

УДК 553.493+552.33(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-4-486-498

О возрасте пироклоровых карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса, Ю. Урал (по данным Sm-Nd и Rb-Sr изотопных методов)

И. Л. Недосекова¹, В. А. Коротеев¹, Т. Б. Баянова², П. А. Серов², В. И. Попова³,
М. В. Червяковская¹

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mail: vladi49@yandex.ru

²Институт геологии, Кольский НЦ, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14

³Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 456317, Челябинская обл., г. Миасс

Поступила в редакцию 24.10.2019 г., принята к печати 09.12.2019 г.

Объект исследования. Приведены результаты Sm-Nd и Rb-Sr изотопного датирования пироклоровых карбонатитов Вишневогорского ниобиевого месторождения, Ильмено-Вишневогорский щелочной комплекс (ИВК), Южный Урал. ИВК является представителем карбонатитовых комплексов линейного типа, с которым связаны редкометалльные (Nb-Zr-TR) месторождения и рудопроявления, время и продолжительность формирования которых остается предметом дискуссий. В целях определения возраста карбонатитов и связанного с ними ниобиевого оруденения проведены измерения Sm-Nd и Rb-Sr изотопных составов и концентраций элементов в валовых пробах пироклоровых карбонатитов и слагающих их минералах (пироклоре, кальците, апатите, биотите). **Методы.** Измерения изотопного состава и концентраций Sm и Nd проводились на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 RPQ (TIMS) в статическом режиме (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты). Изотопный состав и концентрации Rb и Sr измерялись на термоионизационном масс-спектрометре Triton Plus (ЦКП “Геоаналитик”, ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург). **Результаты.** С использованием Sm-Nd и Rb-Sr изотопных систем определен возраст кристаллизации пироклоровых карбонатитов рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения. Минеральная Sm-Nd изохрона (5 точек) показала возраст 229 ± 16 млн лет, минеральная Rb-Sr изохрона (5 точек) дала близкий возраст 250.5 ± 1.2 млн лет. **Заключение.** Результаты Sm-Nd и Rb-Sr датирования свидетельствуют о том, что пироклоровые карбонатиты рудной зоны 140 кристаллизовались ≈ 250 млн лет назад на этапе постколлизийного растяжения, возможно, в связи с эксгумацией комплекса, сопровождающейся декомпрессией, участием флюидов, частичным плавлением пород, растворением и переотложением вещества ордовикско-силурийских щелочно-карбонатитовых комплексов.

Ключевые слова: карбонатиты, пироклор, Nb месторождения, Sm-Nd и Rb-Sr датирование, Урал

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-00154 и темы государственного задания ИГТ УрО РАН № АААА-А18-118052590028-9

On the age of pyrochlore carbonatites from the Ilmeno-Vishnevogorsky Alkaline Complex, the Southern Urals (insights from Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data)

Irina L. Nedosekova¹, Viktor A. Koroteev¹, Tamara B. Bayanova², Pavel A. Serov²,
Valentina I. Popova³, Maria V. Chervyakovskaya¹

¹Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry Ural Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mail: vladi49@yandex.ru

²Institute of Geology Kola Science Centre of RAS, 14 Fersman st., Murmansk region, Apatity 184209, Russia

³Institute of Mineralogy Ural Branch of RAS, Chelyabinsk region, Miass 456317, Russia

Received 24.10.2019, accepted 09.12.2019

Для цитирования: Недосекова И.Л., Коротеев В.А., Баянова Т.Б., Серов П.А., Попова В.И., Червяковская М.В. (2020) О возрасте пироклоровых карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса, Ю. Урал (по данным Sm-Nd и Rb-Sr изотопных методов). *Литосфера*, 20(4), 486–498. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-4-486-498

For citation: Nedosekova I.L., Koroteev V.A., Bayanova T.B., Serov P.A., Popova V.I., Chervyakovskaya M.V. (2020) On the age of pyrochlore carbonatites from the Ilmeno-Vishnevogorsky Alkaline Complex, the Southern Urals (insights from Rb-Sr and Sm-Nd isotopic data). *Litosfera*, 20(4), 486–498. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-4-486-498

© И.Л. Недосекова, В.А. Коротеев, Т.Б. Баянова, П.А. Серов, В.И. Попова, М.В. Червяковская, 2020

Research subject. In this research, we carried out Sm-Nd- и Rb-Sr-dating of pyrochlore carbonatite from the Vishnevogorsky niobium deposit, Ilmeno-Vishnevogorsky Alkaline Complex, Southern Urals. IVC is located in the Ural fold region and is a carbonatite complex of the linear type. Rare metal (Nb-Zr-TR) deposits and occurrences are related to IVC. The age and the duration of IVC deposits formation remains a matter of debate. To determine the age of IVC carbonatites and related niobium ore, we measured Sm-Nd and Rb-Sr isotopic compositions and concentrations of the elements in the minerals (pyrochlore, calcite, apatite, biotite) and bulk sample of pyrochlore carbonatite. **Materials and methods.** The Sm and Nd isotopic compositions and concentrations were determined on a Finnigan MAT-262L (RPQ) seven-collector mass spectrometer in the static regime at the Geological Institute of the Kola Scientific Center, Apatity, Russia. The Sr and Rb isotopic compositions and concentrations were determined on thermos-ionization mass spectrometer Triton Plus ("Geoanalytik", IGG UB RAN, Ekaterinburg, Russia). **Results.** Age of pyrochlore carbonatites from ore zone 140 (Vishnevogorsky deposit, IVC) defined by Sm-Nd and Rb-Sr isotopic methods. Mineral Sm-Nd-isochron (5 points) indicated age 229 ± 16 Ma, mineral Rb-Sr-isochron (5 points) showed similar age 250.5 ± 1.2 Ma. **Conclusions.** Results Sm-Nd и Rb-Sr dating indicate that the pyrochlore carbonatites of ore zone 140 crystallized ≈ 250 Ma ago, at the stage of the postcollisional extension, possibly, in connection with exhumation complex, which was accompanied by decompression, partial melting of rocks, involving fluids, dissolution and precipitation of Ordovician-Silurian alkaline-carbonatite complex. Thus, the formation of the IVC carbonatites and related Nb-ore, which began in Silurian (S), continued in Permian (P) and Triassic (T₁₋₂) and was associated with the post-collision stage of tectonic activity in the Ural Fold Belt.

Keywords: carbonatites, pyrochlore, Nb-deposits, Sm-Nd- and Rb-Sr-dating, Urals

Funding information

This work supported by grant RFFI No. 17-05-00154 and in accordance with the theme No. AAAA-A18-118052590028-9 of the IGG UB RAS state assignment

Acknowledgements

The authors express their deep appreciation to the staff geochronology laboratory IG KSC RAS and FHMI IGG UB RAS for carrying out isotope studies

ВВЕДЕНИЕ

Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс, расположенный в Уральской складчатой области, является представителем карбонатитовых комплексов линейного типа и известен как источник редкометалльной (Nb, Zr, РЗЭ) минерализации и промышленных месторождений ниобия и циркония. Наиболее крупные Nb месторождения – Вишневогорское, Потанинское, Будымское, а также ряд рудопроявлений связаны с пироклоровыми карбонатитами ИВК.

Происхождение карбонатитовых комплексов и редкометалльных месторождений складчатых областей (и в частности, месторождений ИВК Южного Урала) до сих пор является дискуссионным (Левин и др., 1997; Баженов, 1997, 2006; Burke et al., 2003; Mitchell, 2005; Attoh et al., 2007; Biswal et al., 2007; Недосекова и др., 2009; Иванов и др., 2010; Иванов, 2011; Русин и др., 2012; Nedosekova et al., 2013; Emmanuel et al., 2013). Геохронологическими исследованиями установлено, что наряду с синхронным образованием карбонатитов, силикатных пород и редкометалльных руд (Hou et al., 2006; Attoh et al., 2007; Rodionov et al., 2012; Ye et al., 2013; Poletti et al., 2016), формирование редкометалльных месторождений в этих комплексах может быть связано с более поздними метасоматическими событиями (Campbell et al., 2014; Vetrin et al., 2014; Ying et al., 2017).

Изотопно-геохронологические исследования ИВК, проведенные ранее с использованием U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr изотопных систем, показали много-

этапность его формирования. Так, изотопным датированием фиксируются палеозойский этап магматического внедрения интрузий щелочных пород и карбонатитов ИВК (≈ 440 – 390 млн лет) и более поздние этапы их ремобилизации и преобразования на этапе уральской коллизии (≈ 350 – 250 млн лет) и постколлизиионного растяжения (≈ 250 – 230 млн лет) (Кононова и др., 1979; Kramm et al., 1983, 1993; Чернышев и др., 1987; Краснобаев и др., 2010а, б, 2016; Недосекова, Беляцкий, 2012; Недосекова и др., 2016).

Данные исследования различных изотопных систем (Sm-Nd, Rb-Sr, Lu-Hf), полученные для пород и рудных минералов (пироклоров, цирконов) ранних стадий рудообразования в ИВК, свидетельствуют о едином источнике их вещества, соответствующего умеренно деплетированной мантии (Кононова и др., 1979; Прибавкин, Недосекова, 2006; Недосекова и др., 2010, 2014, 2018; Nedosekova et al., 2013). Изотопные составы пород и минералов поздних стадий карбонатитообразования в ИВК, а также изотопные составы отдельных рудных зон Вишневогорского месторождения показывают обогащение радиогенным Sr и нерадиогенным Nd и Hf, что может свидетельствовать об участии в процессах рудообразования, наряду с мантийными, коровых компонентов (Недосекова и др., 2009, 2016, 2018; Иванов, 2011).

Несмотря на значительную изученность ИВК, до настоящего времени остаются актуальными вопросы возраста и длительности этапов рудообразования на месторождениях комплекса. Результаты U-Pb датирования рудных минералов (пироклора и

циркона) позволяют предположить, что формирование Nb-Zr руд происходило как на этапе внедрения щелочно-карбонатитовых интрузий (S-D), так и на поздне- и постколлизийном этапах (P-T) становления карбонатитовых комплексов Урала (Недосекова и др., 2012, 2015, 2016, 2018; Беляцкий и др., 2018). В целях датирования процессов карбонатито- и рудообразования в ИВК нами выполнены исследования Sm-Nd и Rb-Sr изотопных составов с построением Sm-Nd и Rb-Sr изохрон для пироксоловых карбонатитов и их минералов рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ВОЗРАСТ ПОРОД ИВК

ИВК залегает в докембрийских метаморфических породах Сысертско-Ильменогорского антиклинария Южного Урала, в коллизийной структуре субмеридионального простирания, и состоит из двух крупных факолитоподобных миаскитовых плутонов ((20–25) × 6 км) – Вишневогорского и Ильменогорского, соединенных Центральной щелочной полосой, протягивающейся с севера на юг на расстояние более 100 км и сложенной цепью пластообразных тел миаскитов, сиенитов, карбонатитов, силикатно-карбонатных пород, ореолами фенитов и щелочных метасоматитов (рис. 1). По В.Я. Левину (Левин и др., 1997), породы Центральной щелочной полосы представляют собой наиболее глубинную корневую часть ИВК; интрузивы миаскитов (Вишневогорский и Ильменогорский) являются аллохтонами, были пластически деформированы, подверглись частичному плавлению (Баженов, 1997) и были ремобилизованы во время Уральской коллизии.

Геохронологические данные для миаскитов ИВК, полученные различными изотопными методами, показали ордовикско-силурийские возраста, интерпретированные как возраст внедрения миаскитовых интрузий (Кононова и др., 1979; Kramm et al., 1983; Чернышев и др., 1987; Недосекова, Беляцкий, 2012). При этом на основе Rb-Sr изохронного датирования был получен ордовикский (440–446 млн лет) возраст кристаллизации – по валовым пробам миаскитов, и пермский (244–255 млн лет) – по минеральным изохронам миаскитов, который интерпретирован как возраст закрытия Rb-Sr изотопных систем при метаморфизме (Кононова и др., 1979; Kramm et al., 1983). Аналогичные бинарные возраста также получены U-Pb методом по цирконам миаскитов и карбонатитов ИВК: 417–432 млн лет, S_{1-2} и 260–280 млн лет, P_{1-3} (Чернышев и др., 1987; Kramm et al., 1993; Краснобаев и др., 2010а, 2016; Недосекова и др., 2010, 2014, 2016).

Карбонатиты с редкометалльной (Nb-Zr) минерализацией в ИВК широко развиты в апикальной части Вишневогорского миаскитового массива,

в породах Центральной щелочной полосы, а также в фенитовом ореоле Вишневогорского и Ильменогорского миаскитовых плутонов. Рудоносные Nb-REE карбонатиты также известны в массивах ультрабазитов (Булдымском, Спирихинском и др.), залегающих в обрамлении миаскитовых интрузивов. С карбонатитами ИВК связаны многочисленные месторождения и рудопроявления ниобия – Вишневогорское, Потанинское, Булдымское, Светлинское, Ишкульское, Увильдинское, Байдашевское и др. (см. рис. 1).

Карбонатиты слагают пластообразные и линзовидные тела субмеридионального простирания в миаскитах Центральной щелочной полосы, а также в корневой части Вишневогорского массива и представлены силикокарбонатитами (Севиты I) – брекчиевидными, флюидальными и массивными разновидностями пород кальцитового состава, содержащими нефелин, полевые шпаты, биотит, иногда амфибол, акцессорный черный U-(Ta)-пироксоло, циркон, ильменит, апатит, магнетит, пирротин, пирит (Левин и др., 1997). Особенности петро- и геохимии Севитов I (повышенные содержания Si, Mg, Al, значительные содержания Sr и Ba, минимальные содержания P3Э и отношения Nb/Ta, отсутствие европиевой аномалии) характерны для высокотемпературных и магматических разностей карбонатитов и подтверждают их принадлежность к ранним высокотемпературным дифференциатам миаскитовых магм (Недосекова и др., 2009). Пироксоловые севиты I представлены U-(Ta)-содержащими разновидностями оксикальциопироксолов и гидроксикальциопироксолов (по классификации (Atencio et al., 2010)) (или уранпироксоловами, по классификации (Hogarth, 1977)) с вариацией составов, мас. %: 40.0–50.4 – Nb₂O₅, 2.6–13.9 – CaO, 0.0–6.4 – Na₂O, 4.0–13.8 – Ta₂O₅, 8.0–12.5 – TiO₂, 0.1–3.4 – P3Э, 14.5–23.8 – U₃O₈, 0.0–2.0 – ThO₂, 0.1–2.1 – SrO, 0.2–2.6 – F.

Возраст Севитов I ИВК: 417 ± 3 млн лет (U-Pb метод по цирконам (Недосекова и др., 2014)), а также возраст уранпироксолов из севитов I: 378.0 ± 4.9 млн лет (U-Pb метод по U-(Ta)-пироксолом (Беляцкий и др., 2018; Недосекова и др., 2018)) соотносятся с завершающими стадиями кристаллизации щелочно-карбонатитовых расплавов. Поздний циркон (280 млн лет (Недосекова и др., 2016)) встречается в ранних карбонатитах в виде тонких кайм и редок.

Рудоносные пироксоловые карбонатиты также широко развиты в апикальной части Вишневогорского массива миаскитов и его фенитовом ореоле. С ними связано Вишневогорское месторождение пироксолов, включающее в себя три основные рудные зоны – 147, 140, 125 (рис. 2).

Рудная зона 147 приурочена к северному эндоконтакту Вишневогорского массива и сложена пластообразными и жильными телами карбонатитов (Севиты II). Карбонатиты зернистые и афани-

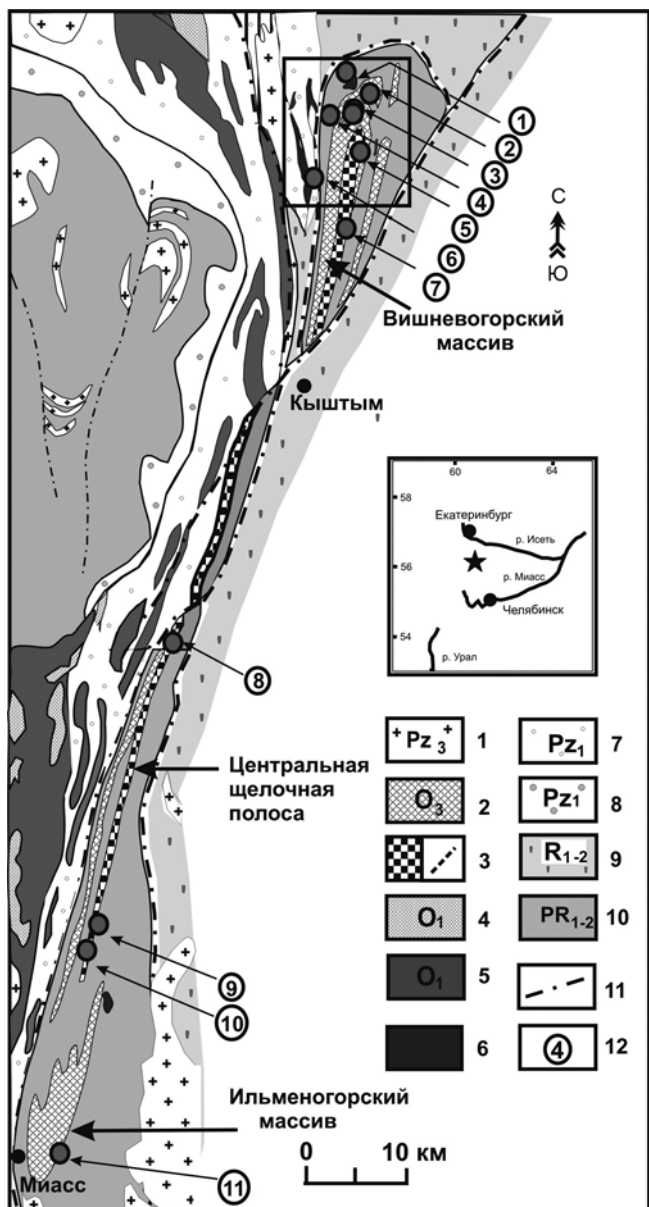


Рис. 1. Схема геологического строения Ильмено-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса Южного Урала с основными месторождениями и рудопроявлениями Nb, Zr и РЗЭ (Левин и др., 1997; Золоев и др., 2004).

1 – граниты (Pz₃); 2, 3 – Ильмено-Вишневогорский комплекс (O₃–S); 2 – миаскиты Вишневогорского и Ильменогорского массивов, 3 – зоны метасоматитов, карбонатитов, силикатно-карбонатных пород Центральной щелочной полосы; 4 – габбро офиолитовой формации (O₁); 5 – гипербазиты офиолитовой формации (O₁); 6 – метаультрабазиты булдымского комплекса (PR₂); 7 – вулканогенно-осадочные образования Тагило-Магнитогорского мегасинклинария (Pz₁); 8 – сланцы гранатослюдаые и эклогиты восточной периферии Уфалейского срединного массива (Pz₁); 9 – плагиосланцы и кварциты обрамления Сысертско-Ильменогорского срединного массива (R₁₋₂); 10 – плагиогнейсы, гранитные мигматиты, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты Сысертско-Ильменогорского и Уфалейского средин-

ных массивов (PR₁₋₂); 11 – разломы и несогласия; 12 – основные месторождения и рудопроявления Nb и РЗЭ, связанные с карбонатитами (цифры в кружках): 1 – Булдымское (Nb и РЗЭ), 2, 3 – Вишневогорское (Nb) (2 – Зона 125, 3 – Зона 140, 3а – Зона 147), 4 – Спирихинское (РЗЭ), 5 – Светлинское (Nb), 6 – Каганское (РЗЭ), 7 – Потанинское (Nb), 8 – Увильдинское (Nb), 9 – Байдашевское (Nb), 10 – Ишкульское (Nb), 11 – Ильменское, Копь 97 (Nb и РЗЭ).

Fig. 1. Geological scheme of the Il'meno-Vishnevogorsky alkaline-carbonatite complex (Levin et al., 1997; Zoloev et al., 2004).

1 – Late Paleozoic granite; 2, 3 – Late Ordovician–Silurian Il'meno-Vishnevogorsky Complex: 2 – miaskite of the Vishnevogorsky and Il'menogorsky plutons, 3 – metasomatic and igneous rocks of the Central alkaline zone: phenites, feldspathic and silicate-carbonate metasomatic rocks, carbonatites, and miaskites; 4 – Early Ordovician gabbro of ophiolitic complex; 5 – Early Ordovician ultramafic rocks of ophiolitic complex; 6 – Paleoproterozoic (?) meta-ultramafic rocks of the Buldym, Kagan, and Nyashevo complexes; 7 – Lower Paleozoic volcanic and sedimentary rocks of the Tagil-Magnitogorsk Megasyntorium; 8 – Lower Paleozoic garnet-mica schist and eclogite of the eastern margin of the Ufalet Median Massive; 9 – Lower and Middle Riphean plagioclase schist and quartzite in the framework of the Sysert-II'menogorsky Median Array; 10 – Paleoproterozoic plagiogneiss, granitic migmatite, crystalline schist, amphibolite, and quartzite of the Sysert-II'menogorsky and Ufalet median arrays; 11 – Faults and unconformities; 12 – Nb and REE deposits and occurrences related to carbonatites (numerals in circles): 1 – Buldym-skoe (Nb and REE), 2, 3 – Vishnevogorskoe (Nb): 2 – Ore Zone 125, 3 – Ore Zone 140, 4 – Spirikhinskoe (REE), 5 – Svetlenskoe (Nb), 6 – Kaganskoe (REE), 7 – Potaninskoe (Nb), 8 – Uvil'dinskoe (Nb), 9 – Baidashevskoe (Nb), 10 – Ishkul'skoe (Nb), 11 – Il'menskoe (Pit 97) (Nb and REE).

товые, кальцитового состава, с полосчатым, параллельным контактам тел распределением силикатных и аксессуарных минералов – биотита, апатита, красного пироклора (размером н мм), ильменита, циркона, магнетита, пирротина, пирита. От Севитов I они отличаются особенностями петрохимии и геохимии (более низкими содержаниями Mg, Si, Al, более высокими – Mn, экстремально высокими содержаниями Sr (до 2.5 мас. %) и РЗЭ (до 3210 г/т), высокими значениями Nb/Ta, Sr/Ba, снижением Eu/Eu* (до 0.75), что характерно для более поздних среднетемпературных членов карбонатитовых серий (Недосекова и др., 2009). Пироклоры в Севитах II красного и светло-бурого цвета представлены низкоурановыми разностями фторкальциопироклора с высокими содержаниями микропримесей Sr и TR, тогда как уранпироклор отсутствует. Встречается лишь урансодержащий пироклор (возможно, реликты?) в ядрах кристаллов фторкальциопироклора (Недосекова и др., 2018). Вариации составов пироклоров, мас. %: 52.0–67.0 – Nb₂O₅, 6.0–15.0 – CaO, 0.0–7.1 – Na₂O, 0.0–0.3 – Ta₂O₅, 3.2–5.0 – TiO₂, 1.3–4.9 – РЗЭ, 0.0–3.7 – U₃O₈, 0.3–0.8 – ThO₂, 1.0–5.0 – SrO, 0.5–5.2 – F.

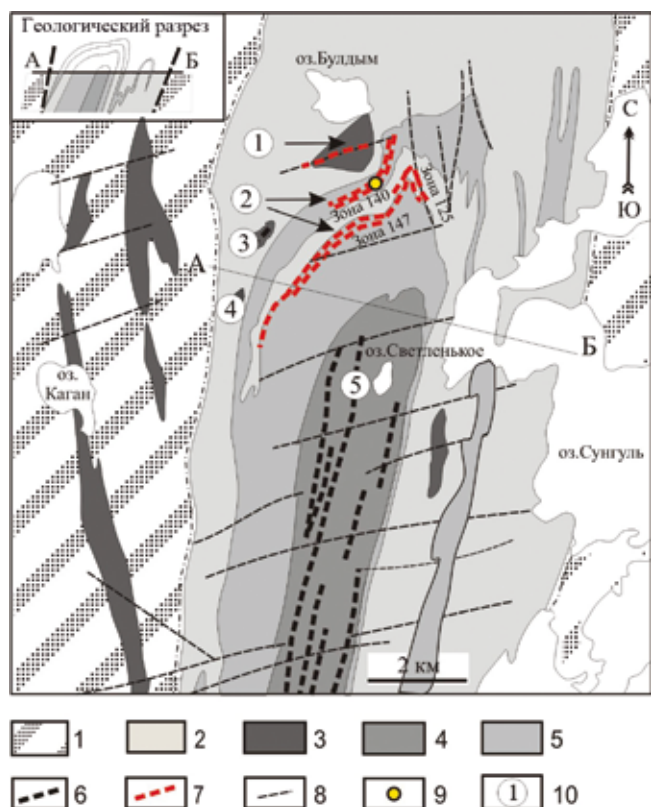


Рис. 2. Схема геологического строения северной части Ильмено-Вишневогорского комплекса, Южный Урал (Левин и др., 1997).

1 – плагиосланцы и кварциты (R_{1-2}); 2 – плагиогнейсы и амфиболиты (PR_1); 3 – ультрабазиты; 4 – щелочные породы Центральной щелочной полосы (фениты, миаскиты, сиениты, силикатно-карбонатные породы, карбонатиты); 5 – миаскиты Вишневогорского массива; 6 – зоны силикатно-карбонатных пород и карбонатитов с редкометалльной минерализацией (пироксеном, цирконом и др.); 7 – рудные зоны Вишневогорского ниобиевого месторождения; 8 – линии тектонических нарушений; 9 – точка отбора пробы карбонатитов Рудной зоны 140 (обр. 140-39); 10 – месторождения и рудопроявления пироксеновых карбонатитов ИВК (цифры в кружках: 1 – Будымское, 2 – Вишневогорское, 3 – Спирихинское, 4 – Халдихинское, 5 – Светлинское).

Fig. 2. Geological sketch map of the northern part of the Ilmeno-Vishnevogorsky complex, the Southern Urals (Levin et al., 1997).

1 – plagioclase and quartzites (R_{1-2}); 2 – plagiogneisses, amphibolites (PR_1); 3 – ultrabasic rocks; 4 – alkaline rocks of the Central alkaline belt (fenites, miaskites, carbonatites); 5 – miaskites of the Vishnevogorsky massif; 6 – zones of silicate-carbonate rocks and carbonatites with rare metal mineralization (pyrochlore, zircon, etc.); 7 – ore zones of Vishnevogorsky Nb-deposit; 8 – fault; 9 – point of sampling (sample 140-39); 10 – deposits and ore occurrences of the IVC pyrochlore carbonatites (figures in circles: 1 – Buldymское, 2 – Vishnevogorskoe, 3 – Spirikhinskoe, 4 – Haldihinskoe, 5 – Svetlinskoe).

Возраст карбонатитов рудной зоны 147, полученный Sm-Nd изохронным методом по минералам и валовому составу (5 точек – кальцит, апатит, пироксенол, биотит, вал), составляет 425 ± 44 млн лет (Недосекова, Беляцкий, 2012) и близок возрасту миаскитов и Севитов I. Необходимо отметить, что в отличие от Севитов I первичный циркон (с U-Pb возрастом 416 ± 6 млн лет) сохраняется здесь лишь в виде реликтов и обрастает каймами более молодого новообразованного циркона (с U-Pb возрастом 280 млн лет) (Недосекова и др., 2016). U-Pb возраст пироксенола 255–230 млн лет (Беляцкий и др., 2018), как и возраст новообразованного циркона, соответствует постколлизийному этапу развития Уральской складчатой области (Пучков и др., 2010).

Наиболее богатая рудная зона 140 Вишневогорского месторождения находится за пределами Вишневогорского массива (см. рис. 2) в подошве маломощного сателлитного тела миаскитов и сложена субширотной системой жил миаскитовых пегматоидов и крупнозернистых жильных карбонатитов, представляющих собой тела выполнения зонального строения (рис. 3). В эндоконтактах жил карбонатитов – полевые шпаты и биотит, редко кальцит, пироксенол, циркон, а центр выполнен агрегатом кальцита с пироксеном, апатитом, ильменитом, пирротинитом, пиритом (размеры кристаллов до н см), также встречаются бастнезит, анкилит, стронцианит.

Необходимо отметить, что пироксенолы карбонатитов рудной зоны 140, в отличие от карбонатитов рудной зоны 147, не содержат реликтов ранних генераций и представлены крупными новообразованными кристаллами размером до нескольких сантиметров, красно-бурого цвета, обычно однородными, реже – с зональностью (рис. 4). По составу это фторкальцийпироксенолы с очень низкими содержаниями микроэлементов, в том числе урана, с вариацией составов, мас. %: 56.9–65.7 – Nb_2O_5 , 13.6–15.6 – CaO, 4.5–7.8 – Na_2O , 0.6–3.2 – Ta_2O_5 , 3.0–8.3 – TiO_2 , 1.35–1.70 (редко до 5.7) – P_2O_5 , 0.02–0.50 – U_3O_8 , 0.19–1.80 – ThO_2 , 0.15–0.80 – SrO, 2.9–5.6 – F.

Изотопно-геохронологических исследований возраста карбонатитов рудной зоны 140 ранее не проводилось.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В целях определения возраста карбонатитов и связанного с ними ниобиевого оруденения проведены измерения Sm-Nd и Rb-Sr изотопных составов и концентраций элементов в пироксеновых карбонатитах и слагающих их минералах рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения ИВК (обр. 140-39).

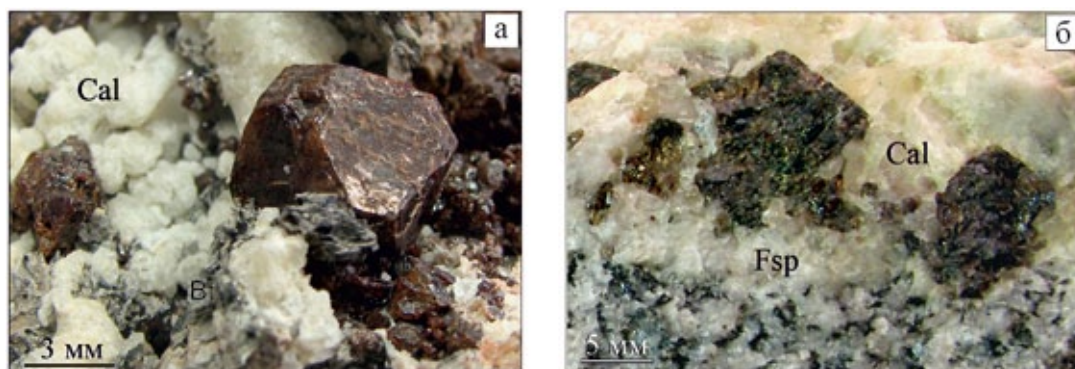


Рис. 3. Кристаллы пироклора с биотитом (Bt) и кальцитом (Cal) из карбонатитовой жилы рудной зоны 140, Вишневогорское месторождение, ИВК, Южный Урал. Фото В.А. Попова.

а – типичный вид кристаллов пироклора (кальцит частично подтравлен HCl); б – сечение жилы карбонатитов зонального строения: в эндоконтактах – полевые шпаты и биотит, центр выполнен агрегатом кальцита с пироклором.

Fig. 3. Pyrochlore crystals with biotite (Bt) and calcite (Cal) in carbonatite veins from Ore Zone 140, Vishnevogorsky Nb-deposit, IVC, Urals. Photo: V.A. Popov.

а – typical appearance of pyrochlore crystals (calcite partially HCl dissolved); б – cross section of the zonal carbonatite vein: in the endocontact vein – feldspar and biotite, and center consists of aggregate of calcite with pyrochlore.

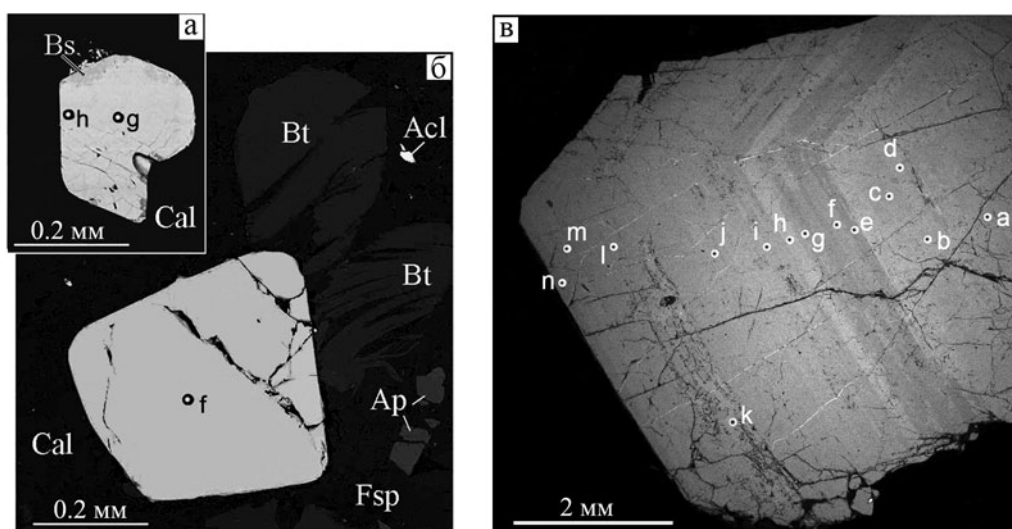


Рис. 4. Кристаллы фторкальциопироклора из карбонатитов рудной зоны 140, Вишневогорское месторождение, ИВК, Южный Урал. BSE-фото И.А. Блинова.

а, б – однородные по составу; в – зональный кристалл пироклора с зонами фторкальциопироклора, оксикальциопироклора и частичной гидратации. Минералы: Cal – кальцит, Bt – биотит, Fsp – полево шпат, Ap – фторапатит, Bs – бастнезит-(La), Acl – анкерит-(La).

Fig. 4. Fluorcalciopyrochlore from carbonatites of Ore Zone 140, Vishnevogorsky Nb-deposit, IVC, Southern Urals. BSE-photo: I.A. Blinov.

а, б – homogeneous fluorcalciopyrochlore; в – zonal crystal of pyrochlore with zones of fluorcalciopyrochlore and oxycalciopyrochlore, and partly hydrated. Minerals: Cal – calcite, Bt – biotite, Fsp – feldspar, Ap – fluorapatite, Bs – bastnezite-(La), Acl – ankerite-(La).

Изученная проба № 140-39 представлена крупнозернистым кальцитовым карбонатитом, содержащим биотит, пироклор, апатит, пирротин, пирит (см. рис. 3). Sm-Nd и Rb-Sr изотопные составы

определены в валовой пробе и в четырех минералах (кальците, апатите, биотите, пироклоре).

Методы исследования: изотопное разбавление и масс-спектрометрия высокого разрешения

(TRITON, Finnigan MAT-262). Для химической подготовки проб использованы навески мелко растертых образцов массой 150–300 мг.

Измерения изотопного состава и концентраций Sm и Nd проводились на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 RPQ (TIMS) в статическом режиме (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты). Изотопные отношения были нормализованы по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$. Внешний контроль погрешностей регистрируемых отношений выполнялся путем измерения стандарта JNdi-1. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd = 0.3 нг, по Sm = 0.06 нг. Методика определения изотопного состава Nd более детально описана в работе (Ваунова et al., 2019).

Измерения изотопного состава и концентраций Rb и Sr проводились на термоионизационном масс-спектрометре TRITON Plus (ЦКП “Геоаналитик”, ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Для контроля инструментальной стабильности и краткосрочной

воспроизводимости использовали изотопный стандарт стронция NIST SRM 987. Содержания Sr и Rb в пробе холостого опыта составили 0.3 и 0.05 нг соответственно. Изотопные отношения были нормализованы по отношению $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.3752$.

Вычисление параметров изохрон проводилось с помощью программного комплекса ISOPLOT (Ludwig, 2008). При расчете Sm-Nd и Rb-Sr изохрон использовались реальные ошибки измерения изотопного состава Nd и Sr, но не ниже уровня воспроизводимости измерения изотопного состава Nd (0.003%), $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ (0.3%) и изотопного состава Sr (0.002%), $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (0.5%).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты исследований Rb-Sr и Sm-Nd изотопных составов минералов и валового состава карбонатита (обр. 140-39) представлены в табл. 1, результаты вычисления изохрон – на рис. 5, 6.

Таблица 1. Sm-Nd и Rb-Sr изотопные данные для пироксеновых карбонатитов Рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения, ИБК

Table 1. Sm-Nd and Rb-Sr data for carbonatites of the Ore Zone 140, Vishnevogorskoe deposit, IVC

№ п/п	№ образца	Минерал или порода	Sm, мкг/г	Nd, мкг/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	2σ %	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ abs
1	140-39 WR	Вал	36.9	246	0.0905	0.3	0.512225	0.000006
2	140-39 Ap	Апатит	203	1427	0.0861	0.3	0.512207	0.000006
3	140-39 Prx	Пироксид	104.3	930	0.0677	0.3	0.512187	0.000006
4	140-39 Ca	Кальцит	71.1	172.6	0.2489	0.3	0.512457	0.000012
5	140-39 Bt	Биотит	0.109	0.582	0.1129	0.3	0.512259	0.000001
№ п/п	№ образца	Минерал или порода	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	2σ %	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ abs
1	140-39 WR	Вал	173	8414	0.05938	0.04	0.704604	0.000012
2	140-39 Ap	Апатит	1.2	9095	0.00039	2.77	0.704388	0.000012
3	140-39 Prx	Пироксид	1.5	8332	0.00051	1.92	0.704389	0.000012
4	140-39 Ca	Кальцит	4.0	11092	0.00105	0.71	0.704401	0.000014
5	140-39 Bt	Биотит	987	159	18.117	0.01	0.768940	0.000014

Примечание. Измерения изотопного состава Sm и Nd проводились на семиканальном масс-спектрометре Finnigan MAT-262 RPQ (TIMS) в статическом режиме (ГИ КНЦ, г. Апатиты). Среднее значение отношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте JNdi-1 за период измерений составило 0.512090 ± 13 (N = 9). Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ отношениях составляет 0.3% (2σ) – среднее значение из 7 измерений в стандарте BCR-2 (Raczek et al., 2003). Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе – до 0.005%, а для минералов с низкими концентрациями неодима и самария – до 0.01%. Холостое внутрилабораторное загрязнение по Nd = 0.3 нг, по Sm = 0.06 нг. Точность определения концентраций Sm и Nd $\pm 0.5\%$. Измеренные изотопные отношения были нормализованы по отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$, а затем пересчитаны на отношение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в стандарте JNdi-1 = 0.512115 (Tanaka et al., 2000). Измерения изотопных отношений Rb и Sr выполнены на термоионизационном масс-спектрометре Triton Plus (Thermo Finnigan) (ЦКП “Геоаналитик”, ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург). Стронций наносили на ренийевую ленту в 1 мкл HNO_3 с активатором Ta_2O_5 (одноленточный режим, 90 циклов), Rb – на ренийевую ленту в 1 мкл HNO_3 (двухленточный режим, 15 циклов). Для контроля инструментальной стабильности и краткосрочной воспроизводимости использовали изотопный стандарт стронция NIST SRM 987 с результирующим значением $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ на период измерений 0.710250 ± 11 (1SD, N = 6). Содержания Sr и Rb в пробе холостого опыта составили 0.3 и 0.05 нг соответственно. Изотопные отношения были нормализованы по отношению $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.3752$.

Note. Measurements of the Sm and Nd isotopic composition were performed on a seven-channel Finnigan MAT-262 RPQ (TIMS) mass spectrometer in static mode (GI KNC, Apatity). The average value of the $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratio in the JNdi-1 standard for the measurement period was 0.512090 ± 13 (N = 9). The error in the $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ratio is 0.3% (2σ)-the average of 7 measurements in the BCR-2 standard (Raczek et al., 2003). The error of measuring the isotopic composition of Nd in individual analysis is up to 0.005%, and for minerals with low concentrations of neodymium and samarium – up to 0.01%. Idle intra-laboratory contamination for Nd = 0.3 ng, for Sm = 0.06 ng. The accuracy of Sm and Nd concentrations is $\pm 0.5\%$. The measured isotope ratios were normalized to $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$, and then recalculated to $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ in the JNdi-1 standard = 0.512115 (Tanaka et al., 2000). Measurements of the Rb and Sr isotope ratios were performed

using a Triton Plus thermionic mass spectrometer (Thermo Finnigan) (Geoanalytic Center, IGG UrO RAS, Ekaterinburg). Sr was applied to a rhenium tape in 1 μ l HNO₃ with the activator Ta₂O₅ (single-film mode, 90 cycles), Rb – to a rhenium tape in 1 μ l HNO₃ (two-film mode, 15 cycles). To control the instrumental stability and short-term reproducibility, the strontium isotope standard NIST SRM 987 was used with the resulting value of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for the measurement period 0.710250 ± 11 (1SD, N = 6). The Sr and Rb contents in the sample of the idle experiment were 0.3 and 0.05 ng, respectively. The isotope ratios were normalized with the ratio $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.3752$.

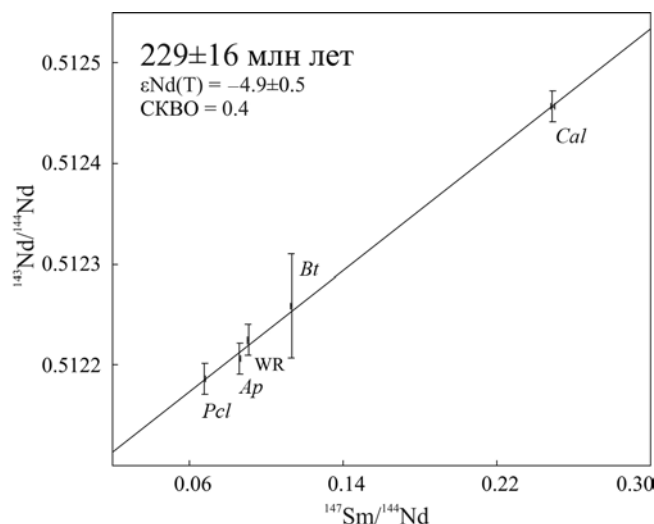


Рис. 5. Минеральная Sm-Nd изохрона для пироклоровых карбонатитов, Рудная зона 140, Вишневогорское Nb месторождение, ИВК.

Cal – кальцит, Bt – биотит, Ap – апатит, Pcl – пироклор, WR – валовая проба карбонатитов.

Fig. 5. Mineral Sm-Nd-isochron for pyrochlore carbonatites, the Ore Zone 140, Vishnevogorsкое Nb deposit, IVC.

Cal – calcite, Bt – biotite, Ap – apatite, Pcl – pyrochlore, WR – whole rock.

Sm-Nd изохрона для пироклоровых карбонатитов (обр. 140-39), построенная по пяти точкам, четыре из которых соответствуют изотопным составам минералов (кальцита, апатита, биотита и пироклора) и одна – валовой пробе, показала возраст 229 ± 16 млн лет, CKBO = 0.4, $\epsilon\text{Nd}_{229} = -4.9 \pm 0.5$, соответствующий среднему триасу (T_2) (см. рис. 5).

Rb-Sr изотопные составы минералов (кальцита, апатита, биотита и пироклора) и валового состава пробы 140-39 образуют изохрону с близким возрастом 250.5 ± 1.2 млн лет (T_1), CKBO = 0.49 и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{250} = 0.70439$ (см. рис. 6).

Начальный изотопный состав Nd и Sr исследованной пробы карбонатитов ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{250} = 0.70439$, $\epsilon\text{Nd}_{229} = -4.9$) соответствует обогащенным мантийным изотопным составам, отличаясь от умеренно деплетированных составов миаскитовых массивов ИВК ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{440} = 0.70336-0.70380$, $\epsilon\text{Nd}_{440} = +2.9...+5.8$ (Недосекова и др., 2009; Nedosekova et al., 2013)) более радиогенным изотопным составом Sr и нерадиогенным – Nd, что, вероятно, связа-

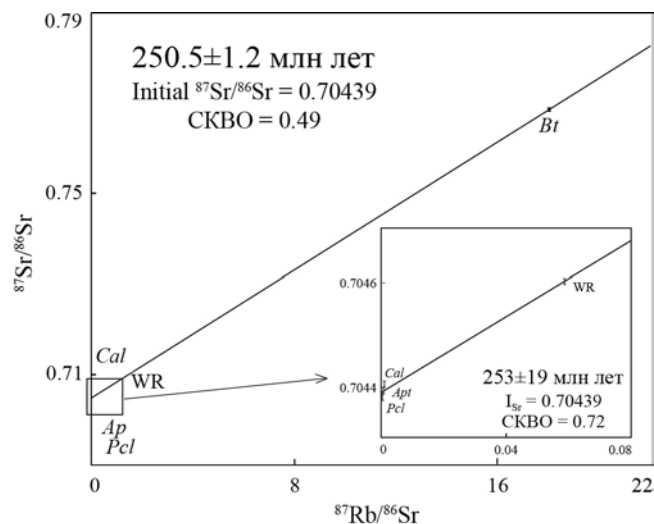


Рис. 6. Минеральная Rb-Sr изохрона для пироклоровых карбонатитов, Рудная зона 140, Вишневогорское Nb месторождение, ИВК.

Условные обозначения – см. рис. 5.

Fig. 6. Mineral Rb-Sr-isochron for pyrochlore carbonatites, the Ore Zone 140, Vishnevogorsкое Nb deposit, IVC.

Legend – see Fig. 5.

но с процессами контаминации и примесью компонентов коры.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее полученные изотопно-геохронологические данные для миаскитов ИВК соответствуют двухстадийной модели их формирования, обоснованной У. Краммом с соавторами (Kramm et al., 1983) в связи с получением бинарного возраста на основе Rb-Sr изохронного датирования: ордовикского (440–446 млн лет) по валовым пробам миаскитов и пермского (244–255 млн лет) – по минеральным изохронам миаскитов. Идентичные возраста двух этапов формирования также были получены по цирконам для миаскитов и ранних карбонатитов ИВК (417–432 млн лет, S_{1-2}) и (250–280 млн лет, P_{1-3}) (Чернышев и др., 1987; Краснобаев и др., 2010а, 2016; Недосекова и др., 2010, 2014; 2016). Согласно (Kramm et al., 1983; Чернышев и др., 1987), первая дата отражает возраст интрузии и кристаллизации щелочно-го расплава, вторая – возраст термального события,

потери цирконами радиогенного свинца и закрытия Rb-Sr системы при охлаждении после завершения герцинской орогении.

Использование Sm-Nd изотопной системы как одной из наиболее устойчивых и имеющей наиболее высокие температуры закрытия (Скляр и др., 2001) показало силурийский возраст 425 ± 44 млн лет карбонатитов Вишневогорского массива (Недосекова, Беляцкий, 2012), подтверждающий, что карбонатиты в ИВК кристаллизовались одновременно с миаскитами и являются продуктами эволюции миаскитовых расплавов (Недосекова и др., 2009, 2012; Nedosekova et al., 2013).

Кроме того, необходимо отметить, что ранее изохронным датированием пробы карбонатитов Вишневогорского массива были получены несогласующиеся между собой значения Sm-Nd возраста (388 ± 52 млн лет) и Rb-Sr возраста (252 ± 2 млн лет) (Иванов и др., 2010), что соответствует концепции различных температур закрытия этих изотопных систем (Dodson, 1973) и может быть связано с твердофазовой диффузией радиогенных изотопов в структурах минералов при термальном воздействии и последующем охлаждении (Jenkin et al., 1995; Ganguly et al., 1998).

Проведенное нами изохронное датирование с использованием двух (Sm-Nd и Rb-Sr) изотопных систем для пробы карбонатитов ИВК показало достаточно близкие значения Sm-Nd возраста (229 ± 16 млн лет) и Rb-Sr возраста (250.0 ± 1.2 млн лет), не соответствующие метаморфической концепции термального воздействия и последующего охлаждения, предполагающей различные температуры закрытия для различных изотопных систем, и, как следствие, несогласующиеся (обычно уменьшающиеся) значения Sm-Nd и Rb-Sr возрастов для одной и той же породы при ее охлаждении. Полученные данные свидетельствуют о том, что пироксеновые карбонатиты рудной зоны 140 могли сформироваться в результате нового процесса кристаллизации на этапе постколлизийного растяжения.

Необходимо отметить, что близкие значения возрастов, полученные для пород и минералов ИВК с использованием различных изотопных систем (250–280 млн лет – по U-Pb изотопным системам цирконов миаскитов и карбонатитов; 229 ± 16 – по Sm-Nd минеральной изохроне карбонатитов; 244–255 млн лет – по Rb-Sr минеральным изохронам миаскитов) могут фиксировать эксгумацию ИВК – выведение пород комплекса на близповерхностный уровень в результате коллизийной тектоники на завершающем этапе Уральской коллизии. Быстрое остывание пород комплекса в результате эксгумации приводит к сближению возрастов, полученных по разным изотопным системам с различающимися температурами закрытия. При этом в процессе эксгумации и последующей релаксации,

сопровожаемых пластическими деформациями, декомпрессией, повышением температуры и участием флюидов, породы ИВК могли подвергнуться частичному плавлению, растворению и переотложению породообразующих и рудных минералов.

ВЫВОДЫ

С использованием Sm-Nd и Rb-Sr изотопных систем определен возраст пироксеновых карбонатитов Рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения ИВК. Минеральная Sm-Nd изохрона (5 точек) показала возраст 229 ± 16 млн лет, минеральная Rb-Sr-изохрона (5 точек) показала близкий возраст 250.5 ± 1.2 млн лет.

Результаты датирования свидетельствуют о том, что карбонатиты наиболее богатой пироксеном рудной зоны 140 кристаллизовались ≈ 250 –230 млн лет назад, возможно, в результате эксгумации комплекса, сопровождающейся процессами частичного плавления, растворения и переотложения вещества ордовикско-силурийских щелочно-карбонатитовых комплексов, – почти на 200 млн лет позднее, чем внедрение и кристаллизация (440–420 млн лет) щелочных и карбонатитовых расплавов ИВК.

Таким образом, процессы карбонатито- и рудообразования в ИВК, начавшиеся в силуре (Чернышев и др., 1987; Краснобаев 2010, 2016; Недосекова и др., 2010, 2014, 2016, 2018; Беляцкий и др., 1918), продолжались на границе перми и триаса и, вероятно, были связаны с новым этапом тектонической активизации и новым этапом рудогенеза на постколлизийной стадии развития Уральской складчатой области.

Благодарности

Авторы выражают глубокую признательность коллективам лаборатории геохронологии ИГ КНЦ РАН и ФХМИ ИГТ УрО РАН за проведение изотопных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженов А.Г. (1997) Особенности распределения циркония в Ильменогорском миаскитовом массиве и вопросы генезиса миаскитов. *Урал. минерал. сб.*, 7. Миасс: УрО РАН, 72-79.
- Баженов А.Г. (2006) К вопросу о генезисе миаскитов. *Геохимия, петрология, минералогия и генезис щелочных пород. Тез. Всерос. сов.* Миасс: УрО РАН, 21-25.
- Беляцкий Б.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Родионов Н.В., Недосекова И.Л., Петров О.В., Шевченко С.С., Сергеев С.А. (2018) О возрасте Nb-редкометалльного оруднения Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Южный Урал). *Докл. АН*, 481(6), 67-73. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080251>.
- Золотов К.К., Левин В.Я., Мормиль С.И., Шардакова Г.Ю. (2004) Минерогения и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екате-

- ринбург: Мин-во природных ресурсов РФ, 336 с.
- Иванов К.С. (2011) О природе карбонатитов Урала. *Литосфера*, (1), 20-33. <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/861/860>.
- Иванов К.С., Вализер П.М., Ерохин Ю.В., Погромская О.Э. (2010) О генезисе карбонатитов складчатых поясов (на примере Урала). *Докл. АН*, **435**(2), 218-222. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110036>.
- Кононова В.А., Донцова Е.И., Кузнецова Л.Д. (1979) Изотопный состав кислорода и стронция Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса и вопросы генезиса миаскитов. *Геохимия*, (12), 1784-1795.
- Краснобаев А.А., Вализер П.М., Бушарина С., Лепехина Е.Н., Медведева Е.В. (2016) Цирконология миаскитов Ильменских гор (Южный Урал). *Геохимия*, (9), 797-813. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070041>.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Бушарина С.В., Лепехина Е.Н., Медведева Е.В. (2010а) Цирконология амфиболовых миаскитов Ильменогорского массива (Южный Урал). *Докл. АН*, **430**(2), 227-231.
- Краснобаев А.А., Русин А.И., Вализер П.М., Бушарина С.В. (2010б) Цирконология кальцитовых карбонатитов Вишневогорского массива (Южный Урал). *Докл. АН*, **431**(3), 382-385. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10030268>.
- Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П. (1997) Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Уралгеолком, 270 с.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Беляцкий Б.В. (2014) U-Pb возраст и Lu-Hf изотопные системы цирконов Ильмено-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса, Южный Урал. *Литосфера*, (5), 19-32. <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/406/405>.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Беляцкий Б.В. (2015) Изотопный состав гафния и редкие элементы как идентификаторы генезиса циркона при эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал, Россия). *Докл. АН*, **461**(5), 569-574. <https://doi.org/10.15372/GiG20160604>.
- Недосекова И.Л., Белоусова Е.А., Шарыгин В.В. (2010) Источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса по данным Lu-Hf-изотопии в цирконах. *Докл. АН*, **435**(2), 234-239. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110176>.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В. (2012) Возраст и источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Ю. Урал): изотопные Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb и Lu-Hf данные. *Докл. АН*, **446**(1), 71-76. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12090061>.
- Недосекова И.Л., Беляцкий Б.В., Белоусова Е.А. (2016) Редкие элементы и изотопный состав гафния как индикаторы генезиса циркона при эволюции щелочно-карбонатитовой магматической системы (Ильмено-Вишневогорский комплекс, Урал, Россия). *Геология и геофизика*, **57**, 1135-1154. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.021>.
- Недосекова И.Л., Владыкин Н.В., Прибавкин С.В., Баянова Т.Б. (2009) Ильмено-Вишневогорский миаскит-карбонатитовый комплекс: происхождение, рудоносность, источники вещества (Урал, Россия). *Геология рудн. месторождений*, **51**(2), 157-181.
- Недосекова И.Л., Коротеев В.А., Баянова Т.Б., Беляцкий Б.В. (2018) Источники рудного вещества карбонатитовых комплексов Уральской складчатой области (по данным Rb-Sr и Sm-Nd изотопии). *Докл. АН*, **480**(5), 578-582. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060156>.
- Прибавкин С.В., Недосекова И.Л. (2006) Источники вещества карбонатитов Ильмено-Вишневогорского комплекса по данным изотопии Sr, Nd в карбонатах. *Докл. АН*, **408**(3), 385-388. <https://doi.org/10.1134/S1028334X0604026X>.
- Пучков В.Н. (2010) Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 280 с.
- Русин А.И., Вализер П.М., Краснобаев А.А., Банева Н.Н., Медведева Е.В., Дубинина Е.В. (2012) Природа гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовых пород ильменогорского комплекса (Южный Урал). *Литосфера*, (1), 91-109. <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/784/783>.
- Скляров Е.В., Гладкохуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Летникова Е.Ф., Миронов А.Г., Бараш И.Г., Буланов В.А., Сизых А.И. (2001) Интерпретация геохимических данных. М.: Интермет Инжиниринг, 228 с.
- Чернышев И.В., Кононова В.А., Крамм У., Грауэрт Б. (1987) Изотопная геохронология щелочных пород Урала в свете данных уран-свинцового метода по цирконам. *Геохимия*, (3), 323-338.
- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. (2010) The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *Canad. Mineral.*, **48**, 673-698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.67>.
- Attoh K., Corfu F., Nudde P.M. (2007) U-Pb zircon age of deformed carbonatite and alkaline rocks in the Pan-African Dahomeyide suture zone, West Africa. *Precamb. Res.*, **155**, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.02.003>.
- Bayanova T., Korchagin A., Mitrofanov A., Serov P., Eki-mova N., Nitkina E., Kamensky I., Elizarov D., Huber M. (2019) Long-lived mantle plume and polyphase evolution of Palaeoproterozoic PGE intrusions in the Fennoscandian Shield. *Minerals*, **9**(1), 59. <https://doi.org/10.3390/min9010059>.
- Biswal T.K., Waele B.D., Ahuja H. (2007) Timing and dynamics of the juxtaposition of the Eastern Ghats Mobile Belt against the Bhandara Craton, India: A structural and zircon U-Pb SHRIMP study of the fold-thrust belt and associated nepheline syenite plutons. *Tectonics*, **26**(4), TC4006. <https://doi.org/10.1029/2006TC002005>.
- Burke K., Ashwal L.D., Webb S.J. (2003) New way to map old sutures using deformed alkaline rocks and carbonatites. *Geology*, **31**(5), 391-394. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0391:NWTMOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0391:NWTMOS>2.0.CO;2).
- Campbell L.S., Compston W., Sircombe K.N., Wilkinson C.C. (2014) Zircon from the East Orebody of the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, China, and SHRIMP ages for carbonatite-related magmatism and REE mineralization events. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **168**, 1048-1064. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1041-3>.
- Dodson M.H. (1973) Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mine-*

- ral. Petrol.*, **40**, 259-274.
- Emmanuel N.N., Rigobert T., Nédélec A., Siqueira R., Pouclet A., Bascou J. (2013) Structure and petrology of Pan-African nepheline syenites from the South West Cameroon; Implications for their emplacement mode, petrogenesis and geodynamic significance. *African Earth Sci.*, **87**, 44-58. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2013.07.008>.
- Ganguly J., Tirone M., Hervig R.L. (1998) Diffusion kinetics of samarium and neodymium in garnet, and a method for determining cooling rates of rocks. *Science*, **281**, 805-807. <https://doi.org/10.1126/science.281.5378.805>.
- Hogarth D.D. (1977) Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *Amer. Miner.*, **62**, 403-410.
- Hou Z.Q., Tian S.H., Yuan Z.X., Xie Y.L., Yin S.P., Yi L.S., Fei H.C., Yang Z.M. (2006) The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 234-250. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.052>.
- Jenkin G.R.T., Rogers G., Fallick A.E. (1995) Rb-Sr cloussure temperatures in bi-mineralic rocks: a mode effect and test for different diffusion models. *Chem. Geol.*, **122**, 227-240.
- Kramm U., Blaxland A.B., Kononova V.A., Grauert B. (1983) 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.*, **91**, 427-435.
- Kramm U., Chernyshev I.V., Grauert S., Kononova V.A., Brecker V. (1993) Zircon typology and U-Pb systematics: a Case Study of zircons from nefeline syenite of the Il'meny Mountains, Ural. *Petrology*, **1**(5), 474-485.
- Mitchell R.H. (2005) Carbonatites, and carbonatites and carbonatites. *Canad. Mineral.*, **43**, 2049-2068. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2049>.
- Nedosekova I.L., Belousova E.A., Sharygin V.V., Belyatsky B.V., Bayanova T.B. (2013) Origin and evolution of the Il'meno-Vishnevogorsk carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-elements compositions, Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb and Lu-Hf isotope data. *Mineral. Petrol.*, **107**, 101-123. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0223-9>.
- Ludwig K.R. (2008) ISOPLOT/Ex – A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 3.6. *Berkeley Geochronology Center Spec. Publ.*, **4**, 76 p.
- Poletti J.E., Cottle J.M., Hagen-Peter G.A., Lackey J.S. (2016) Petrochronological constraints on the origin of the Mountain Pass ultrapotassic and carbonatite intrusive suite, California. *J. Petrol.*, **57**(8), 1555-1598. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw050>.
- Raczek I., Jochum K.P., Hofmann A.W. (2003) Neodymium and strontium isotope data for USGS reference materials BCR-1, BCR-2, BHVO-1, BHVO-2, AGV-1, AGV-2, GSP-1, GSP-2 and eight MPI-DING reference glasses. *Geostand. Geoanal. Res.*, **27**, 173-79. DOI: 10.1111/j.1751-908X.2003.tb00644.x.
- Rodionov N.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. (2012) Comparative in-situ U-Th-Pb geochronology and trace element composition of baddeleyite and low-U zircon from carbonatites of the Paleozoic Kovdor alkaline-ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. *Gondw. Res.*, **21**, 728-744. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.005>.
- Tanaka T., Togashi S., Kamioka H., Amakawa H., Kagi H., Hamamoto T., Yuhara M., Orihashi Y., Yoneda S., Shimizu H., Kunimaru T., Takahashi K., Yanagi T., Nakano T., Fujimaki H., Shinjo R., Asahara Y., Tanimizu M., Dragusanu C. (2000) JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chem. Geol.*, **168**, 279-281. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00198-4.
- Vetrin V.R., Skublov S.G., Balashov A., Lyalina L.M., Rodionov N.V. (2014) Time of formation and genesis of yttrium-zirconium mineralization in the Sakharjok massif, Kola Peninsula. *Geol. Ore Deposits*, **56**(8), 603-616. <https://doi.org/10.1134/S107570151408011X>.
- Ye H.-M., Li X.-H., Lan Zh.-W. (2013) Geochemical and Sr-Nd-Hf-O-C isotopic constraints on the origin of the Neoproterozoic Qieganbulake ultramafic-carbonatite complex from the Tarim Block, Northwest China. *Lithos*, **182**, 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.002>.
- Ying Y., Chen W., Lu J.I.O., Jiang S., Yanget Y. (2017) In situ U-Th-Pb ages of the Miaoya carbonatite complex in the South Qinling orogenic belt, central China. *Lithos*, **290**, 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.003>.

REFERENCES

- Atencio D., Andrade M.B., Christy A.G., Giere R., Kartashov P.M. (2010) The pyrochlore supergroup of minerals: nomenclature. *Canad. Mineral.*, **48**, 673-698. <https://doi.org/10.3749/canmin.48.3.67>.
- Attah K., Corfu F., Nudde P.M. (2007) U-Pb zircon age of deformed carbonatite and alkaline rocks in the Pan-African Dahomeyide suture zone, West Africa. *Precamb. Res.*, **155**, 251-260. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.02.003>.
- Bayanova T., Korchagin A., Mitrofanov A., Serov P., Eki-mova N., Nitkina E., Kamenskiy I., Elizarov D., Huber M. (2019) Long-lived mantle plume and polyphase evolution of Palaeoproterozoic PGE intrusions in the Fennoscandian Shield. *Minerals*, **9**(1), 59. <https://doi.org/10.3390/min9010059>.
- Bazhenov A.G. (1997) The distribution of zirconium in Il'menogorsk miaskite massif and questions of the Genesis of miaskites. *Ural'skii Mineral. Sbornik*, Miass, URO RAN, **7**, 72-79. (In Russian)
- Bazhenov A.G. (2006) On miaskit genesis. *Geokhimiya, petrologiya, mineralogiya i genezis shchelochnykh rodov. Tezisy Vseross. soveshch.* [Geochemistry, petrology, mineralogy and genesis of alkaline rocks. Abstracts of All-Russian Conf.]. Miass, UB RAS, 21-25. (In Russian)
- Belyatskii V.V., Lepekhina Ye.N., Antonov A.V., Rodionov N.V., Nedosekova I.L., Petrov O.V., Shevchenko S.S., Sergeev S.A. (2018) On age of Nb-rare-earth mineralization of Ilmeny-Vishnevogorsk alkaline complexes (the Southern Urals) *Dokl. Akad. Nauk*, **481**(6), 67-73. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18080251>. (In Russian)
- Biswal T.K., Waele B.D., Ahuja H. (2007) Timing and dynamics of the juxtaposition of the Eastern Ghats Mobile Belt against the Bhandara Craton, India: A structural and zircon U-Pb SHRIMP study of the fold-thrust belt and associated nepheline syenite plutons. *Tectonics*, **26**(4), TC4006. <https://doi.org/10.1029/2006TC002005>.
- Burke K., Ashwal L.D., Webb S.J. (2003) New way to map old sutures using deformed alkaline rocks and carbonatites.

- Geology*, **31**(5), 391-394. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0391:NWTMOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0391:NWTMOS>2.0.CO;2).
- Campbell L.S., Compston W., Sircombe K.N., Wilkinson C.C. (2014) Zircon from the East Orebody of the Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, China, and SHRIMP ages for carbonatite-related magmatism and REE mineralization events. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **168**, 1048-1064. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1041-3>.
- Chernyshev I.V., Kononova V.A., Kramm U., Grauert B. (1987) Isotope geochronology of alkaline Urals inside U-Pb method on zircons. *Geokhimiya*, (3), 323-338. (In Russian)
- Dodson M.H. (1973) Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **40**, 259-274.
- Emmanuel N.N., Rigobert T., Nédélec A., Siqueira R., Pouclet A., Bascou J. (2013) Structure and petrology of Pan-African nepheline syenites from the South West Cameroon; Implications for their emplacement mode, petrogenesis and geodynamic significance. *African Earth Sci.*, **87**, 44-58. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2013.07.008>.
- Ganguly J., Tirone M., Hervig R.L. (1998) Diffusion kinetics of samarium and neodymium in garnet, and a method for determining cooling rates of rocks. *Science*, **281**, 805-807. <https://doi.org/10.1126/science.281.5378.805>.
- Hogarth D.D. (1977) Classification and nomenclature of the pyrochlore group. *Amer. Miner.*, **62**, 403-410.
- Hou Z.Q., Tian S.H., Yuan Z.X., Xie Y.L., Yin S.P., Yi L.S., Fei H.C., Yang Z.M. (2006) The Himalayan collision zone carbonatites in western Sichuan, SW China: petrogenesis, mantle source and tectonic implication. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **244**, 234-250. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.01.052>.
- Ivanov K.S. (2011) On Uralian carbonatites nature. *Litosfera*, **1**, 20-33. (In Russian)
- Ivanov K.S., Valizer P.M., Yerokhin Yu.V., Pogromskaya O.Ye. (2010) About genesis of fault belts carbonatites (on the example of the Urals) *Dokl. Akad. Nauk*, **435**(2), 218-222. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110036>. (In Russian)
- Jenkin G.R.T., Rogers G., Fallick A.E. (1995) Rb-Sr clouere temperatures in bi-mineralic rocks: a mode effect and test for different diffusion models. *Chem. Geol.*, **122**, 227-240.
- Kononova V.A., Dontsova Ye.I., Kuznetsova L.D. (1979) The isotopic composition of oxygen and strontium Il'meno-Vishnevogorsky alkaline complex, and questions of genesis of miaskites. *Geokhimiya*, (12), 1784-1795. (In Russian)
- Kramm U., Blaxland A.B., Kononova V.A., Grauert B. (1983) 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.*, **91**, 427-435.
- Kramm U., Chernyshev I.V., Grauert S., Kononova V.A., Brecker V. (1993) Zircon typology and U-Pb systematics: a Case Study of zircons from nefeline syenite of the Il'meny Mountains, Ural. *Petrology*, **1**(5), 474-485.
- Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Busharina S.V., Lepekhi-na Ye.N., Medvedeva Ye.V. (2010a) Zirkonology of Il'menogorsk Massiv amfibol miaskits (the Southern Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **430**(2), 227-231. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Valizer P.M., Busharina S.V. (2010b) Zirkonology of Vishnevogorsk Mas-sive calcite carbonatites (the Southern Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **431**(3), 382-385. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10030268>. (In Russian)
- Krasnobaev A.A., Valizer P.M., Busharina S., Lepekhi-na Ye.N., Medvedeva Ye.V. (2016) Miaskite zirkonology of Il'menskie Mounts (the Southern Urals). *Geokhimiya*, **9**, 797-813. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070041>. (In Russian)
- Levin V.A., Ronenson B.M., Samkov V.S., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P. (1997) *Shchelochno-karbonatnye komplekсы Urala* [Alcaline-carbonatites rocks of the Urals]. Ekaterinburg, Uralgeolkom Publ., 270 p. (In Russian)
- Ludwig K.R. (2008) ISOPLOT/Ex – A geochronological toolkit for Microsoft Excel, Version 3.6. *Berkeley Geochronology Center Spec. Publ.*, **4**, 76 p.
- Mitchell R.H. (2005) Carbonatites, and carbonatites and carbonatites. *Canad. Mineral.*, **43**, 2049-2068. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2049>.
- Nedosekova I.L., Belousova Ye.A., Belyatskiy B.V. (2014) U-Pb age and Lu-Hf isotope systems of zircons of the Ilmen-Vishnevogorsky alkaline-carbonatite complex, the Southern Urals. *Litosfera*, **5**, 19-32. <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/406/405>. (In Russian)
- Nedosekova I.L., Belousova Ye.A., Belyatskiy B.V. (2015) Isotopic composition of hafnium and rare elements as identifiers of zircon genesis during the evolution of the alkaline-carbonatite magmatic system (Ilmen-vishnevogorsky complex, the Urals, Russia) *Dokl. Akad. Nauk*, **461**(5), 569-574. <https://doi.org/10.15372/GiG20160604>. (In Russian)
- Nedosekova I.L., Belousova Ye.A., Sharygin V.V. (2010) Sources of the Ilmen-Vishnevogorsky alkaline complex substance according to Lu-Hf isotopes in zircons *Dokl. Akad. Nauk*, **435**(2), 234-239. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10110176>. (In Russian)
- Nedosekova I.L., Belousova E.A., Sharygin V.V., Belyatskiy B.V., Bayanova T.B. (2013) Origin and evolution of the Il'meny-Vishnevogorsk carbonatites (Urals, Russia): insights from trace-elements compositions, Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb and Lu-Hf isotope data. *Mineral. Petrol.*, **107**, 101-123. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0223-9>.
- Nedosekova I.L., Belyatskii B.V. (2012) Age and sources of the substance of the Ilmen-Vishnevogorsky alkaline complex (S. Urals): isotopic Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb and Lu-Hf data *Dokl. Akad. Nauk*, **446**(1), 71-76. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12090061>. (In Russian)
- Nedosekova I.L., Belyatskii V.V., Belousova Ye.A. (2016) Rare elements and isotopic composition of hafnium as indicators of zircon Genesis during the evolution of the alkaline-carbonatite magmatic system (Ilmen-Vishnevogorsky complex, Urals, Russia). *Geol. Geofiz.*, **57**, 1135-1154. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.021>. (In Russian)
- Nedosekova I.L., Koroteev V.A., Bayanova T.B., Belyatskii B.V. (2018) Sources of ore matter of carbonatite complexes of the Ural folded region (according to Rb-Sr and Sm-Nd isotopes). *Dokl. Akad. Nauk*, **480**(5), 578-582. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060156>. (In Russian)
- Nedosekova I.L., Vladykin N.V., Pribavkin S.V., Bayanova T.B. (2009) Ilmen-Vishnevogorsky miaskite-carbonatite complex: origin, ores, sources (Urals, Russia). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **51**(2), 157-181. (In Russian)

- Poletti J.E., Cottle J.M., Hagen-Peter G.A., Lackey J.S. (2016) Petrochronological constraints on the origin of the Mountain Pass ultrapotassic and carbonatite intrusive suite, California. *J. Petrol.*, **57**(8), 1555-1598. <https://doi.org/10.1093/petrology/egw050>.
- Pribavkin S.V., Nedosekova I.L. (2006) Sources of carbonatites in Il'meno-Vishnevogorsk complex on the Sr-Nd isotopes date *Dokl. Akad. Nauk*, **408**(3), 385-388. <https://doi.org/10.1134/S1028334X0604026X>. (In Russian)
- Puchkov V.N. (2010) *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of Urals and Cis-Urals (modern stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny data)]. Ufa, DizaynPoligrafServis Publ., 280 p. (In Russian)
- Raczek I., Jochum K.P., Hofmann A.W. (2003) Neodymium and strontium isotope data for USGS reference materials BCR-1, BCR-2, BHVO-1, BHVO-2, AGV-1, AGV-2, GSP-1, GSP-2 and eight MPI-DING reference glasses. *Geostand. Geoanalyt. Res.*, **27**, 173-79. DOI: 10.1111/j.1751-908X.2003.tb00644.x.
- Rodionov N.V., Belyatsky B.V., Antonov A.V., Kapitonov I.N., Sergeev S.A. (2012) Comparative in-situ U-Th-Pb geochronology and trace element composition of baddeleyite and low-U zircon from carbonatites of the Paleozoic Kovdor alkaline-ultramafic complex, Kola Peninsula, Russia. *Gondw. Res.*, **21**, 728-744. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.10.005>.
- Rusin A.I., Valizer P.M., Krasnobayev A.A., Baneva N.N., Medvedeva E.V., Dubinina E.V. (2012) Nature of garnet-anorthite-clinopyroxene-amfibole rocks of Il'menogorsky complex (the Southern Urals). *Litosfera*, (1), 91-109. (In Russian)
- Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Ivanov A.V., Letnikova E.F., Mironov A.G., Barash I.G., Bulanov V.A., Sizykh A.I. (2001) *Interpretatsiya geokhimicheskikh dannykh* [Interpretation of geochemical data]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 228 p. (In Russian)
- Tanaka T., Togashi S., Kamioka H., Amakawa H., Kagami H., Hamamoto T., Yuhara M., Orihashi Y., Yoneda S., Shimizu H., Kunimaru T., Takahashi K., Yanagi T., Nakano T., Fujimaki H., Shinjo R., Asahara Y., Tanimizu M., Dragusanu C. (2000) JNdi-1: a neodymium isotopic reference in consistency with LaJolla neodymium. *Chem. Geol.*, **168**, 279-281. DOI: 10.1016/S0009-2541(00)00198-4.
- Vetren V.R., Skublov S.G., Balashov A., Lyalina L.M., Rodionov N.V. (2014) Time of formation and genesis of yttrium-zirconium mineralization in the Sakharjok massif, Kola Peninsula. *Geol. Ore Deposits*, **56**(8), 603-616. <https://doi.org/10.1134/S107570151408011X>.
- Ye H.-M., Li X.-H., Lan Zh.-W. (2013) Geochemical and Sr-Nd-Hf-O-C isotopic constraints on the origin of the Neoproterozoic Qieganbulake ultramafic-carbonatite complex from the Tarim Block, Northwest China. *Lithos*, **182**, 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.10.002>.
- Ying Y., Chen W., Lu J.I.O., Jiang S., Yanget Y. (2017) In situ U-Th-Pb ages of the Miaoya carbonatite complex in the South Qinling orogenic belt, central China. *Lithos*, **290**, 159-171. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.003>.
- Zoloev K.K., Levin V.Ya., Mormil' S.I., Shardakova G.Yu. (2004) *Mineraly i mestorozhdeniya redkikh metallov, molibdena, vol'frama Urala* [Mineralogy and deposits of rare metals, molybdenum, and tungsten in the Urals]. Ekaterinburg, Minprirody RF Publ., 336 p. (In Russian)