



**AGE AND GEODYNAMIC SETTINGS OF MIASKITE-PEGMATITES, CARBONATITES,
AND Nb-Zr MINERALIZATION OF THE ILMENO-VISHNEVOGORSKY ALKALINE COMPLEX,
SOUTH URAL (U-Pb AND Rb-Sr ISOTOPE DATA)**

I.L. Nedosekova , , **V.S. Chervyakovsky** , **M.V. Chervyakovskaya** , **V.A. Bulatov** 

Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 15 Academician Vonsovsky St, Ekaterinburg 620016, Russia

ABSTRACT. The Ilmeno-Vishnevogorsky miaskite-phenite-carbonatite complex (IVC), located in the Urals folded region, is a representative of "linear type" carbonatite complexes, with which Nb-Zr deposits are associated. The ore potential of linear carbonatite complexes, the time and duration of ore-forming processes, and the geodynamic setting remain the subject of discussion. In order to estimate the age and duration of ore formation processes in the IVC, the U-Pb dating of zircon (LA-ICP-MS) from miaskite-pegmatites, as well as Rb-Sr dating of ore-bearing (pyrochlore-bearing) varieties of miaskite-pegmatites and carbonatites (ID-TIMS) were carried out. The U-Pb dating of zircon from the IVC miaskite-pegmatites showed the Permian age (280 ± 8 Ma, P_1 – age of the main zircon generation). The Rb-Sr-mineral isochron of miaskite-pegmatite showed a close age of 274 ± 5 Ma (P_1), confirming the results of U-Pb-dating of miaskite-pegmatites. The Rb-Sr dating of pyrochlore carbonatite varieties (sovites II) showed an age of 250 ± 3 Ma (T_1). The results of Rb-Sr- and U-Pb dating indicate that the processes of pegmatite- and carbonatite formation and the associated Zr-Nb ore formation in IVC occurred at the late collisional and postcollisional stage of development of the Ural folded region. Based on the data obtained, the geodynamic model for the IVC formation was proposed.

KEYWORDS: carbonatites; miaskite-pegmatites; U-Pb and Rb-Sr dating; Ilmeno-Vishnevogorsky complex; the Urals

FUNDING: The research was carried out within the framework of the State Assignment of the Institute of Geology, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, theme AAAA-A18-118052590028-9, using the equipment of the Shared Research Facilities "Geoanalyst" of the Institute of Geology, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The retrofitting and integrated development of the Shared Research Facilities "Geoanalyst" of the Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences is financially supported by the grant of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement 075-15-2021-680).

SHORT COMMUNICATION

Received: June 16, 2022

Revised: June 28, 2022

Accepted: June 29, 2022

Correspondence: Irina L. Nedosekova, vladi49@yandex.ru

FOR CITATION: Nedosekova I.L., Chervyakovsky V.S., Chervyakovskaya M.V., Bulatov V.A., 2022. Age and Geodynamic Settings of Miaskite-Pegmatites, Carbonatites, and Nb-Zr Mineralization of the Ilmeno-Vishnevogorsky Alkaline Complex, South Ural (U-Pb and Rb-Sr Isotope Data). *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0652. doi:10.5800/GT-2022-13-4-0652

ВОЗРАСТ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ МИАСКИТ-ПЕГМАТИТОВ, КАРБОНАТИТОВ И Nb-Zr МИНЕРАЛИЗАЦИИ ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО ЩЕЛОЧНОГО КОМПЛЕКСА, ЮЖНЫЙ УРАЛ (U-Pb И Rb-Sr ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ)

И.Л. Недосекова, В.С. Червяковский, М.В. Червяковская, В.А. Булатов

Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620016, Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, Россия

АННОТАЦИЯ. Ильмено-Вишневогорский миаскиит-фенит-карбонатитовый комплекс (ИВК), расположенный в Уральской складчатой области, является представителем карбонатитовых комплексов «линейного типа», с которым связаны Nb-Zr месторождения. Рудный потенциал карбонатитовых комплексов «линейного типа», время и продолжительность рудообразующих процессов, геодинамическая обстановка их формирования остаются предметом дискуссий. С целью оценки возраста и продолжительности процессов рудообразования в ИВК проведено U-Pb-датирование циркона (метод LA-ICP-MS) из миаскиит-пегматитов, а также Rb-Sr-датирование рудоносных (пироклорсодержащих) разностей миаскиит-пегматитов и карбонатитов (ID-TIMS по минералам и валу породы). U-Pb-датирование циркона миаскиит-пегматитов ИВК показало пермский возраст (280 ± 8 млн лет, P_1 – возраст основной генерации циркона). Rb-Sr-минеральная изохрона для миаскиит-пегматита с близким возрастом – 274 ± 5 млн лет (P_1) – подтверждает результаты датирования миаскиит-пегматитов U-Pb-методом. Rb-Sr-датирование пироклоровых разностей карбонатитов (сёвиты II) показало возраст 250 ± 3 млн лет (T_1). Результаты Rb-Sr- и U-Pb-датирования свидетельствуют о том, что процессы пегматито- и карбонатитообразования и связанного с ними Zr-Nb-рудообразования в ИВК происходили на поздне- и постколлизийной стадии развития Уральской складчатой области. На основании полученных данных предложена геодинамическая модель формирования ИВК.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: карбонатиты; миаскиит-пегматиты; U-Pb и Rb-Sr-датирование; Ильмено-Вишневогорский комплекс; Урал

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГГ УрО РАН, тема № АААА-А18-118052590028-9, с использованием оборудования ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН. Дооснащение и комплексное развитие ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН осуществляется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Соглашение № 075-15-2021-680).

1. ВВЕДЕНИЕ

Ильмено-Вишневогорский миаскиит-фенит-карбонатитовый комплекс (ИВК), расположенный в Уральской складчатой области, является представителем карбонатитовых комплексов «линейного типа». Происхождение «линейных» карбонатитовых комплексов и связанной с ними Nb-Zr-REE минерализации дискуссионно. Так как породы линейных карбонатитовых комплексов деформированны, предполагается, что они являются рифтогенными комплексами, которые были вовлечены в зону коллизии [Burke et al., 2003]; альтернативная гипотеза их происхождения – генерация и внедрение щелочных и карбонатитовых магм на орогенном этапе становления складчатых областей [Attoh et al., 2007]. Происхождение ИВК и геодинамические обстановки его формирования также остаются предметом дискуссий [Ronenson, 1966; Kononova et al., 1979; Kramm et al., 1983; Levin et al., 1997; Mitchell, 2005; Rass et al., 2006; Rusin et al., 2006; Ivanov, 2011; Abramov et al., 2020].

Вопросы возраста и длительности этапов щелочно-карбонатитового магматизма и редкометалльного рудообразования на Урале, на которых основываются геодинамические модели формирования ИВК, нуждаются в дальнейших исследованиях и корректной

интерпретации геохронологических данных. С целью оценки возраста и длительности формирования ИВК и связанной с ним рудной Nb-Zr минерализации нами проведено U-Pb-датирование циркона из миаскиит-пегматитов; выполнены исследования Rb-Sr изотопных составов минералов и валовых проб рудоносных (пироклорсодержащих) миаскиит-пегматитов и карбонатитов с построением Rb-Sr-изохрон. На основании полученных данных обсуждается возраст процессов рудообразования и геодинамическая модель формирования ИВК.

2. КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИЛЬМЕНО-ВИШНЕВОГОРСКОГО КОМПЛЕКСА

ИВК миаскиит-фенит-карбонатитовый комплекс находится на Южном Урале в осевой части Сысертско-Ильменогорского антиклинория, который представляет собой блок AR-PR фундамента (или террейн, микроконтинент), залегающий среди уральских O-S палеоокеанических комплексов, вблизи гигантской шовной зоны – Главного Уральского разлома (ГУР).

ИВК состоит из двух крупных факолитоподобных массивов нефелиновых сиенитов (миаскиитов) с карбонатитами, залегающих в сводовых частях антиклинали,

и протяженной (~100 км) линейной зоны – Центральной щелочной полосы, сложенной фенитами, пластообразными телами миаскитов, сиенитов, глиммеритоподобных пород и карбонатитов [Levin et al., 1997; Nedosekova et al., 2009], которая залегает субсогласно уральским коллизионным тектоническим структурам субмеридионального простирания (Прил. 1, рис. 1.1).

Миаскиты в различной степени деформированы и представлены гнейсовидными мелко- и среднезернистыми разностями. Кроме того, достаточно широко развиты такситовые, полосчатые, пегматоидные и порфиroidные разности миаскитов, часто сопряженные с миаскит-пегматитами и карбонатитами.

Миаскит-пегматиты (нефелин-полевошпатовые, нефелин-канкринит-полевошпатовые) образуют жильные тела протяженностью 50–300 м при мощности до 10 м и широко развиты как в миаскитовых массивах, так и в фенитовом ореоле. Тела миаскит-пегматитов часто субсогласны с деформационной полосчатостью миаскитов или образуют жильные тела с апофизами, секущими полосчатость. Жилы имеют сложное строение, в зальбандах – нефелин-биотит-микроклиновыи агрегат, центральные части блокового строения сложены нефелином, микроклином, альбитом, иногда канкринитом, реже – агрегатом кальцита, с биотитом, фторопатитом, ильменитом, цирконом, пироксеном и др.

Карбонатиты с редкометалльной (Nb-Zr) минерализацией образуют пластообразные и жильные тела (мощность до 10 м, протяженность в сотни метров) в миаскитах, а также встречаются в виде жил и штокверков в фенитовых ореолах миаскитовых интрузий. Ранние карбонатиты (сэвиты I) представлены силикокарбонатитами – флюидальными, афанитовыми разностями, содержащими кальцит, нефелин, калиевый полевой шпат (КПШ), биотит, иногда пироксен, альбит, ильменит, апатит, циркон, черный уранпироксид, магнетит, пирротин, пирит. Карбонатиты часто брекчированы, содержат округлые фрагменты вмещающих миаскитов или фенитов и крупные зерна их минералов, сцементированные мелкозернистой альбит-биотит-кальцитовой основной массой. Более поздние жилы карбонатитов (сэвиты II) – лейкократовые, крупнозернистые, с полосчатым распределением силикатных и аксессуарных минералов, содержат крупные (до 20 см) кристаллы биотита, апатита, альбита, красного пироксена, ильменита, циркона, магнетита, пирротина, пирита [Nedosekova et al., 2009].

С карбонатитами и пегматитами ИВК связаны месторождения и рудопоявления Nb и Zr. Наиболее крупное промышленное Вишневогорское Nb-месторождение приурочено к апикальной части Вишневогорского массива и сложено пластообразными и жильными телами карбонатитов и миаскитовых пегматоидов. Потанинское месторождение пироксена представляет собой линейную, иногда штокверковидную, зону карбонатитов в миаскитах и фенитах в Центральной щелочной полосе. Кроме того, здесь известны другие сходные по строению Nb-рудопоявления – Ишульское,

Байдашевское, Увильдинское, Светлоозерское и др. [Levin et al., 1997].

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

U-Pb датирование цирконов выполнено на квадрупольном ICP-MS NexION 300S (PerkinElmer) с приставкой для LA NWR 213 (ESI) (аналитик В.С. Червяковский). Процедура измерения Pb/U-изотопных отношений и алгоритм расчета возраста изложены ранее [Zaitceva et al., 2016]. Параметры приставки: диаметр кратера – 25 мкм, частота повторения импульсов – 10 Гц, плотность энергии – 10–11 Дж/см². Обработку результатов проводили в программе GLITTER V4.4. В качестве первичного стандарта использовали циркон GJ-1 (в качестве вторичных – цирконы 91500 и Plesovice). Измерения стандарта производили через каждые десять аналитических точек.

Внутреннее строение и состав циркона предварительно были исследованы на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV фирмы Jeol с ЭДС приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments (аналитик Н.Н. Банева). Условия съемки: ускоряющее напряжение 20–25 кВ и зондовый ток 1 нА, низкий вакуум 60–80 Па. CL-изображения цирконов, а также химический состав циркона, состав включений в цирконах были получены на электронно-зондовом микроанализаторе Cameca SX100 (аналитик В.А. Булатов).

Измерения изотопного состава и концентраций Rb и Sr проводились на термоионизационном масс-спектрометре TRITON Plus (ЦКП «Геоаналитик», ИГГ УрО РАН, аналитик М.В. Червяковская). 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 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.3752$. При расчете Rb-Sr-изохрон использовались ошибки измерения изотопного состава $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (1 %), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.04 %).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Rb-Sr-изотопное датирование миаскит-пегматитов и карбонатитов ИВК. С целью определения возраста миаскит-пегматитов и карбонатитов и связанного с ними Zr-Nb оруденения проведены измерения Rb-Sr изотопных составов и концентраций элементов в валовых пробах и слагающих их минералах миаскит-пегматитов (обр. Солн-1, Увильдинское Nb-рудопоявление ИВК) и пироксеновых карбонатитов (обр. 140-39, Вишневогорское Nb-месторождение, рудная зона 140).

Проба № Солн-1 представляет собой миаскит-пегматит, сложенный кристаллами темно-серого нефелина, КПШ и биотита размером 1.5–2.0 см. Отдельные кристаллы нефелина канкринитизированы. Циркон тяготеет к межзерновому пространству и образует кристаллы дипирамидального габитуса с преобладанием дипирамиды {111} и менее развитыми гранями призм

{110}, {100} и дипирамид {221}, {311}, размером 0.5–1.0 см, различной окраски (от бесцветных до светло-коричневых). Пирохлор образует рассеянную вкрапленность черных и темно-бурых зерен размером до 2 мм, а также встречается в виде включений размером 1–10 мкм в зернах нефелина, полевых шпатов и в акцессорном цирконе.

Проба № 140-39 отобрана из жилы карбонатита (сёвит II) рудной зоны 140 Вишневогорского месторождения, сложенной системой жил миаскитовых пегматоидов и жил карбонатитов. Жила карбонатита имеет зональное строение: в эндоконтактах – полевые шпаты и биотит, а центральная часть сложена крупнозернистым агрегатом кальцита с пирохлором, апатитом,

ильменитом, пирротинном, пиритом (размеры кристаллов до п см).

Результаты исследований Rb-Sr-изотопного состава валовой пробы миаскит-пегматита (обр. Солн-1) и пяти слагающих его минералов (нефелин, КПШ, биотит, канкринит, циркон) а также пробы карбонатита (обр. 140-39) и четырех минералов (кальцит, апатит, биотит и пирохлор) представлены в табл. 1; результаты вычисления изохрон – на рис. 1.

Rb-Sr-изохрона для миаскит-пегматитов (обр. Солн-1) построена по трем точкам (КПШ, биотит и валовая проба). Точки нефелина, а также канкринита и циркона были исключены из расчета, так как они несколько смещены относительно линии изохроны. Rb-Sr-изохрона

Таблица 1. Rb-Sr изотопные данные для миаскит-пегматита (обр. Солн-1) и карбонатита (обр. 140-39) ИВК
Table 1. Rb-Sr isotope data for miaskite-pegmatite (sample Soln-1) and carbonatite (sample 140-39), IVC

Солн-1							
№ образца	Проба	Rb, мкг/г	Sr, мкг/г	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	±2σ абс.	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ абс.
Солн-1WR	Вал	13	550	0.068	±1	0.704266	±10
Солн-1Ne	Нефелин	37	53	2.01	±2	0.706509	±10
Солн-1Can	Канкринит	30	175	0.489	±5	0.704982	±11
Солн-1Fsp	КПШ	17	791	0.062	±1	0.704111	±12
Солн-1Bt	Биотит	380	210	5.24	±5	0.724373	±6
Солн-1Zr	Циркон	7	18012	0.00117	±1	0.704401	±9
140-39							
140-39 WR	Вал	173	8414	0.05938	±4	0.704604	±12
140-39 Ap	Апатит	1.2	9095	0.00039	±2	0.704388	±12
140-39 Prx	Пирохлор	1.5	8332	0.00051	±2	0.704389	±12
140-39 Ca	Кальцит	4.0	11092	0.00105	±2	0.704401	±14
140-39 Bt	Биотит	987	159	18.117	±4	0.768940	±14

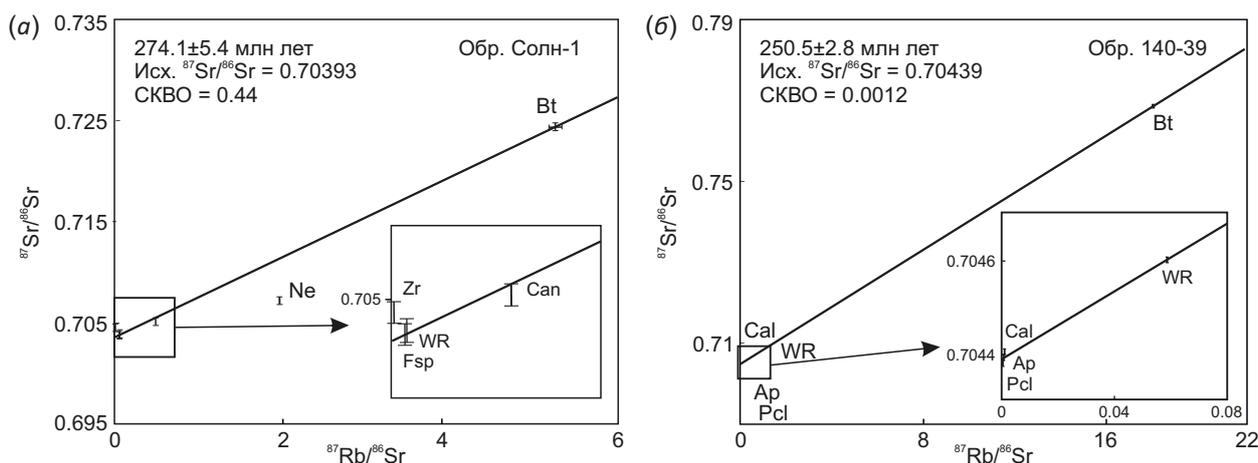


Рис. 1. Минеральные Rb-Sr-изохроны. (а) – для миаскит-пегматитов ИВК, Увильдинское Nb-рудопроявление (обр. Солн-1); (б) – для пирохлоровых карбонатитов ИВК, Вишневогорское Nb-месторождение, рудная зона 140 (обр. 140-39). Ne – нефелин, Bt – биотит, Can – канкринит, Fsp – КПШ, Zr – циркон, Cal – кальцит, Ap – апатит, Pcl – пирохлор, WR – валовая проба.

Fig. 1. Mineral Rb-Sr-isochron. (a) – IVC miaskite-pegmatite, Uvildy Nb-deposit (sample Soln-1); (б) – IVC pyrochlore carbonatites, Vishnevogorsky Nb-deposit, the Ore Zone 140 (sample 140-39). Ne – nepheline, Bt – biotite, Can – cancrinite, Fsp – K-feldspar, Zr – zircon, Cal – calcite, Ap – apatite, Pcl – pyrochlore, WR – whole rock.

образца Солн-1 показала возраст 274.1 ± 5.4 млн лет, $СКВО=0.44$, соответствующий нижней перми (P_1) (рис. 1). Начальный изотопный состав стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{274} = 0.70393$ в миаскит-пегматитах более радиогенный, но близок изотопному составу деформированных разностей миаскитов ИВК [Kramm et al., 1983; Nedosekova et al., 2013].

Rb-Sr-изохрона для пироклоровых карбонатитов (обр. 140-39) построена по пяти точкам (кальцит, апатит, биотит и пироклор и валовый состав пробы карбонатита) и показала возраст 250.5 ± 2.8 млн лет (T_1), $СКВО=0.0012$ (рис. 1). Исследованная проба карбонатитов ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{250} = 0.70439$) отличается более радиогенным начальным изотопным составом Sr от составов миаскитовых массивов ИВК ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{440} = 0.70336 - 0.70380$ [Nedosekova et al., 2013]).

U-Pb датирование цирконов миаскит-пегматитов ИВК. U-Pb LA-ICP MS датирование (всего 54 точки анализа) проведено для 12 кристаллов циркона из миаскит-пегматитов (обр. Солн-1) Увильдинского Nb-рудопоявления ИВК. CL- и BSE-изображения, иллюстрирующие внутреннее строение кристаллов циркона, а также результаты исследований U-Pb-изотопных составов цирконов (обр. Солн-1) представлены на рис. 2.

Изученные кристаллы циркона, размером 0.5–1.0 см, часто имеют крупноосцилляторную ростовую зональность (Zr1) (рис. 2-I, а, г, к, л) и содержат в качестве включений минералы миаскитов – КПШ, биотит, нефелин, альбит, канкринит (вишневит), а также многофазные включения (альбит, КПШ, биотит) и включения редкометалльных минералов – уранпироклор, ильменит, рутил (рис. 2-I, б, в, ж, и, к, л, м). В центральной части кристаллов циркона иногда сохраняются реликтовые затравки циркона (Zr_relict) размером менее 50 мкм (красный пунктир, рис. 2-I, г, д, е, к, м), обрастающие цирконом с ростовой крупноосцилляторной зональностью (Zr1). Часто в кристаллах циркона отмечаются зоны деформаций и ориентированные системы трещин. Многие из изученных кристаллов циркона (Zr1) обрастают по периферии, преимущественно по граням призмы, новой зоной циркона с мелкоосцилляторной зональностью (Zr2), почти черной в CL, шириной до 200 мкм, при этом следы деформаций и трещины в ней отсутствуют (рис. 2-I, з), что фиксирует перерыв в процессе цирконообразования. Почти во всех кристаллах циркона в режиме CL видны осветленные каймы твердофазовой рекристаллизации (Zr3), с неровными границами, секущими зоны с осцилляторной зональностью (рис. 2-I, б, з, л).

Конкордантный U-Pb-возраст циркона из миаскит-пегматита, рассчитанный по всей совокупности измерений, составляет 259 ± 3 млн лет, $СКВО=0.026$, $n=28$ (рис. 2-II, а). Конкордантный U-Pb-возраст основной генерации циркона (Zr1), с крупноосцилляторной зональностью: 280 ± 8 млн лет (P_1), $СКВО=0.0014$, $n=13$ (рис. 2-II, б), подтверждает результаты датирования этого образца миаскит-пегматита Rb-Sr-методом (274 ± 5 млн лет) и наиболее близок возрасту поздних генераций

циркона в карбонатитах и миаскит-пегматитах [Krasnobaev et al., 2010b, 2014; Nedosekova et al., 2014]. Внешние зоны кристаллов циркона (Zr2), с мелкоосцилляторной зональностью, образующиеся на заключительном этапе рудообразования (см. рис. 2-I, з), показывают конкордантный возраст 258 ± 4 млн лет, $СКВО=0.0055$, $n=11$, отличающийся в пределах ошибки определения от возраста основной генерации циркона (рис. 2-II, в). Датирование внешних осветленных кайм твердофазовой рекристаллизации цирконов (Zr3, см. рис. 2-I, з) показало наиболее молодой возраст – 249 ± 8 млн лет, при $СКВО=0.029$, $n=4$ (рис. 2-II, г), и при этом необходимо отметить, что большинство (10 из 15) измеренных изотопных отношений в этих каймах дискордантны ($D = -63...-90\%$). Реликтовые затравки циркона (Zr_relict) (красный пунктир, рис. 2-I, г, д, е, к, м), которые иногда сохраняются в центральной части кристаллов циркона пегматитов, показывают наиболее древний возраст – 374 ± 17 млн лет, близкий возрастному кластеру ранних генераций цирконов миаскитов и карбонатитов [Krasnobaev et al., 2010b, 2016].

5. ОБСУЖДЕНИЕ

ИВК является представителем деформированных щелочных карбонатитовых комплексов, которые в англоязычной литературе названы DARC – аббревиатура "deformed alkaline rocks with carbonatite" [Burke et al., 2003]. Деформационные текстуры (гнейсовидность, полосчатость, будинаж, складкообразование) являются обычными для миаскитов и карбонатитов ИВК. Предложены две альтернативные модели формирования DARC: 1) согласно [Burke, Khan, 2006], DARC представляют собой более ранние рифтогенные щелочные комплексы внутриплитных обстановок, которые позднее были вовлечены в зону коллизии, деформированы и в ряде случаев подверглись плавлению; 2) другой механизм образования DARC связывают с коллизионной сдвиговой тектоникой и внутриорогенным растяжением, которое завершается последующей фазой сжатия [Attoh et al., 2007; Valentin et al., 2020].

Происхождение ИВК и геодинамические обстановки его формирования также остаются предметом дискуссий, что в значительной мере определяется большим диапазоном возрастных датировок (от 446 до 244 млн лет), полученных для щелочных пород и карбонатитов различными изотопными методами [Kononova et al., 1979; Kramm et al., 1983; Ivanov, 2011; Krasnobaev et al., 2010a, 2010b, 2016; Nedosekova et al., 2016]. Для ИВК обсуждается рифтогенная модель [Kramm et al., 1983], коровый анатексис [Levin et al., 1997; Abramov et al., 2020], метаморфогенная [Mitchell, 2005] и субдукционная [Ivanov, 2011] модели формирования.

Результаты ранее проведенного датирования пород и минералов свидетельствуют о многоэтапном формировании ИВК. Бимодальный возраст миаскитов ИВК получен на основе Rb-Sr изохронного датирования: ордовик-силурийский ($446-440$ млн лет) возраст – по валовым пробам и пермский ($255-244$ млн лет) – по

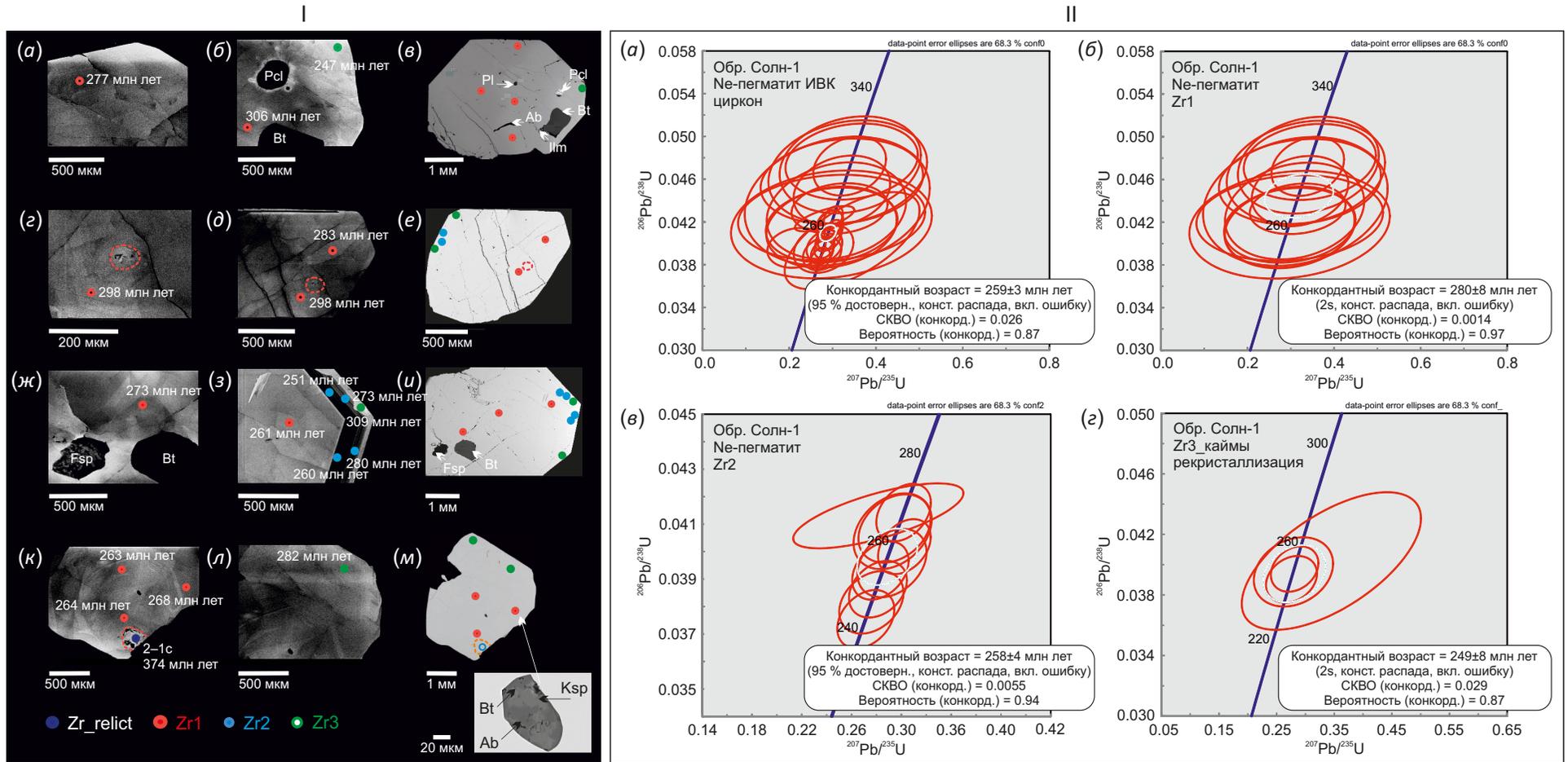


Рис. 2. CL- и BSE- изображения кристаллов циркона из миаскит-пегматитов с точками анализа, обр. Солн-1, Увильдинское рудопоявление, ИВК (г. Екатеринбург, Cameca SX100, аналитик В.А. Булатов; СЭМ JSM-6390LV, аналитик Н.Н. Банева) (I) и U-Pb-диаграммы с конкордией по результатам локального U-Pb-датирования циркона (обр. Солн-1) методом лазерной абляции (г. Екатеринбург, аналитик В.С. Червяковский) (приведены только конкордантные анализы) (II).

Zr_relict – реликты (или затравки) циркона размером до 50 мкм, содержащиеся в центре крупных кристаллов циркона; Zr1 – основная генерация циркона, часто с крупноосцилляторной (пегматитовой) зональностью; Zr2 – внешняя кайма циркона с мелкоосцилляторной зональностью, Zr3 – осветленные каймы твердофазовой рекристаллизации в цирконе. Pcl – пирохлор, Ilm – ильменит, Pl – плагиоклаз, Fsp – полевои шпат, Bt – биотит, Ab – албит; 273 млн лет и т.д. – U-Pb-возраст, млн лет. (a) – обр. Солн-1, циркон из миаскит-пегматитов Увильдинского рудопоявления, ИВК; (б) – внутренние зоны кристаллов циркона, с крупноосцилляторной «пегматитовой» зональностью (Zr1); (в) – внешние зоны обрастания кристаллов циркона с мелкоосцилляторной зональностью (Zr2); (г) – осветленные каймы твердофазовой рекристаллизации в цирконе (Zr3).

Fig. 2. CL- and BSE- images of zircon crystals from miaskite-pegmatites with analytical points, sample Soln-1, Uvildy ore occurrence, IVC (Ekaterinburg, Cameca SX100, analyzed by V.A. Bulatov; SEM JSM-6390LV, analyzed by N.N. Baneva) (I) and U-Pb diagrams with Concordia based on the results of local U-Pb dating of zircon (sample Soln-1) by laser ablation (Ekaterinburg, analyzed by V.S. Chervyakovskiy) (concordant analyses are provided) (II).

Zr_relict – relicts (or preetching) of zircons sized 50 μm contained in the center of large zircon crystals; Zr1 – main generation of zircon, often with a large oscillatory (pegmatite) zonation; Zr2 – external rim of zircon with a fine-oscillatory zonation, Zr3 – lightened rims of solid-phase recrystallization in zircon. Pcl – pyrochlore, Ilm – ilmenite, Pl – plagioclase, Fsp – feldspar, Bt – biotite, Ab – albite; 273 Ma – U-Pb age. (a) – sample Soln-1, zircon from miaskite-pegmatites of the Uvildy ore occurrence, IVC; (б) – internal zones of zircon crystals, with large oscillatory "pegmatite" zonation (Zr1); (в) – external zones of zircon crystal encrustation, with a small-oscillatory zonation (Zr2); (г) – lightened rims of solid phase recrystallization in zircon (Zr3).

минеральным изохронам миаскитов [Kramm et al., 1983]. Значения возраста трех этапов формирования получены по цирконам миаскитов и карбонатитов ИВК (432–417 млн лет, S_{1-2}), (385–380 млн лет, D_{2-3}) и (280–250 млн лет, P_{1-3}) [Kramm et al., 1993; Krasnobaev et al., 2016; Nedosekova, Belyatsky, 2012].

Согласно [Kramm et al., 1983; Chernyshev et al., 1987; Krasnobaev et al., 2010a, 2010b], внедрение интрузии и кристаллизации щелочных и карбонатитовых расплавов происходило ~440–420 млн лет назад – в ордовике и силуре, на заключительном этапе континентального рифтогенеза, тогда как возраст ~250 млн лет (граница перми и триаса) отвечает метаморфизму, с которым связаны потери цирконами радиогенного свинца. Согласно [Krasnobaev et al., 2010a], возрастной этап 385–380 млн лет фиксирует заключительную стадию магматической эволюции ИВК, тогда как возрастной этап 285–275 млн лет связан с коллизионной тектоникой и фиксируется растворением ранних и кристаллизацией новых генераций цирконов.

Проведенное нами U-Pb-датирование кристаллов циркона из миаскит-пегматитов ИВК показало пермский возраст (280±8 млн лет, P_1 – возраст основной генерации циркона). Необходимо отметить, что основная генерация циркона характеризуется крупноосцилляторной зональностью, что свойственно циркону миаскит-пегматитов магматического происхождения. Кроме того, в этих генерациях циркона присутствуют включения минералов миаскитов – биотита, калиевого полевого шпата, нефелина, альбита, канкринита (вишневит), а также рудных Nb- и Ti-минералов (уран-пироксид, ильменит, рутил и др.), что подтверждает нижнепермский возраст и синхронность рудных процессов цирконо- и пироксидообразования. Более молодой возраст – 258±4 млн лет (P_3) – получен для кайм обрастания с мелкоосцилляторной зональностью, которые часто устанавливаются на кристаллах раннего циркона (Zr1, P_1). При этом метаморфические процессы твердофазовой рекристаллизации, проявленные в виде светлых однородных кайм в этих цирконах (см. рис. 2-1, з), датируются близким и наиболее молодым возрастом 249±8 млн лет (T_1), соответствующим метаморфическому событию [Kramm et al., 1983].

Rb-Sr-минеральная изохрона, построенная для миаскит-пегматита (обр. Солн-1), показала возраст 274±5 млн лет (P_1), подтверждающий результаты датирования циркона этого образца миаскит-пегматита ИВК U-Pb-методом. Таким образом, результаты Rb-Sr- и U-Pb-датирования миаскит-пегматитов свидетельствуют о том, что процессы пегматитообразования и связанного с ними Zr-Nb-рудообразования в ИВК происходили в период от нижней перми до раннего триаса, на поздней и постколлизионной стадии развития Уральской складчатой области [Puchkov, 2010].

Результаты ранее проведенного датирования карбонатитов ИВК неоднозначны и могут быть интерпретированы только с учетом петрографических, геохимических и петрологических данных. Возраст основной

генерации циркона (ZrI) для ранних карбонатитов (сёвиты I) 417±2.8 млн лет, S_{1-2} может свидетельствовать о формировании карбонатитового комплекса на заключительных этапах континентального рифтогенеза. При этом нельзя исключить, что данная генерация циркона является унаследованной из миаскитов, тогда как поздние новообразованные генерации циркона (ZrII) с возрастом 280 млн лет (P_1) широко развиты в рудоносных пироксидовых карбонатитах (сёвиты II) [Krasnobaev et al., 2010b; Nedosekova et al., 2016] и фиксируют новый этап редкометалльного рудообразования, связанный с позднеколлизионными анатектическими и метасоматическими процессами преобразования ИВК.

Rb-Sr и Sm-Nd-возраст пироксидовых разностей карбонатитов ИВК (сёвиты II) [Nedosekova et al., 2020] – 250±3 (T_1) млн лет и 230±16 млн лет (T_2) – соответствует постколлизионному этапу развития Уральской складчатой области [Puchkov, 2010], что также может свидетельствовать о том, что рудоносные карбонатиты формировались в результате нового процесса кристаллизации на этапе постколлизионного растяжения.

Необходимо отметить, что U-Pb-системы пироксидов показали близкие значения возраста (237.7±4.5 млн лет – пироксид из полевошпатовых прожилков в такситовых миаскитах, 234.4±2.2 млн лет – из полевошпатовых жил в фенитах, 230±5.0 млн лет – пироксид из миаскит-пегматитов, 230±1.5 млн лет – пироксид из карбонатитов, Вишневогорское месторождение) [Belyatsky et al., 2018], подтверждая результаты проведенного нами датирования рудоносных разностей пород ИВК.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изотопно-геохронологическое датирование рудоносных разностей миаскит-пегматитов и карбонатитов показало, что для ИВК применима рифтогенно-коллизионная модель формирования, предложенная для DARC [Burke et al., 2003; Burke, Khan, 2006]. Согласно этой модели, щелочно-карбонатитовые магмы ИВК были внедрены на континентальных рифтовых окраинах в палеозое (O_3 -S [Kramm et al., 1983; Krasnobaev et al., 2016; Nedosekova et al., 2016]). Примерно в это же время на Урале образовались базит-ультрамафитовые комплексы (O-S), формирующиеся при раскрытии Уральского океана, а также островодужные вулканогенно-осадочные комплексы (O_3 -D₃) [Puchkov, 2010], фиксирующие переход от экстенсивной тектоники к режиму сжатия. Позднее рифтогенные карбонатитовые комплексы были захвачены, деформированы и подверглись плавлению в шовной зоне после закрытия Уральского океана и столкновения Восточно-Европейского, Сибирского и Казахстанского континентов (~320–280 млн лет – поздняя коллизия, S_1 - P_1 [Puchkov, 2010]). На позднеколлизионном (~280 млн лет) и постколлизионном (~250 млн лет) этапах становления ИВК происходили масштабные процессы перекристаллизации пород, пластические и хрупкие деформации,

процессы пегматито- и карбонатитообразования, а также редкометалльного рудообразования, связанные с анатектическими и метасоматическим процессами преобразований пород ИВК.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Т.Б. Баяновой, А.Ю. Кисину, П.А. Серову, Б.В. Беляцкому и коллективу ФХМИ ИГГ УрО РАН за поддержку, консультации и помощь в проведении аналитических работ.

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

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

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

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abramov S.S., Rass I.T., Kononkova N.N., 2020. Fenites of the Miaskite–Carbonatite Complex in the Vishnevye Mountains, Southern Urals, Russia: Origin of the Metasomatic Zoning and Thermodynamic Simulations of the Processes. *Petrology* 28, 263–286. <https://doi.org/10.1134/S0869591120030029>.

Attoh K., Corfu F., Nude P.M., 2007. U-Pb Zircon Age of Deformed Carbonatite and Alkaline Rocks in the Pan-African Dahomeyide Suture Zone, West Africa. *Precambrian Research* 155 (3–4), 251–260. <http://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.02.003>.

Belyatsky B.V., Lepekhina E.N., Antonov A.V., Rodionov N.V., Petrov O.V., Shevchenko S.S., Sergeev S.A., Nedosekova I.L., 2018. The Age of Nb Rare-Metal Mineralization of the Ilmeny–Vishnevogorsky Alkaline Complex (South Urals). *Doklady Earth Sciences* 481, 1079–1085. <http://doi.org/10.1134/S1028334X18080251>.

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. [http://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0391:NWTMOS>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0391:NWTMOS>2.0.CO;2).

Burke K., Khan S., 2006. Geoinformatic Approach to Global Nepheline Syenite and Carbonatite Distribution: Testing a Wilson Cycle Model. *Geosphere* 2 (1), 53–60. <http://doi.org/10.1130/GES00027.1>.

Chernyshev I.V., Kononova V.A., Kramm U., Grauert B., 1987. Isotope Geochronology of the Alkaline Rocks in the Urals Acquired by U-Pb Method from Zircons. *Geochemistry* 3, 323–338 (in Russian) [Чернышев И.В., Кононова В.А., Крамм У., Грауэрт Б. Изотопная геохронология щелочных пород Урала в свете данных уран-свинцового метода по цирконам // Геохимия. 1987. № 3. С. 323–338].

Ivanov K.S., 2011. The Nature of the Ural Carbonatites. *Lithosphere* 1, 20–33 (in Russian) [Иванов К.С. О природе карбонатитов Урала // Литосфера. 2011. № 1. С. 20–33].

Kononova V.A., Dontsova E.I., Kuznetsova L.D., 1979. Isotope Composition of Oxygen and Strontium of the Ilmen-Vishnevogorsky Alkaline Complex and Genesis of Miaskites. *Geochemistry* 12, 1784–1795 (in Russian) [Кононова В.А., Донцова Е.И., Кузнецова Л.Д. Изотопный состав кислорода и стронция Ильмено-Вишневогорского щелочно-го комплекса и вопросы генезиса миаскитов // Геохимия. 1979. № 12. С. 1784–1795].

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. *The Journal of Geology* 91 (4), 427–435. <https://doi.org/10.1086/628788>.

Kramm U., Chernyshev I.V., Grauert B., Kononova V.A., Broker V., 1993. The U-Pb Systematics of Zircons: Study of Zircons in Nepheline Syenites of the Ilmen Mountains, the Urals. *Petrology* 1 (5), 536–549 (in Russian) [Крамм У., Чернышев И.В., Грауэрт Б., Кононова В.А., Брёкер В. Типология и U-Pb систематика цирконов: изучение цирконов в нефелиновых сиенитах Ильменских гор, Урал // Петрология. 1993. Т. 1. № 5. С. 536–549].

Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Busharina S.V., Lepekhina E.N., Medvedeva E.V., 2010a. Character of Zircon Distribution on Amphibole Miaskite of the Ilmenogorsk Massif (Southern Urals). *Doklady Earth Sciences* 430, 76–79. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10010174>.

Krasnobaev A.A., Rusin A.I., Valizer P.M., Busharina S.V., 2010b. Zirconology of Calcite Carbonatite of the Vishnevogorsk Massif, Southern Urals. *Doklady Earth Sciences* 431, 390–393. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10030268>.

Krasnobaev A.A., Valizer P.M., Anfilogov V.N., Nemov A.B., Busharina S.V., 2014. Zirconology of Pegmatites of the Ilmeny Mountains. *Doklady Earth Sciences* 457, 960–964. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14080066>.

Krasnobaev A.A., Valizer P.M., Busharina S.V., Medvedeva E.V., 2016. Zirconology of Miaskites of the Ilmeny Mountains, South Ural. *Geochemistry International* 54, 765–780. <https://doi.org/10.1134/S0016702916070041>.

Levin V.Ya., Ronenson B.M., Samkov V.S., Levina I.A., Sergeev N.S., Kiselev A.P., 1997. Alkaline-Carbonatite Complexes of the Urals. Uralgeolkom Publishing House, Ekaterinburg, 270 p. (in Russian) [Левин В.Я., Роненсон Б.М., Самков В.С., Левина И.А., Сергеев Н.С., Киселев А.П. Щелочно-карбонатитовые комплексы Урала. Екатеринбург: Изд-во Уралгеолком, 1997. 270 с.].

Mitchell R.H., 2005. Carbonatites and Carbonatites and Carbonatites. *The Canadian Mineralogist* 43 (6), 2049–2068. <http://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2049>.

Nedosekova I.L., Belousova E.A., Belyatskiy B.V., 2014. The U-Pb Age and Lu-Hf Isotope Systems of Zircons from the Ilmen-Vishnevogorskiy Alkaline-Carbonatite Complex, the Southern Urals. *Lithosphere* 5, 19–32 (in Russian) [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].

Nedosekova I.L., Belousova E.A., Sharygin V.V., Belyatsky B.V., Baynova T.B., 2013. 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* 107, 101–123. <https://doi.org/10.1007/s00710-012-0223-9>.

Nedosekova I.L., Belyatsky B.V., 2012. Age and Substance Sources of the Ilmenov-Vishnevogorsky Alkaline Complex (South Urals): Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, and Lu-Hf Isotope Data. *Doklady Earth Sciences* 446, 1071–1076. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12090061>.

Nedosekova I.L., Belyatsky B.V., Belousova E.A., 2016. Trace Elements and Hf Isotope Composition as Indicators of Zircon Genesis in the Evolution of the Alkaline-Carbonatite Magmatic System (Ilmenov-Vishnevogorsky Complex, Urals, Russia). *Russian Geology and Geophysics* 57 (6), 891–906. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.021>.

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 Ilmenov-Vishnevogorsky Alkaline Complex, the Southern Urals (Insights from Rb-Sr and Sm-Nd Isotopic Data). *Lithosphere* 20 (4), 486–498 (in Russian) [Недосекова И.Л., Коротеев В.А., Баянова Т.Б., Серов П.А., Попова В.И., Червяковская М.В. О возрасте пироклоровых карбонатитов Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса, Ю. Урал (по данным Sm-Nd и Rb-Sr изотопных методов) // Литосфера. 2020. Т. 20. № 4. С. 486–498]. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-4-486-498>.

Nedosekova I.L., Vladykin N.V., Pribavkin S.V., Bayanova T.B., 2009. The Il'mensky-Vishnevogorsky Miaskite-Carbonatite Complex, the Urals, Russia: Origin, Ore Resource Potential, and Sources. *Geology of Ore Deposits* 51, 139. <https://doi.org/10.1134/S1075701509020056>.

Puchkov V.N., 2010. *Geology of the Urals and Cis-Urals (Topical Issues of Stratigraphy, Tectonics, Geodynamics and Metallogeny)*. DizaynPoligrafServis, Ufa, 280 p. (in Russian) [Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.].

Rass I.T., Abramov S.S., Utenkov V.A., Kozlovskii V.M., Korpechkov D.I., 2006. Role of Fluid in the Genesis of Carbonatites and Alkaline Rocks: Geochemical Evidence. *Geochemistry International* 44, 636–655. <https://doi.org/10.1134/S0016702906070020>.

Ronenson B.M., 1966. Origin of Miaskites and Relationship to Rare-Metal Mineralization. *Geology of Rare-Element Deposits*. Nedra, Moscow, 176 p. (in Russian) [Роненсон Б.М. Происхождение миаскитов и связь с ними редкометалльного оруденения // Геология месторождений редких элементов. М.: Недра, 1966. 176 с.].

Rusin A.I., Krasnobaev A.A., Valizer P.M., 2006. *Geology of the Ilmen Mountains*. In: E.P. Makagonov (Ed.), *Geology and Mineralogy of the Ilmenogorsky Complex: Situation and Problems*. ISR UB RAS, Miass, p. 3–20 (in Russian) [Русин А.И., Краснобаев А.А., Вализер П.М. Геология Ильменских гор // Геология и минералогия Ильменогорского комплекса: ситуация и проблемы / Ред. Е.П. Макагонов. Миасс: ИГЗ УрО РАН, 2006. С. 3–20].

Valentin E., Botelho N.F., Dantas E.L., 2020. Monte Santo Suite, an Example of Ediacaran-Cambrian Deformed Alkaline Rocks in the Araguaia Belt, Central Brazil. Implications for Western Gondwana Evolution. *Lithos* 366, 105552. <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105552>.

Zaitceva M.V., Pupyshv A.A., Shchapova J.V., Votyakov S.L., 2016. Dating of Zircons Using NexION 300S Quadrupole Mass Spectrometer with Inductively Coupled Plasma and NWR 213 Attachment for Laser Ablation. *Analytics and Control* 20 (4), 294–306 (in Russian) [Зайцева М.В., Пупышев А.А., Щапова Ю.В., Вотяков С.Л. U-Pb датирование цирконов с помощью квадрупольного масс-спектрометра с индуктивносвязанной плазмой NexION 300S и приставки для лазерной абляции NWR 213 // Аналитика и контроль. 2016. Т. 20. № 4. С. 294–306]. <http://doi.org/10.15826/analitika.2016.20.4.006>.

Zoloev K.R., Levin V.Ya., Mormil S.I., Shardakova G.Yu., 2004. *Mineral Genesis and Deposits of Rare Metals, Molybdenum and Tungsten of the Urals*. Ural Geological Survey Expedition, Ekaterinburg, 336 p. (in Russian) [Золоев К.К., Левин В.Я., Мормил С.И., Шардакова Г.Ю. Минерогения и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург: Уральская геолого-съёмочная экспедиция, 2004. 336 с.].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1/APPENDIX 1

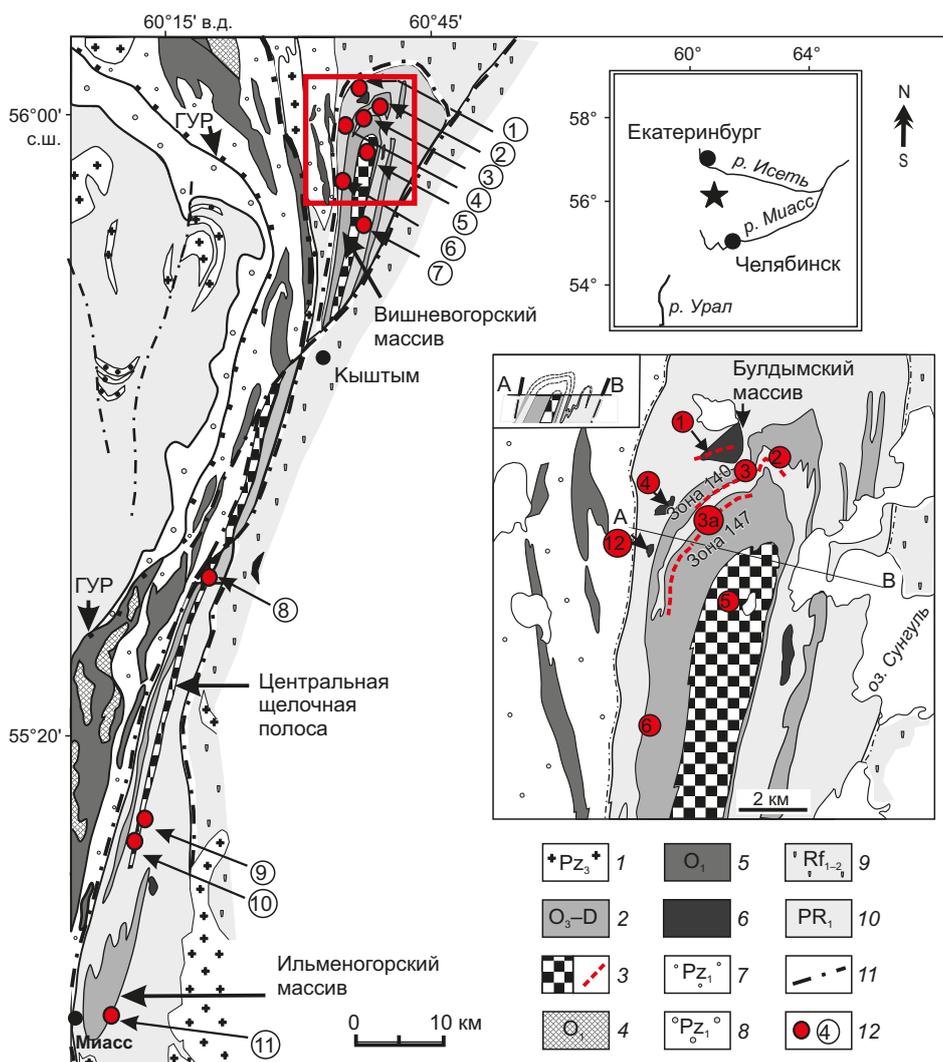


Рис. 1.1. Схема геологического строения Ильмено-Вишневогорского миаскит-фенит-карбонатитового комплекса с основными месторождениями и рудопроявлениями Nb, Zr и PЗЭ, Южный Урал по [Levin et al., 1997; Zoloev et al., 2004].

1 – граниты (Pz₃); 2-3 – Ильмено-Вишневогорский комплекс (O₃-S): 2 – миаскиты Вишневогорского и Ильменогорского массивов, 3 – Центральная щелочная полоса – линейная зона, сложенная фенитами, пластообразными телами миаскитов, сиенитов, глиммеритоподобных пород и карбонатитов; 4 – габбро офиолитовой формации (O₁); 5 – гипербазиты офиолитовой формации (O₁); 6 – ультрабазиты Булдымского комплекса (O₃?); 7 – вулканогенно-осадочные породы Тагило-Магнитогорского мегасинклинария (S-D₂); 8 – сланцы гранато-слюдяные и эклогиты (PZ₁); 9 – плагиосланцы и кварциты обрамления Сысертско-Ильменогорского антиклинария (Rf₁₋₂); 10 – плагиогнейсы, гранитные мигматиты, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты Сысертско-Ильменогорского и Уфалейского блоков (PR₁₋₂); 11 – тектонические разломы и несогласия; 12 – основные месторождения и рудопроявления Nb и PЗЭ, связанные с карбонатитами (цифры в кружках): 1 – Булдымское (Nb и PЗЭ), 2-3 – Вишневогорское – Nb (2 – рудная зона 125, 3 – рудная зона 140, 3а – рудная зона 147), 4 – Спирихинское (PЗЭ), 5 – Светлинское (Nb), 6 – Ерёменское (Nb и Zr), 7 – Потанинское (Nb), 8 – Увильдинское (Nb), 9 – Байдашевское (Nb), 10 – Ишкульское (Nb), 11 – Ильменское, копь 97 (Nb и PЗЭ), 12 – Халдихинское (PЗЭ и Nb).

Fig. 1.1. Geological structure of the Ilmen-Vishnevogorsky miaskite-phenite-carbonatite complex with major deposits and ore occurrences of Nb, Zr and REE in the Southern Urals, taken from [Levin et al., 1997; Zoloev et al., 2004].

1 – granite (Pz₃); 2-3 – Ilmen-Vishnevogorsky complex (O₃-S): 2 – miaskites of Vishnevogorsky and Ilmenogorsky massifs, 3 – Central alkaline band being a linear zone composed of phenite, bedded bodies of miaskites, syenites of glimmerite-like rocks and carbonatites; 4 – gabbro of ophiolite formation (O₁); 5 – ultrabasic rocks of ophiolite formation (O₁); 6 – ultrabasic rocks of Buldym complex (O₃?); 7 – volcanic-sedimentary rocks of the Tagil-Magnitogorsky megasynclinerium (S-D₂); 8 – garnet-micaceous shales and eclogites (PZ₁); 9 – plagioshales and quartzites from framing of Syseretsky-Ilmenogorsky anticlinorium (Rf₁₋₂); 10 – plagiogneisses, granite migmatites, crystalline schists, amphibolites, quartzites of Syretsky-Ilmenogorsky and Ufaley blocks (PR₁₋₂); 11 – tectonic faults and discordances; 12 – major deposits and ore occurrences of Nb and REE associated with carbonatites (numbers in circles): 1 – Buldymsky (Nb and REE), 2-3 – Vishnevogorsky – Nb (2 – ore zone 125, 3 – ore zone 140, 3a – ore zone 147), 4 – Spirikhinsky (REE), 5 – Svetlinsky (Nb), 6 – Ereminsky (Nb and Zr), 7 – Potaninsky (Nb), 8 – Uvildinsky (Nb), 9 – Baidashevsky (Nb), 10 – Ishkulsky (Nb), 11 – Ilmen, pit 97 (Nb and REE), 12 – Khaldikhinsky (REE and Nb).