	0.1	0.512487	0.000002	4.58
6	Дол-21	256.7	2736	0.05671	0.3	0.512386	0.000002	2.69
	Обр.	Rb, г/г	Sr, г/г	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	2s%	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2s abs	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (425)
7	331-1	7.15	3731	0.00554	1.34	0.703449	0.000004	0.703415
8	Дол-21	3.93	10396	0.00109	0.85	0.703900	0.000007	0.703983

Примечание. Измерения изотопного состава элементов проводили на многоколлекторном твердофазном масс-спектрометре TRITON (ЦИИ ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург) в статическом режиме. Для нормализации использовали значения $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ и $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. Первичные отношения изотопов Sr и ϵNd рассчитаны на Sm-Nd возраст 425 млн лет, полученный для карбонатитов Вишневогорского массива [Недосекова, Беляцкий, 2012]. 1–5, 7 – фторкальциопироксид из поздних карбонатитов (сёвитов II), апикальная часть Вишневогорского миаскитового массива; 6, 8 – Та-содержащий фторкальциопироксид из миаскит-пегматитов, апикальная часть Вишневогорского массива.

товая стадия), Та-содержащие пироксиды (миаскит-пегматитовая стадия), Na-Ca-пироксиды (основная карбонатитовая стадия), Sr- и REE-содержащие пироксиды (позднекарбонатитовая стадия) [Недосекова, Прибавкин, 2015; Недосекова и др., 2017]. Результаты анализов приведены в табл. 1, 2 и на рис. 1.

Ранние U-(Та)-оксикальциопироксиды, образующиеся на позднемагматической стадии кристаллизации щелочно-карбонатитового расплава в ранних карбонатитах (сёвитах I), имеют умеренно деплетированные начальные изотопные составы ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{425} = 0.70343$, $\epsilon\text{Nd}_{425} = 3.63$ –4.49, обр. 37-95; миаскит-карбонатитовый комплекс, Увильдинское рудопроявление), близкие составам пород магматической стадии кристаллизации (миаскитов и ранних карбонатитов) (см. рис. 1).

Пироксиды основной карбонатитовой стадии, формирующие рудную зону 147 Вишневогорского месторождения, представлены зернами сложного строения с U-(Та)-содержащими ядрами, окаймленными более поздними Sr-содержащими генерациями оксикальциопироксидов, и показывают вариации начального изотопного состава Nd и Sr ($\epsilon\text{Nd}_{425} = 3.73$ –4.60; $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{425} = 0.7034$, обр. 331),

также соответствующие диапазону изотопных составов пород миаскит-карбонатитового комплекса (см. рис. 1) [Недосекова и др., 2009; Nedosekova et al., 2013].

Sm-Nd минеральная изохрона, полученная для пироксидсодержащих карбонатитов этой стадии (обр. 331, сёвит II, по пяти точкам, включая пироксид, кальцит, апатит, биотит, вал), показала первичное отношение изотопов неодима $\epsilon\text{Nd} = 3.73$ и возраст 425 ± 44 млн лет при СКВО = 0.16, который интерпретируется как возраст процесса карбонатитообразования в Вишневогорском карбонатит-миаскитовом комплексе [Недосекова, 2012; Недосекова, Беляцкий, 2012]. Эти данные использовали для расчета начальных отношений изотопов Sr и Nd в пироксидоносных миаскит-карбонатитового комплекса (см. табл. 1, 2). Датирование циркона карбонатитов из этой же пробы (обр. 331) показало близкие значения U-Pb-возраста 416.6 ± 6.1 при СКВО = 0.75 [Недосекова и др., 2014, 2016]. Близкий возраст 419 ± 20 млн лет для цирконов из карбонатитов Ильмено-Вишневогорского комплекса получен также А.А. Краснобаевым [Краснобаев и др., 2010б]. Эти геохронологические данные свидетель-

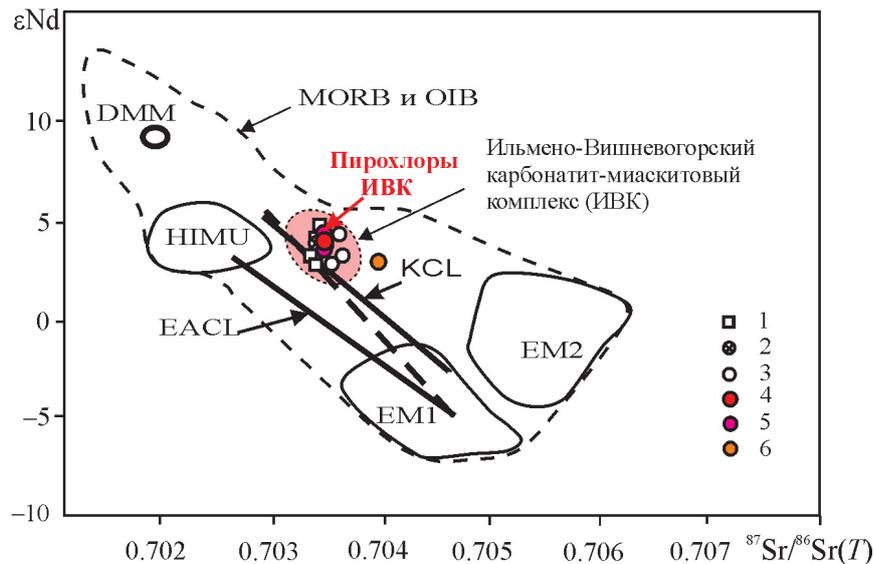


Рис. 1. Диаграмма $\epsilon Nd-^{87}Sr/^{86}Sr (T)$ для пород и редкометалльных минералов Ильмено-Вишневогорского комплекса (Урал).

Мантийные резервуары DMM, HIMU, EM1, EM2, MORB и OIB приведены по [Hofmann, 1997; Zindler, Hart, 1986], линия эволюции изотопного состава Кольских карбонатитов (KCL) – по [Kramm, 1993], Восточно-Африканских карбонатитов (EACL) – по [Bell, Petersen, 1991]. Начальные изотопные составы пород и редкометалльных минералов Ильмено-Вишневогорского комплекса рассчитаны на возраст 425 млн лет [Недосекова, Беляцкий, 2012].

1–6 – изотопные составы пород и минералов Ильмено-Вишневогорского карбонатит-миаскитового комплекса: 1 – миаскиты, 2 – ранние карбонатиты (сёвиты I), 3 – поздние карбонатиты (сёвиты II), 4 – U-(Ta)-пирокслор раннекарбонатитовой стадии (из сёвитов I), 5 – пирокслор сёвитов II, 6 – Ta-содержащий пирокслор из пегматитов.

ствуют о многоэтапности формирования Ильмено-Вишневогорского комплекса и помимо верхнеордовикского этапа щелочно-карбонатитового магматизма [Кононова и др., 1979; Чернышев и др., 1987; Kramm et al., 1983, 1993] фиксируют силурийский (рудный) этап, с которым связано возникновение значительной части редкометалльных месторождений Ильмено-Вишневогорского комплекса.

Ta-содержащий фторкальциопирокслор, формирующийся на пегматитовой стадии кристаллизации в Ne-пегматитах (Вишневогорское месторождение), имеет менее радиогенный начальный состав Nd и более радиогенный состав Sr ($^{87}Sr/^{86}Sr_{425} = 0.70398$, $\epsilon Nd_{425} = 2.69$, обр. Дол-21). Это, возможно, связано с контаминационными процессами на заключительных стадиях функционирования щелочно-карбонатитовой магматической системы (см. табл. 2).

Начальный изотопный состав пирокслоров и пород миаскит-карбонатитового комплекса сходен и находится в области мантийных умеренно деплетированных составов (см. рис. 1), что свидетельствует о едином глубинном источнике рудного и породного вещества Ильмено-Вишневогорского комплекса. Эти данные в совокупности с результатами датирования пирокслорсодержащих разновидностей пород [Краснобаев и др., 2010а, б, 2014; Недосекова и др., 2016] подтверждают, что процессы карбонатитообразования и редкометалльного образова-

ния в миаскит-карбонатитовом комплексе происходили уже в раннем силуре (рудный этап). При этом вариации изотопных параметров пирокслоров (см. табл. 1, 2) могут быть связаны с процессами перекристаллизации рудного вещества на коллизионном этапе становления Ильмено-Вишневогорского комплекса [Недосекова, Беляцкий, 2012].

Таким образом, Sr-Nd изотопная систематика рудных ниобиевых минералов, формирующихся на разных стадиях рудообразования (пегматитовой, ранней и поздней карбонатитовой), свидетельствует о едином источнике вещества миаскит-карбонатитового комплекса и редкометалльной минерализации (Ильмено-Вишневогорский комплекс; Вишневогорское и Увильдинское месторождения), который по изотопным параметрам соответствует умеренно деплетированному мантийному источнику. Установленные вариации изотопных составов рудных ниобиевых минералов – обогащенность пирокслоров пегматитов радиогенным стронцием и нерадиогенным неодимом ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0.70398$; $\epsilon Nd = 2.69$) относительно пирокслоров карбонатитовой стадии ($^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7034$, $\epsilon Nd = +3.7...+4.6$) – могут быть связаны с многостадийностью рудообразования и поступлением новых порций расплавов-флюидов и рудообразующего вещества на заключительных этапах формирования ниобиевых месторождений, а также с процессами перекристаллизации рудных минералов и пород на кол-

лизионном этапе становления комплекса. Близость параметров изотопных систем пироксенов и пород карбонатит-миаскитового комплекса в совокупности с результатами датирования свидетельствует о едином источнике рудного и породного вещества и подтверждает, что процессы редкометалльного рудообразования и карбонатитообразования происходили на силурийском этапе становления Ильмено-Вишневогорского комплекса.

Исследования поддержаны грантом РФФИ № 17-05-00154.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баянова Т.Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 2004. 174 с.
- Бонштедт-Куплетская Э.М. Минералогия щелочных пегматитов Вишневых гор. М., 1951. 105 с.
- Еськова Е.М., Назаренко И.И. Пироксеновые парагенетические ассоциации и особенности химического состава // Вопросы геологии, геохимии и генезиса месторождений редких элементов. Тр. ИМГРЭ. Вып. 4. М., 1960. С. 33–50.
- Еськова Е.М., Жабин А., Мухитдинов Г. Минералогия и геохимия редких элементов Вишневых гор. М.: Наука, 1964. 319 с.
- Ефимов А.Ф., Еськова Е.М., Лебедева С.И., Левин В.Я. Типохимизм акцессорного пироксена в породах щелочного комплекса Урала // Геохимия. 1985. № 2. С. 202–208.
- Золов К.К., Левин В.Я., Мормиль С.И., Шардакова Г.Ю. Минералогия и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург, 2004. 336 с.
- Кононова В.А., Донцова Е.И., Кузнецова Л.Д. Изотопный состав кислорода и стронция Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса и вопросы генезиса миаскитов // Геохимия. 1979. № 12. С. 1784–1795.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Вализер П.М., Бушарина С.В. Цирконология кальцитовых карбонатитов Вишневогорского массива (Южный Урал) // Докл. АН. 2010а. Т. 431, № 3. С. 382–385.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Бушарина С.В., Лепехина Е.Н., Медведева Е.В. Цирконология амфиболовых миаскитов Ильменогорского массива (Южный Урал) // Докл. АН. 2010б. Т. 430, № 2. С. 227–231.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Анфилогов В.Н., Немов А.Б., Бушарина С.В. Цирконология пегматитов Ильменских гор // Докл. АН. 2014. Т. 457, № 4. С. 455.
- Кунакузин Е.Л., Баянова Т.Б., Нерович Л.И., Борисенко Е.С., Серов П.А., Елизаров Д.В. Новые Nd-Sr изотопно-геохимические исследования пород палеопротерозойского ЭПГ-содержащего массива Мончегундра (Фенноскандинавский щит) // Вестн. МГТУ. 2015. Т. 18, № 2. С. 269–279.
- Лебедева И.О., Недосекова И.Л. О процессе эшнитизации пироксенов из карбонатитов Булдымского массива (Вишневые горы, Урал) // Зап. ВМО. 1993. № 2. С. 69–75.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С. и др. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 1997. 270 с.
- Муртахов В.А. Типохимизм титано-тантало-ниобатов из пегматитов Ильмено-Вишневогорского комплекса: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Миасс, 2001. 20 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., Замятин Д.А., Удоротина О.В. Рудная специализация карбонатитовых комплексов Урала и Тимана // Литосфера. 2017. Т. 17, № 2. С. 66–77.
- 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.
- Попов В.А., Попова В.И. Минералогия пегматитов Ильменских гор. Минералогический альманах. Т. 9. М.: Ассоциация Эжост, 2006. 156 с.
- Чернышев И.В., Кононова В.А., Крамм У. Изотопная геохронология щелочных пород Урала в свете данных уран-свинцового метода по цирконам // Геохимия. 1987. № 3. С. 323–338.
- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature // Canad. Mineral. 2010. V. 48. P. 673–698.
- 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.
- 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.
- Kramm U., Blaxland A.B., Kononova V.A., Grauert B.* Origin of the Ilmenogorsk-Vishnevogorsk nepheline syenites, Urals, USSR, and their time of emplacement during the history of the Ural fold belt: a Rb-Sr study // *J. Geol.* 1983. V. 91. P. 427–435.
- Kramm U., Chernyshev I.V., Grauert S. et al.* Zircon typology and U-Pb systematics: a Case Study of zircons from nefeline syenite of the Il'meny Mountains, Ural // *Petrology*. 1993. V. 1, no. 5. P. 474–485.
- 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, iss. 1. P. 101–123.
- Zindler A., Hart S.R.* Chemical geodynamics // *Ann. Rev. Earth Planet Sci.* 1986. V. 14. P. 493–571.