

УДК: 551.22, 550.42

DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-9

**ИСТОЧНИКИ МАГМ И МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ
МАССИВА МАЛЮТКА (ХУДОЛАЗОВСКИЙ КОМПЛЕКС, ЮЖНЫЙ УРАЛ):
ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И Rb-Sr–Sm-Nd
ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА**

И. Р. Рахимов

*Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра РАН, 450077, г. Уфа,
ул. К. Маркса, 16/2, E-mail: rigel92@mail.ru*

Рудоносные штоки ультраосновных пород отвечают наиболее примитивным магмам худолазовского дифференцированного комплекса. К ним относится массив Малютка, для которого впервые приведена геохимическая характеристика. Массив расположен в тектонизированных туфопесчаниках зилаирской свиты и рассматривается как апофиза, отделившаяся по разрывным нарушениям от кумулюсного горизонта гипотетического крупного магматического тела, залегающего в основании Худолазовской мульды (Западно-Магнитогорская зона). Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные пород ($ISr(T) = -2.03 \dots -4.73$, $\epsilon Nd(T) = +8.1 \dots +9.1$) свидетельствуют в пользу незначительной коровой контаминации родоначальной магмы. Источником магм могла служить ювенильная деплетированная мантия (PREMA).

Ключевые слова: худолазовский комплекс, массив Малютка, геология, геохимия, Rb-Sr – Sm-Nd изотопия, мантийный источник

**MAGMA SOURCES AND THE MALYUTKA MASSIVE
FORMATION MODEL (KHUDOLAZ COMPLEX, SOUTHERN URALS):
GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL FEATURES
AND Rb-Sr–Sm-Nd ISOTOPE SYSTEM**

I. R. Rakhimov

*Institute of Geology, Ufa Federal Research Center of RAS, 450077, Russia, Ufa, K. Marx st., 16/2, E-mail:
rigel92@mail.ru*

Ultramafic ore-bearing stocks corresponds to the most primitive magmas of the Khudolaz differentiated complex. These include the Malyutka massif that acquired geochemical characteristics in this work. The massif is located in the tectonized tuffaceous sandstones of the Zilair Formation and is considered to be an apophysis, separated by faults from the cumulus horizon of a hypothetical large magmatic body lying at the base of the Khudolaz trough (West Magnitogorsk zone). Sm-Nd and Rb-Sr isotope data of rocks ($ISr(T) = -2.03 \dots -4.73$, $\epsilon Nd(T) = +8.1 \dots +9.1$) testify in favor of insignificant crustal contamination of the parental magma. The parental magma source could have been mantle PREMA-type.

Key words: Khudolaz complex, Malyutka massif, geology, geochemistry, Rb-Sr – Sm-Nd isotop system, mantle source

Для цитирования: Рахимов И.Р. Источники магм и модель формирования массива Малютка (худолазовский комплекс, Южный Урал): геолого-геохимические особенности и Rb-Sr–Sm-Nd изотопная систематика // Геологический вестник. 2020. № 3. С. 112–122. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-9.

For citation: Rakhimov I.R. (2020) Magma sources and the Malyutka massive formation model (Khudolaz complex, Southern Urals): geological and geochemical features and Rb-Sr–Sm-Nd isotope system. *Geologicheskii vestnik*. No. 3. P. 111–122. DOI: 10.31084/2619-0087/2020-3-9.

Введение

Худолазовский дифференцированный комплекс развит в центральной части Южного Урала и изучается с конца 40-х годов XX века. Это один из интереснейших объектов региона, характеризующийся сложным геологическим строением и обладающий платинометальным потенциалом. На протяжении более 70 лет взгляды на его геологическое строение, петрологию и генезис связанного с ним сульфидного Cu-Ni оруденения неоднократно менялись и совершенствовались [Салихов, Пшеничный, 1984; Рахимов, 2017]. Автором настоящей статьи в строении худолазовского комплекса выделяются 3 типа интрузий: 1) небольшие штоки ультраосновных пород, 2) относительно крупные и в разной степени дифференцированные хонолиты меланократовых габбро, 3) относительно мелкие и однородные хонолиты лейкократовых габбро [Рахимов, 2017].

Массив *Малютка* является одним из представителей группы ультраосновных тел худолазовского комплекса. Это небольшой рудоносный шток, локализованный в западном борту Худолазовской мульды [Рахимов и др., 2019]. На примере таких компактных массивов можно решать различные генетические проблемы худолазовского комплекса и разрабатывать более достоверную модель его формирования.

Цель данной работы — дать геохимическую характеристику пород массива Малютка, обсудить потенциальные источники магм и предложить геологическую модель его формирования.

Характеристика объекта исследований Геологическое строение

Массив Малютка локализован в западном крыле Худолазовской мульды (рис. 1а), на восточном склоне хребта Улугуртау. На хребте обнажаются дислоцированные вулканогенно-осадочные толщи биягодинской и зилаирской свит, здесь предполагается наличие разрывных нарушений сбросового типа. Размеры интрузии в плане составляют 190×110 м, а мощность не менее 30 м. По имеющимся геологическим данным массив представляет собой шток (рис. 1б), однако через него пробурено всего 2 скважины (в северо-западной части) и питающий канал при этом не подсечен. Не исключается вероятность более сложной формы интрузивного тела. Вещающими породами являются туфопесчаники, тефроиды и граувакки зилаирской свиты,

залегающие под углом 33°, с азимутом падения 104°. Породы интенсивно кливажированы и местами рассланцованы.

Краткая петрография

Массив в целом имеет однородное строение и сложен большей частью мелко- и среднезернистыми пойкилоофитовыми плагиоклаз-роговообманковыми перидотитами — плагиошригеймитами (рис. 2). Количество оливина существенно возрастает в направлении от верхней части тела к нижней (от 15 до 40 об. %). В нижней части интрузии выделяются не менее двух линзовидных тел вкрапленных сульфидных руд (рис. 1б). В приконтактной части массива развиты обедненные оливином мелкозернистые габбро, имеющие габброофитовую структуру. Породы в различной степени изменены гидротермально-метасоматическими процессами, в результате чего по первичным минералам сформировались разнообразные ассоциации вторичных минералов пропилитовой и аргиллизитовой фаций метасоматоза.

Оливин представлен изометричными зернами размером 0.2–1.3 мм, нередко образующими сростки. Они находятся в виде включений внутри ойкокристаллов клинопироксена или бурой роговой обманки, реже — флогопита (рис. 2). Часто оливин псевдоморфно замещен серпентином и тальком, клинопироксен — хлоритом и амфиболом, а краевые зоны роговой обманки редко — вторичным амфиболом. Плагиоклаз в неизменном виде практически не встречается и представлен лейстами, частично или нацело замещенными вторичными минералами — альбитом, эпидотом, хлоритом, глинистыми минералами. Роговая обманка встречается в виде ксеноморфных пойкилитовых зерен размером до 5 мм. В отличие от оливина и плагиоклаза она распределена в массиве более равномерно. В приконтактных габбро роговая обманка иногда образует хорошо ограненные призматические кристаллы. Флогопит в виде чешуйчатых выделений окаймляет серпентинизированные зерна оливина и является одним из наиболее поздних магматических минералов.

Сульфидные минералы представлены совместными пентландит-халькопирит-пирротинowymi сростками, имеющими округлую форму или образующими интерсервальную вкрапленность. В рудных телах их количество достигает ~12 об. %. Другие рудные минералы — алюмошпинель, титаномагнетит, магнетит, ильменит — являются редкими.

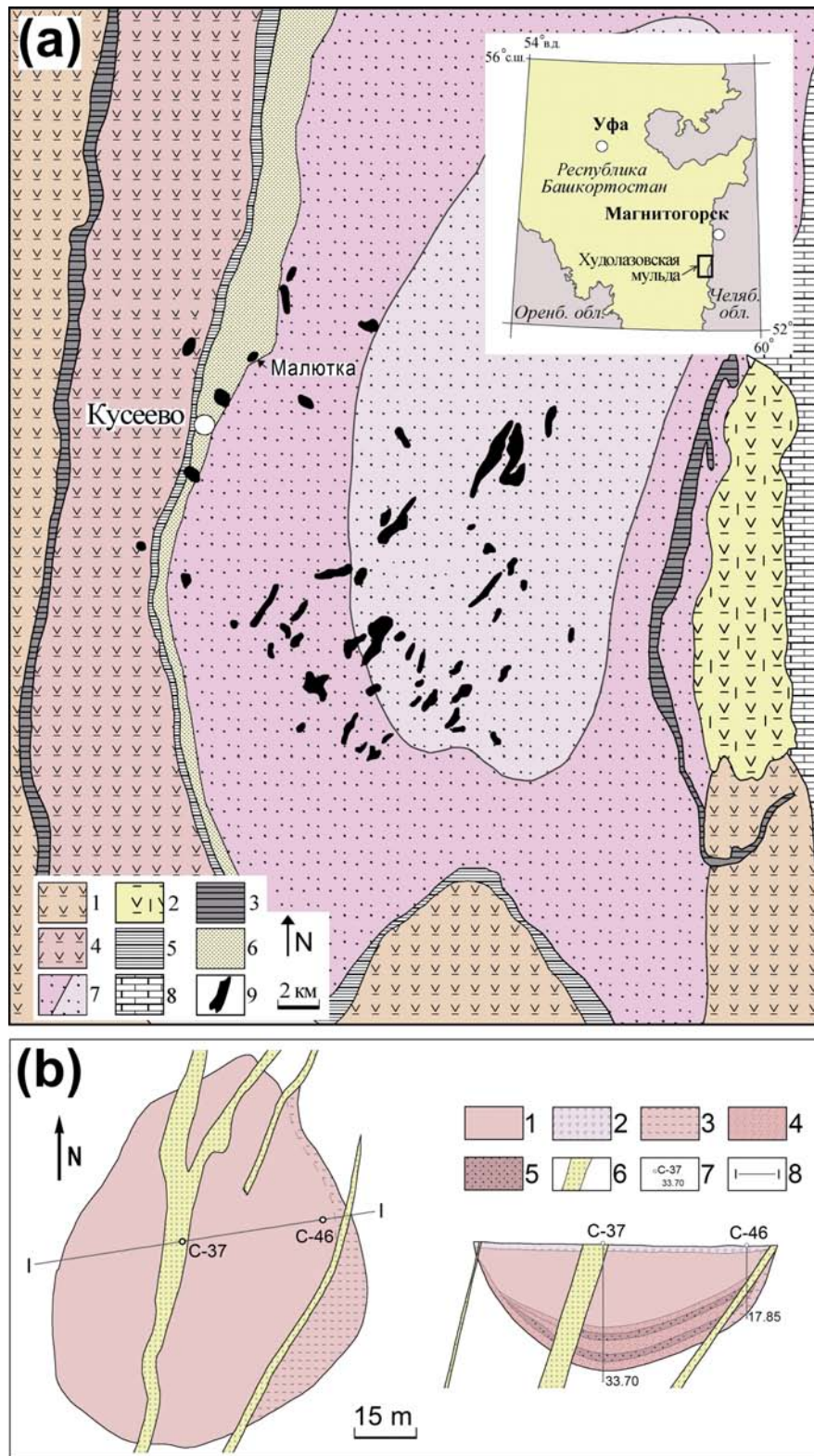


Рис. 1. Геологическая схема Худолазовской мульды (а) и план обнажения массива Малютка с геологическим разрезом (б), по [Рахимов и др., 2019]

Fig. 1. Geological map of Khudolaz trough (a) and plan of Malyutka massif outcrop with geological section (b), after [Rakhimov et al., 2019]

Условные обозначения к рис. 1. (а): 1 — вулканогенные толщи ирендыкской свиты (D_2ef_1), 2 — вулканогенные толщи карамальташской свиты (D_2ef_2), 3 — кремнистые отложения ярлыкаповской свиты (D_2ef_3), 4 — вулканогенно-осадочные толщи улутауской свиты ($D_{2-3zv-f}$), 5 — кремнистые отложения мукасовской свиты (D_3f), 6 — биягодинский олистостромовый горизонт (D_3f-fm), 7 — флишодные отложения нижней (D_3fm_{1-2}) и верхней ($D_3fm_2-C_1t_1$) подсвит зилаирской свиты, 8 — вулcano-терригенно-карбонатные отложения березовской свиты (C_1t-v), 9 — интрузии худолазовского комплекса (C_1v-s); (б): 1 — характерные габброиды массива, 2 — кора выветривания, 3 — зона рассланцевания, 4 — убогие руды ($Ni < 0.3\%$), 5 — рядовые руды ($Ni 0.3-1\%$), 6 — дайки спессартитов, 7 — наименование и глубина скважин, 8 — линия разреза.

Legend to fig. 1. (a): 1 — volcanogenic rocks of Irendyk Formation (D_2ef_1), 2 — volcanogenic rocks of Karamalytash Formation (D_2ef_2), 3 — siliceous sediments of Yarlykapovo Formation (D_2ef_3), 4 — volcanogenic-sedimentary deposits of Ulutau Formation ($D_{2-3zv-f}$), 5 — siliceous sediments of Mukasovo Formation (D_3f), 6 — Biyagoda olistostrome horizon (D_3f-fm), 7 — flyshoid sediments of Lower (D_3fm_{1-2}) and Upper ($D_3fm_2-C_1t_1$) subformations of Zilair Formation, 8 — volcano-terrigeno-carbonate sediments of Beryozovka Formation (C_1t-v), 9 — intrusions of Khudolaz complex; (b): 1 — typical gabbro of massif, 2 — weathering crust, 3 — zone of shists, 4 — poor ores ($Ni < 0.3\%$), 5 — ordinary ores ($Ni 0.3-1\%$), 6 — spessartite dykes, 7 — names and depth of holes, 8 — cross-section line.

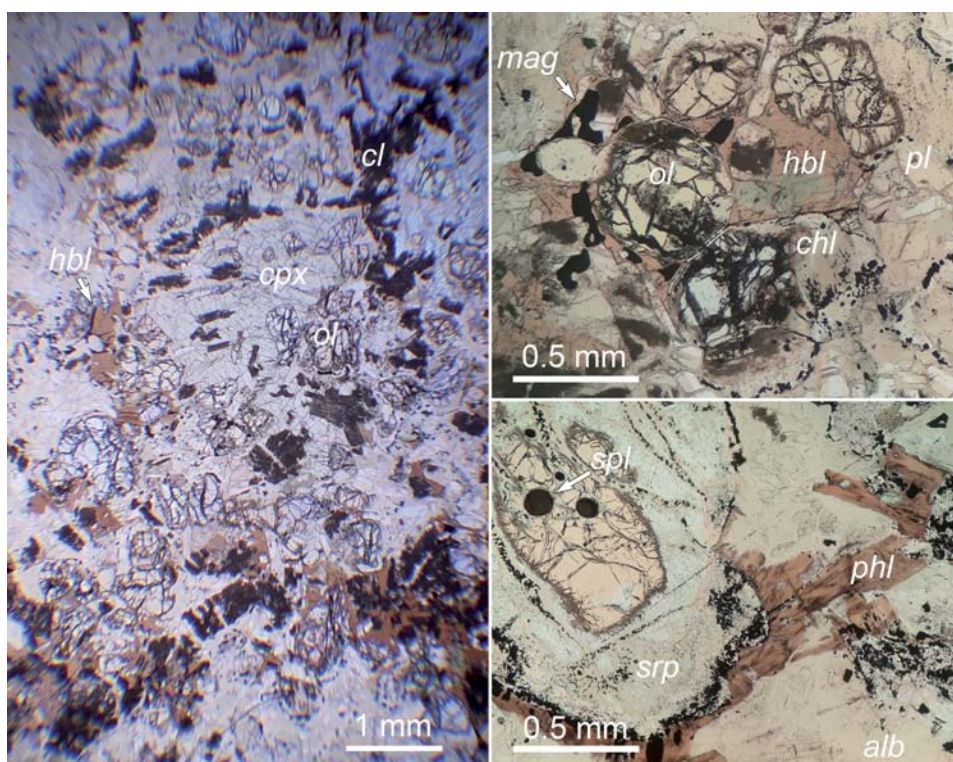


Рис. 2. Характерные породы массива Малютка (проходящий свет)

Примечание: alb — альбит, chl — хлорит, cl — глинистый материал, cpx — клинопироксен, hbl — роговая обманка, mag — магнетит, ol — оливин, phl — флогопит, pl — плагиоклаз, spl — шпинель, srp — серпентин.

Fig. 2. Typical rocks of Malyutka massif (transmitted light)

Note: alb — albite, chl — chlorite, cl — clay matter, cpx — clinopyroxene, hbl — hornblende, mag — magnetite, ol — olivine, phl — phlogopite, pl — plagioclase, spl — spinel, srp — serpentine.

Методика исследований

Коллекция образцов массива Малютка включает 2 пробы из обнажений и 26 керновых проб. Для характеристики геологического строения использовались результаты собственных натурных наблюдений и данные производственных отчетов [Бучковский и др., 1971ф].

Микроскопическое изучение пород выполнялось в прозрачных полированных шлифах при помощи поляризационного микроскопа Ахискор 40 А, а также сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3.

Химический состав пород определялся с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) (для петрогенных элементов) и масс-спектрометрии

с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) (микроэлементы). Анализ XRF проводился на спектрометре Carl Zeiss VRA-30 (ИГ УФИЦ РАН, г. Уфа) с использованием вольфрамовой трубки при напряжении 30–40 кВ, силе тока 40 мА. Для построения калибровочных графиков были использованы государственные стандартные образцы магматических пород с аттестованными содержаниями элементов. Анализ ICP MS выполнялся при помощи масс-спектрометра Perkin Elmer ELAN 9000 (ЦКП «Геоаналитик», ИГТ УрО РАН, г. Екатеринбург). Типичные операционные условия масс-спектрометра ELAN 9000 при мультиэлементном анализе проб следующие: мощность радиочастотного генератора — 1300 Вт, материал конусов интерфейса — платина или никель. Для построения градуировочных зависимостей применяли мультиэлементные стандартные растворы.

Измерения изотопного состава неодама и концентраций Sm и Nd проводились на 7-канальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) (ЦКП ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты) в статическом двухленточном режиме с использованием ренийевых и танталовых лент. Ошибка в $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ соотношениях составляет 0.3% (2σ) — среднее значение из 7 измерений в стандарте BCR. Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе не превышает 0.005%. Определение изотопного состава Sr и содержаний Rb и Sr проводилось на масс-спектрометре МИ-1201-Т (ЦКП ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты) в одноленточном режиме на танталовых лентах. Погрешность определения изотопного состава (95% доверительный интервал) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ не превышает $\pm 0.04\%$, определения $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ отношений — $\pm 1.0\%$. При расчете величин $\varepsilon\text{Nd}(T)$ и $\text{ISr}(T)$ использовались современные значения CHUR и BSE по [Bouvier et al., 2008] ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512630$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1960$), UR по [Toyama et al., 2012] ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.08199$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.704250$).

Результаты исследований

Петрохимия

В шприсгеймитах массива Малютка незначительно варьируют содержания MgO (18.3–25.8 мас. %) и существенно — содержания FeO_t (10.6–18.3 мас. %) (табл. 1). При этом им характерны весьма умеренные вариации индекса $Mg\#$: $100 \times \text{MgO}/(\text{MgO} + \text{FeO}_t + \text{Mn}) = 54–64$. Коэффициент глиноземистости шприсгеймитов $al' \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})$ вариативен — 0.12–0.44 и в среднем составляет 0.22 (низкоглиноземистый тип). По содержанию TiO_2 (0.5–1.0 мас. %)

породы классифицируются как умереннотитанистые. Также они умеренно обогащены P_2O_5 (~0.20 мас. %). Шприсгеймиты отвечают ряду нормальнощелочных ультрабазитов с калий-натровым типом щелочности ($\text{Na}/\text{K} \sim 2.5$), хотя содержания калия сильно варьируют, что связано с неравномерно выраженными метасоматическими изменениями пород. По соотношению FeO_t/MgO и SiO_2 породы характеризуются промежуточным положением между известково-щелочной и толеитовой сериями, что типично для всего худолазовского комплекса [Рахимов, 2017].

На бинарных диаграммах, построенных в координатах « MgO –оксид» (рис. 3), хорошо видны зависимости концентраций ряда петрогенных оксидов от содержания MgO , контролируемого в породах в основном оливином. Так, в поведении SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , а также TiO_2 наблюдается довольно отчетливая отрицательная корреляция с MgO . Их содержания (кроме последнего) контролируются полевыми шпатами, соответственно более лейкократовые разновидности обогащены этими элементами и обеднены магнием. Положительная корреляция с MgO характерна для FeO_t и K_2O . Более богатые оливином разности пород сопровождаются более крупными и многочисленными выделениями флогопита — основного носителя калия в первичных породах, а часто — также более богатой сульфидной вкрапленностью (ликвационно-гравитационные руды) — носителем железа, серы и главных рудных элементов (Cu и Ni).

Эндоконтактовое габбро массива Малютка, состоящее в основном из плагиоклаза, пироксена и роговой обманки, отличается от шприсгеймитов высокой глиноземистостью ($al'=0.8$), повышенным содержанием титана (1.4 мас. % TiO_2), кальция (8.6 мас. % CaO) и натрия (3.8 мас. % Na_2O). Практически полное отсутствие оливина (<1 мас. %) согласуется с существенно пониженной магнезиальностью, $Mg\#=0.47$.

Геохимия

Шприсгеймиты массива Малютка характеризуются относительно высокими концентрациями крупноионных литофильных элементов (Cs, Rb, Sr, U, Th) и относительно низкими содержаниями таких высокозарядных элементов, как Nb, Ta, Zr, Hf, Sc, Y, REE. Первой группе присущи значительные количественные вариации. На спайдер-диаграмме наблюдается резкая положительная аномалия Rb и Sr, а также достаточно четкий минимум Nb (рис. 4а). Поведение стронция достаточно ясно

Таблица 1. Химический состав пород массива Малютка (петрогенные оксиды и сера в мас. %, элементы в г/т)
Table 1. Chemical composition of rocks of the Malyutka massif (oxides and sulfur in wt. %, elements in ppm)

Элемент	№ образца								
	K18-90	K18-111	3466+3467	3470	3479	3482	3484	3485	3492
SiO ₂	41.00	43.81	38.97	39.49	41.68	38.95	39.95	38.06	46.27
TiO ₂	0.49	0.63	0.75	0.86	1.00	0.85	0.95	0.78	1.37
Al ₂ O ₃	13.65	10.76	6.50	6.16	6.48	5.96	5.72	5.08	16.03
FeO _i	10.95	11.45	16.19	14.85	15.86	14.79	17.50	18.31	10.61
MnO	0.14	0.16	0.22	0.22	0.21	0.22	0.21	0.23	0.16
MgO	19.78	18.60	22.79	24.46	19.00	25.76	21.80	24.00	9.55
CaO	8.19	7.83	3.93	3.98	4.00	3.90	3.78	3.42	8.59
Na ₂ O	1.00	1.35	0.45	0.45	0.60	0.40	0.40	0.45	3.75
K ₂ O	0.14	0.19	0.86	0.94	0.41	0.94	0.29	0.22	0.04
P ₂ O ₅	0.18	0.15	0.23	0.20	0.20	0.20	0.21	0.26	0.27
S	0.05	0.05	0.35	0.14	0.38	0.16	1.19	1.78	0.10
LOI	3.43	4.12	7.83	7.32	9.37	7.20	6.78	6.44	2.42
Sum	99.01	99.10	99.06	99.07	99.19	99.33	98.78	99.02	99.16
Sc	10	11	11	11			13	8	27
V	60	70	70	70	106	94	90	70	220
Cr	370	370	900	700	776	1052	800	700	50
Co	58	68	116	115	122	119	135	180	23
Ni	367	450	1514	785	1119	880	1904	2589	67
Cu	33	24	1784	238	3353	338	8365	14313	37
Zn	40	40	50	50	62	82	60	60	60
Rb	5	9	22	28	20	22	10	5	1.8
Sr	260	270	280	180	201	240	200	160	600
Y	7	10	8	7			9	8	20
Zr	30	40.4	49	46	85	73	63	63	100
Nb	0.7	1	1.4	1.3			1.3	1.2	2.4
Cs	2.9	2.7	6	5.4			1	1	0.22
Ba	21	25	70	60			30	30	80
La	1.6	2	3	3.1			2.7	3.1	6
Ce	4.5	6	8	4.3			7	8	15
Pr	0.7	0.9	1.1	1.1			1.1	1.2	2.1
Nd	3.5	4.3	5	5			5	6	10
Sm	1	1.2	1.2	1.3			1.3	1.4	2.6
Eu	0.42	0.49	0.42	0.46			0.48	0.47	1
Gd	1.2	1.5	1.4	1.5			1.5	1.5	3.1
Tb	0.18	0.23	0.2	0.22			0.24	0.22	0.5
Dy	1.2	1.5	1.3	1.4			1.5	1.4	3.2
Ho	0.25	0.3	0.26	0.3			0.31	0.28	0.7
Er	0.7	0.9	0.8	0.8			0.9	0.8	1.9
Tm	0.1	0.12	0.1	0.12			0.12	0.12	0.27
Yb	0.6	0.8	0.7	0.7			0.8	0.7	1.7
Lu	0.09	0.11	0.1	0.11			0.12	0.11	0.26
Hf	0.6	0.8	0.9	1			1.2	1.1	2.2
Ta	0.042	0.045	0.09	<			<	0.09	0.5
Pb	0.8	0.7	2.2	2.8			10	11	1.4
Th	0.12	0.12	0.26	0.3			0.3	0.24	0.9
U	0.042	0.043	0.09	0.09			0.1	0.071	0.27

Примечание: 1, 2 — безрудные шприсгеймиты (образцы из обнажений), 3–8 — рудоносные шприсгеймиты (керна), 9 — приконтактовое габбро; < — ниже предела обнаружения.

Note: 1, 2 — barren schriesheimites (outcrop's samples), 3–8 — ore-bearing schriesheimites (from cores), 9 — contact gabbro; < — below limit of detection.

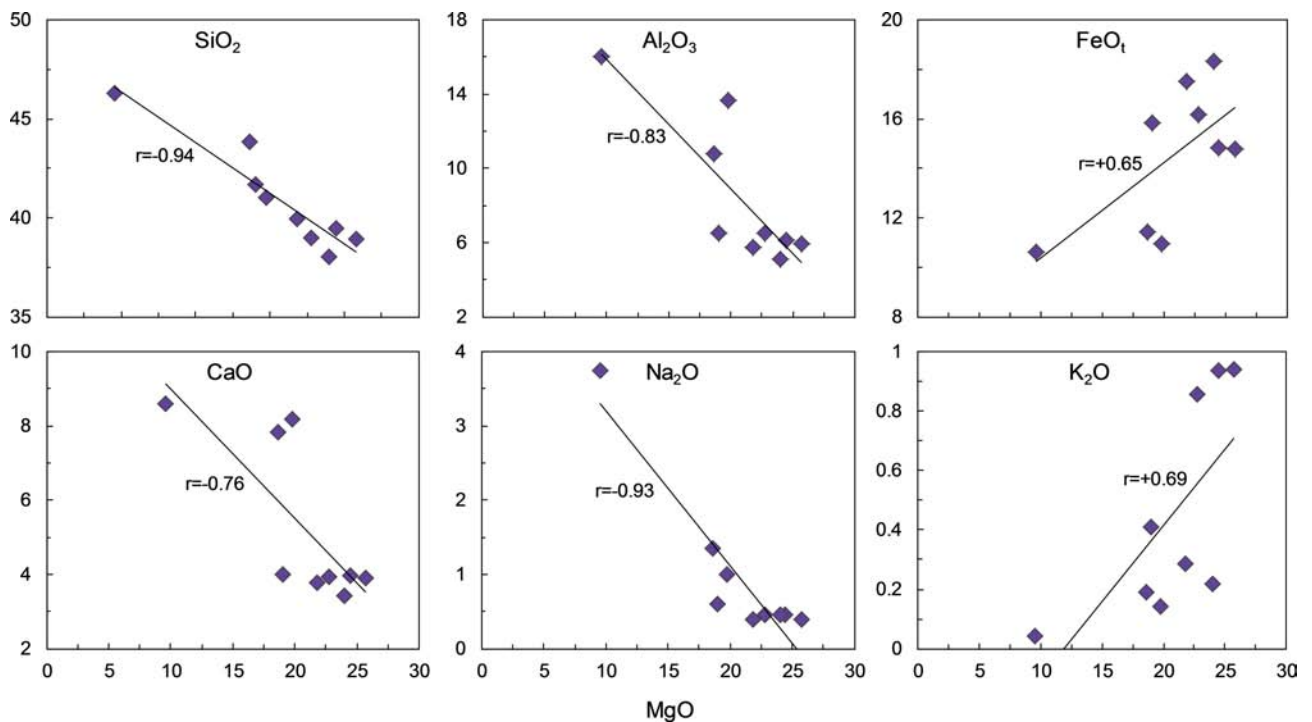


Рис. 3. Бинарные диаграммы в координатах «MgO–оксид» для пород массива Малютка

Примечание: r — коэффициент корреляции Пирсона.

Fig. 3. Binary plots in “MgO–oxide” series for Malyutka massif rocks

Note: r — Pearson correlation coefficient.

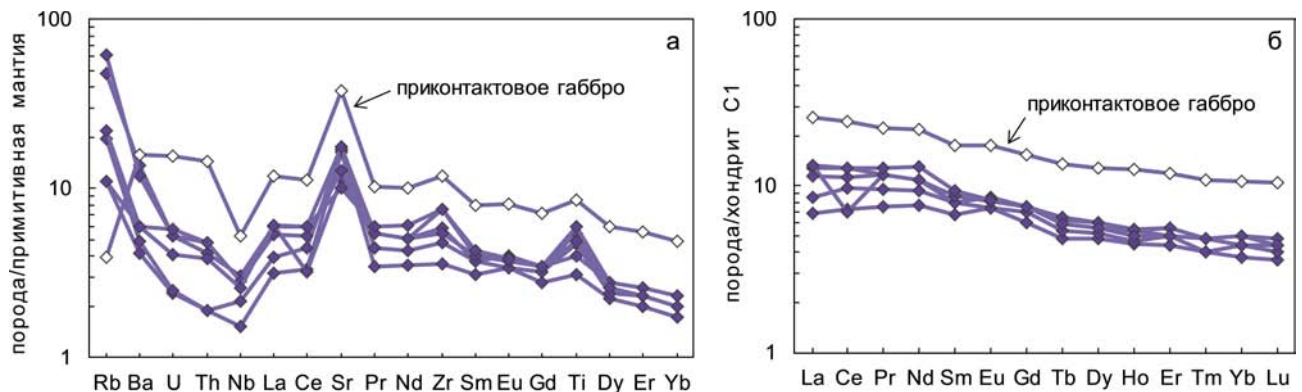


Рис. 4. Мультиэлементные спайдер-диаграммы для пород массива Малютка по данным табл. 1: а) нормировано на состав примитивной мантии [Lyubetskaya, Korenaga, 2007]; б) нормировано на состав хондрита [Lodders, Fegley, 1998]

Fig. 4. Multi-element diagrams for Malyutka massif rocks from Table 1 data: a) normalized in primitive mantle composition [Lyubetskaya, Korenaga, 2007]; b) normalized in chondrite composition [Lodders, Fegley, 1998]

коррелирует с глиноземистостью пород (коэффициент корреляции $r=+0.81$), но рубидий отличается отрицательной корреляцией с Al_2O_3 ($r=-0.63$). Спектры распределения редкоземельных элементов в шрисгеймитах в целом единообразны (рис. 4б),

отмечается их незначительное фракционирование ($La_n/Yb_n \sim 2.5$). Значение европейской аномалии ($Eu/\sqrt{Sm \times Gd}_n$) варьирует от 0.98 до 1.17.

Эндоконтактовое габбро массива Малютка отличается от шрисгеймитов значительно более

высокими концентрациями несовместимых элементов, хотя морфология спектров распределения на мультиэлементных диаграммах у них схожа (рис. 4). Исключением служат уровни концентраций Cs и Rb, резко пониженные в сравнении со шприсгеймитами в 10 раз и более. Концентрации REE в приконтактовом габбро превышают среднее в шприсгеймитах более чем в 2 раза.

Sm-Nd и Rb-Sr изотопная систематика

Sm-Nd и Rb-Sr изотопные данные получены по 2 порошковым пробам шприсгеймитов массива Малютка. Для расчета начальных изотопных соотношений был использован абсолютный возраст худолазовского комплекса — 325 млн лет, полученный U-Pb методом по циркону и бадделейту из массивов Восточный Карасаз и Лира [Салихов и др., 2012].

Первичный изотопный состав неодима характеризуется высоким значением $\epsilon Nd_{CHUR}(325) = +8.1 \dots +9.1$ (табл. 2). Эта величина свидетельствует о значительной деплетированности родоначальной магмы несовместимыми элементами, что согласуется с имеющимися валовыми элементно-геохимическими данными.

Шприсгеймиты характеризуются низким содержанием радиогенного стронция, величины первичных соотношений $^{87}Sr/^{86}Sr(T)$ в 2 пробах очень близки (табл. 3), соответствуя слабоотрицательным значениям $ISr_{UR}(325) = -2.03 \dots -4.73$.

Обсуждение результатов и выводы

Согласно существующей геолого-петрологической модели формирования худолазовского комплекса ультраосновные интрузии, к которым относится и массив Малютка, представляют собой

инъекции магм из нижнего расслоенного горизонта единого гипотетического очага (рис. 5) [Рахимов, 2017; Рахимов, 2020a]. Все известные на сегодняшний день штоки (7 шт.) локализованы в западном крыле Худолазовской мульды. Согласно геохимическим данным и численному моделированию в программе Comagmat, породы массива отвечают продуктам кристаллизации наиболее примитивных магм, сформировавших худолазовский комплекс [Рахимов, 2020a]. При внедрении в место консолидации в земной коре они представляли собой водонасыщенный низкоглиноземистый расплав с вкрапленниками оливина (не менее 20 мас.%) [Рахимов, 2020a, 2020б].

Внедрение родоначальной магмы, судя по всему, происходило по разрывам, образующим пояс северо-восточного простираения [Салихов, Пшеничный, 1984] и возникшим после формирования Худолазовской мульды. Образование штоков, вероятно, произошло по участкам пересечений разнонаправленных разрывов, что и обусловило их морфологию. Малая мощность массива Малютка, установленная бурением, по мнению автора, связана с расположением устья скважины в северо-западной части интрузии, а питающий канал расположен к юго-востоку. Таким образом, массив Малютка, по имеющимся представлениям, является одной из апофиз гипотетического крупного тела [Захаров, Ткачев, 1984ф].

Геохимические особенности пород характеризуют их как производные слабодифференцированной магмы. Они обеднены маломобильными при вторичных процессах высокозарядными элементами, но обогащены высокомобильными крупноионными литофильными элементами.

Представленные изотопно-геохимические данные свидетельствуют о несущественной роли коро-

Таблица 2. Sm-Nd изотопные данные для шприсгеймитов массива Малютка

Table 2. Sm-Nd TIMS data for Malyutka massif schriesheimites

№ пробы	Sm, г/т	Nd, г/т	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon Nd(T)$
K18-90	1.419	4.999	0.171550	0.513044	0.000012	+9.09
3485	1.481	6.118	0.146371	0.512940	0.000018	+8.11

Таблица 3. Rb-Sr изотопные данные для шприсгеймитов массива Малютка

Table 3. Rb-Sr TIMS data for Malyutka massif schriesheimites

№ пробы	Rb, г/т	Sr, г/т	$^{87}Rb/^{86}Sr$	$^{87}Sr/^{86}Sr$	$\pm 2\sigma$	$^{87}Sr/^{86}Sr(T)$	$ISr(T)$
K18-90	6.14	306.3	0.056553	0.70399	0.00024	0.70373	-2.03
3485	5.30	172.7	0.086903	0.70394	0.00021	0.70354	-4.73

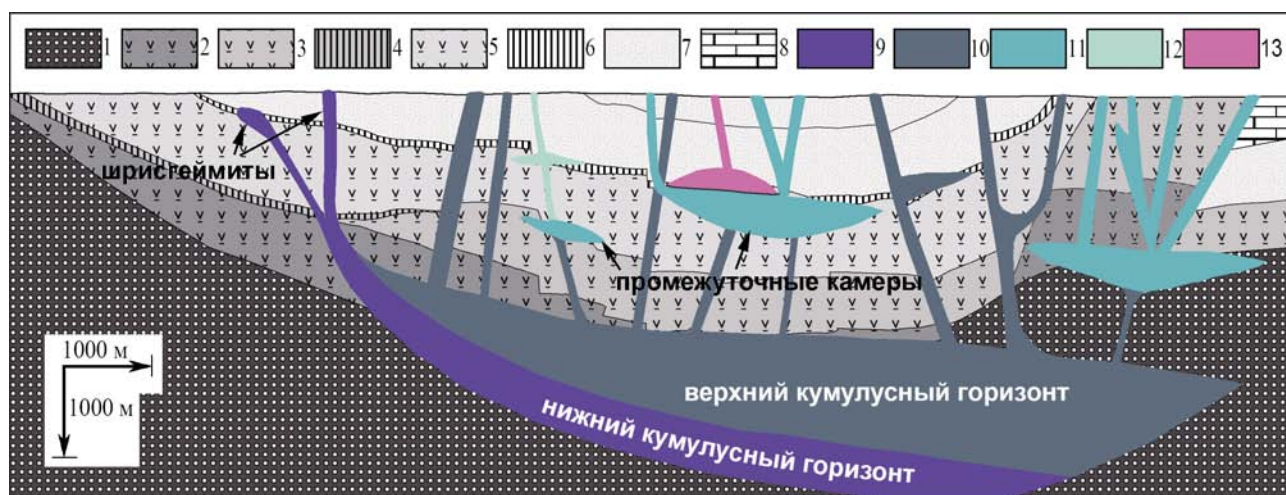


Рис. 5. Схематическая геолого-петрогенетическая модель худолазовского комплекса, по [Рахимов, 2017]

Условные обозначения: 1 — фундамент, 2 — вулканогенные толщи ирендыкской свиты (D_2ef_1), 3 — вулканогенные толщи карамалыташской свиты (D_2ef_2), 4 — кремнистые образования ярлыкяповской свиты (D_2ef_3), 5 — вулканогенно-осадочные толщи улутауской свиты ($D_{2-3zv-f}$), 6 — кремнистые образования мукасовской свиты (D_3f), 7 — осадочные толщи зилаирской свиты (D_3fm-C_1t), 8 — терригенно-карбонатные толщи березовской свиты (C_1t-v), 9 — перидотиты, 10 — оливиновые габброиды и их дифференциаты, 11 — габброидориты, 12 — диориты, 13 — гранитоиды япрактинского комплекса.

Fig. 5. Schematic geological-petrogenetic model of Khudolaz complex, after [Rakhimov, 2017]

Legend: 1 — basement, 2 — volcanogenic rocks of Irendyk Formation (D_2ef_1), 3 — volcanogenic rocks of Karamalytash Formation (D_2ef_2), 4 — siliceous sediments of Yarlykapovo Formation (D_2ef_3), 5 — volcanogenic-sedimentary deposits of Ulutau Formation ($D_{2-3zv-f}$), 6 — siliceous sediments of Mukasovo Formation (D_3f), 7 — sediments of Zilair Formation (D_3fm-C_1t), 8 — terrigenous-carbonate sediments of Beryozovska Formation (C_1t-v), 9 — peridotites, 10 — olivine gabbros and its differentiates, 11 — gabbrodiorites, 12 — diorites, 13 — granites of Yaprakty complex.

вой контаминации родоначального расплава, как минимум в верхнекоровых условиях. Это могло быть обусловлено коротким пребыванием мантийных магм в коровых условиях, а также физическими особенностями мигрирующей в верхнекоровых условиях представлявшей из себя «кристаллическую кашу».

На диаграмме $ISr(T) - \epsilon Nd(T)$ (рис. 6), построенной по времени формирования худолазовского комплекса (325 млн лет), фигуративные точки пород массива Малютка

ка занимают область, наиболее близкую к мантийной компоненте PREMA. Изучаемые породы характеризуются немногим более высоким отношением $^{87}Sr/^{86}Sr$, в целом отвечая по Sr-Nd изотопному

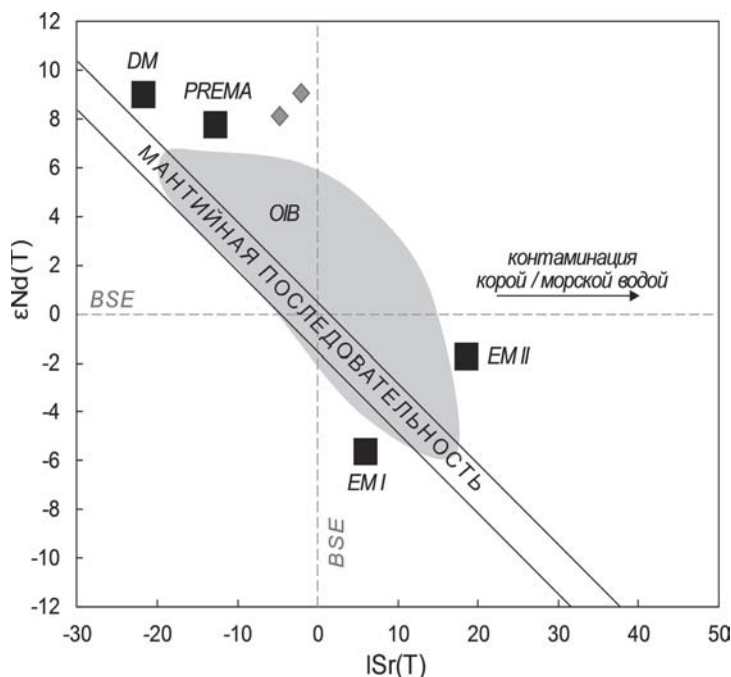


Рис. 6. Диаграмма $ISr(T) - \epsilon Nd(T)$ для пород массива Малютка (ромбы). Поля мантийных компонент заимствованы из [Рахимов, 2020б]

Глобальные мантийные изотопные резервуары: DM — истощенная мантия, EM I и EM II — обогащенные источники, PREMA — преобладающая мантия; OIB — поле базальтов океанических островов.

Fig. 6. $ISr(T) - \epsilon Nd(T)$ diagrams for Malyutka massif rocks (rhombs). Fields of mantle component compositions taken from [Rakhimov, 2020b]

General mantle isotope reservoirs: DM — depleted mantle, EM I and EM II — enriched sources, PREMA — prevalent mantle, OIB — oceanic island basalts field.

составу внутриплитным океаническим базальтам с высоким отношением $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$. Компонент PREMA (преобладающая мантия) в значительной степени близок к примитивной мантии и рассматривается в качестве универсального компонента плюмов [Гусев, 2010]. Хотя в целом породы худолазовского комплекса обладают смешанными геохимическими характеристиками внутриплитного и надсубдукционного режима [Рахимов, 2017], его формирование по геологическим и геохимическим данным связывается с деятельностью мантийного плюма в области аккрецированной окраины Восточно-Европейского кратона [Салихов и др., 2019].

Представленные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

- формирование массива произошло из слабо дифференцированной магмы, внедренной по разрывам в земной коре и состоящей из водонасыщенного расплава и вкрапленников оливина;
- Sm-Nd и Rb-Sr изотопные данные свидетельствуют в пользу незначительной коровой контаминации родоначальной магмы;
- источником магм могла служить ювенильная деплетированная мантия типа PREMA.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-35-00391) и темы № 0252-2017-0012 Госзадания ИГ УФИЦ РАН.

Список литературы:

Гусев Н.И. Возраст (U-Pb, SHRIMP-II), петрология и мантийные источники палеозойских и мезозойских даек долеритов в юго-восточном Горном Алтае // Материалы Всероссийского петрографического совещания. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. С. 199–200.

Рахимов И.Р. Геология, петрология и рудоносность позднедевонско-карбонového интрузивного магматизма Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Уфа, 2017. 20 с.

Рахимов И.Р. Минералогия и главные аспекты петрологии массива Малютка худолазовского комплекса (Южный Урал) // Вестник геонаук. 2020а. № 1. С. 8–18.

Рахимов И.Р. Петрология и геохимия массива Ташлы-Тау, худолазовский дифференцированный комплекс, Южный Урал // Вестник ВГУ. Сер.: Геология. 2020б. № 2. С. 44–57.

Рахимов И.Р., Савельев Д.Е., Вишневикий А.В. Сульфидно-платинометаллическая минерализация измененных габбро массива Малютка худолазовского комплекса: влияние гидротермальных процессов на тип минеральной ассоциации // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 275. С. 15–24.

Салихов Д.Н., Пшеничный Г.Н. Магматизм и оруденение зоны ранней консолидации Магнитогорской эвгеосинклинали. Уфа: БФАН СССР, 1984. 112 с.

Салихов Д.Н., Беликова Г.И., Пучков В.Н., Эрнст Р., Седерlund У., Камо С., Рахимов И.Р., Холоднов В.В. Никеленосный интрузивный комплекс на Южном Урале // Литосфера. 2012. № 6. С. 66–72.

Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р. Субдукция, коллизия и плюмы в эпоху позднепалеозойского магматизма Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. 2019. Т. 19, № 2. С. 191–208.

Bouvier A., Vervoort J.D., Patchetta J.P. The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets // *Earth and Planetary Science Letters*. 2008. Vol. 273, Is. 1–2. P. 48–57.

Lodders K., Fegley B. *The Planetary Scientist's Companion*. New York, Oxford University Press, 1998. 400 p.

Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance // *Journal of geophysical research*. 2007. Vol. 112. P. 1–21.

Toyama C., Muramatsu Y., Yamamoto J., Nakai S., Kaneoka I. Sr and Nd isotope ratios and trace element concentrations in kimberlites from Shandong and Liaoning (China) and the Kimberley area (South Africa) // *Geochemical Journal*. 2012. Vol. 46. P. 45–59.

References:

Bouvier A., Vervoort J.D., Patchetta J.P. (2008) The Lu–Hf and Sm–Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, **273**(1-2), 48-57.

Gusev N.I. (2010) Age (U-Pb, SHRIMP-II), petrology and mantle sources of Paleozoic and Mesozoic dolerite dykes in the South-East Gornyi Altai. *Materialy Vserossiiskogo petrograficheskogo soveshchaniya* [Materials of All-Russian Petrographic meeting]. Yekaterinburg, IGG UrB RAS, 199-200. (In Russian)

Lodders K., Fegley B. (1998) *The Planetary Scientist's Companion*. Oxford University Press, New York, 400 p.

Lyubetskaya T., Korenaga J. (2007) Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance. *Journal of geophysical research*, **112**, 1-21.

Rakhimov I.R. (2017) *Geologiya, petrologiya i rudonost' pozndne Devonско-karbonovogo intruzivnogo magmatizma Zapadno-Magnitogorskoy zony Yuzhnogo Urala. Dis. cand. geol.-min. nauk* [Geology, petrology and ore-mineralization of Late Devonian – Carboniferous intrusive magmatism of the Western Magnitogorsk zone of the Southern Urals. Cand. geol. and min. sci. diss.]. Ufa, 181 p. (In Russian).

Rakhimov I.R. (2020a) Mineralogy and main petrology aspects of Malyutka massif of the Khudolaz complex (Southern Urals). *Vestnik geonauk – Vestnik of Geosciences*, **301**(1), 8-18. (In Russian).

Rakhimov I.R. (2020б) Petrology and geochemistry of Tashly-Tau massif, Khudolaz layered complex, South Urals. *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, (2), 44-57. (In Russian)

Rakhimov I.R., Saveliev D.E., Vishnevskiy A.V. (2019) Sulfide-platinum metal mineralization of Khudolaz complex Malyyutka altered gabbro massif: hydrothermal influence to the mineral association types. *Vestnik IG Komi NC UrO RAN – Bulletin of the Institute of Geology, Komi Science Center, Ural Branch of RAS*, **275**(4), 15-24. (In Russian).

Salikhov D.N., Pshenichnyi G.N. (1984) *Magmatizm i orudnenie zony ranney konsolidatsii Magnitogorskoy evgeosinklinali* [Magmatism and mineralization of the Magnitogorsk eugeosynclinal earlier consolidation zone]. Ufa: Bashkir Branch of the USSR Academy of Sciences, 112 p. (In Russian)

Salikhov D.N., Belikova G.I., Puchkov V.N., Ernst R., Sederlund U., Kamo S., Rakhimov I.R., Kholodnov V.V. (2012)

Ni-bearing intrusive complex in the Southern Urals. *Litosfera*, (6), 66-72. (in Russian)

Salikhov D.N., Kholodnov V.V., Puchkov V.N., Rakhimov I.R. (2019) Subduction, collision and plumes in the epoch of the Late Paleozoic magmatism of the Magnitogorsk zone (the Southern Urals). *Litosfera*. (2), 191-208. (In Russian)

Toyama C., Muramatsu Y., Yamamoto J., Nakai S., Kaneoka I. (2012) Sr and Nd isotope ratios and trace element concentrations in kimberlites from Shandong and Liaoning (China) and the Kimberley area (South Africa). *Geochemical Journal*, **46**, 45-59.

Сведения об авторе:

Рахимов Ильдар Рашитович, канд. геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: rigel92@mail ru

About the author:

Rakhimov Ildar Rashitovich, Candidate of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russia. E-mail: rigel92@mail ru