

Ультрабазитовые штоки худолазовского дифференцированного комплекса (Южный Урал) как свидетельство дифференциации магмы в промежуточных камерах

©2023 И. Р. Рахимов✉

*Институт геологии УФИЦ РАН,
ул. Карла Маркса, 16/2, 450077, Уфа, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Худолазовский дифференцированный комплекс Южного Урала характеризуются сложным геологическим строением и большим разнообразием интрузий по морфологии, петрографии и минералогии пород. Он включает пояс ультрабазитовых штоков, содержащих сульфидно-платино-металльное оруденение. Вопросы происхождения комплекса дискуссионны, поэтому минералого-геохимическое изучение ультрабазитов даёт возможность глубже разобраться в проблеме генезиса худолазовского комплекса.

Методика: Химический состав пород определён при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра X-Calibur и масс-спектрометра Agilent 7500сх. Изучение Sm-Nd изотопной системы произведено на семиканальном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ), Rb-Sr изотопная система изучалась при помощи масс-спектрометра МИ-1201-Т.

Результаты и обсуждение: Основной разновидностью пород является шрисгеймит с кумулятивной структурой, характеризующейся наличием вкрапленников оливина с переменным количеством плагиоклаза и интеркумулусным амфиболом. Показано, что вариации химического состава пород связаны с трендами фракционирования трёх главных минералов пород – оливина, амфибола и плагиоклаза. В целом геохимические особенности пород близки к среднему составу базальтов островных дуг. Предложена модель формирования шрисгеймитовых штоков, включающая дифференциацию исходного расплава в промежуточных камерах с последующей миграцией частично раскристаллизованной магмы из кумулусной части камеры. В месте консолидации интрузии произошло замещение клинопироксена амфиболом за счёт взаимодействия с водонасыщенным расплавом/флюидом. Дополнительным источником воды могла быть кора, на что указывает резкая положительная аномалия цезия в породах.

Заключение: Изотопные Sr-Nd данные свидетельствуют о незначительном вкладе вещества верхней коры в источник расплава. Источником родоначальной магмы являлся компонент, полученный при взаимодействии вещества шпинель-перидотитовой мантии и вещества нижней части островодужной коры.

Ключевые слова: худолазовский комплекс, шрисгеймит, фракционирование, геохимия, Sr-Nd изотопия, источник магмы.

Источник финансирования: Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-77-10049. Часть аналитических работ выполнена за счёт темы № FMRS-2022-0012 Госзадания ИГ УФИЦ РАН.

Для цитирования: Рахимов И. Р. Ультрабазитовые штоки худолазовского дифференцированного комплекса (Южный Урал) как свидетельство дифференциации магмы в промежуточных камерах // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2023. № 4. С. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/63-74>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Рахимов Ильдар Рашитович, e-mail: rigel92@mail.ru

Введение

Худолазовский комплекс (329–325 млн лет, U-Pb) Южного Урала представлен дифференцированной серией пород от перидотитов до плагиогранитов [1]. Уникальность комплекса заключается в том, что он представлен не крупными расслоенными телами, а множеством мелких интрузий как однородного, так и дифференцированного строения, которые могут быть соотнесены с отдельными расслоенными горизонтами крупных массивов [2]. Кроме того, это один из немногих дифференцированных комплексов всего Урала с сульфидно-платинометалльным оруденением, аналогов же фанерозойского возраста нет [2]. Вопросы петрологии худолазовского комплекса дискуссионны на протяжении более 40 лет, что связано со сложным геологическим строением и отсутствием закономерностей в размещении интрузий разного состава, а также богатым минеральным составом пород и разнообразием их вторичных изменений. Согласно оценкам Д. Н. Салихова [3], проведённым по площадной распространённости магматических пород худолазовского комплекса, доля пород основного состава – 82 %, ультраосновных – 5 %, средних – 12 %, а кислых – 1 %. Интересными для изучения и важными для петрогенетической реконструкции комплекса являются мелкие штоки ультрабазитов, результатам минералого-геохимических исследований (включая Sr-Nd изотопию) которых посвящена настоящая статья.

Методика

Рентгенофлуоресцентный анализ проведён на энергодисперсионном спектрометре X-Calibur (Израиль) в ИГ УФИЦ РАН (Уфа). Пределы обнаружений для петрогенных элементов составляли от 0.01 до 0.02 мас. %, для V, Ni и Cr – в диапазоне 5–10 г/т. Для построения калибровочных графиков использовались аттестованные государственные образцы магматических пород. Определение микроэлементного состава выполнено на масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500cx, Agilent Technologies (США) в ТРЦКП (Томск).

Измерения изотопного состава неодима и концентраций Sm и Nd проводились на 7-канальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) (ЦКП ГИ КНЦ РАН, Апатиты) в статическом двухленточном режиме с использованием ренийевых и танталовых лент. Изотопный состав Sr и определение содержания Rb и Sr проводили на масс-спектрометре МИ-1201-Т (ЦКП ГИ КНЦ РАН, Апатиты) в одноленточном режиме на танталовых лентах. При расчёте величин $\epsilon_{Nd}(T)$ и $\epsilon_{Sr}(T)$ использованы современные значения CHUR по [4] ($^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512630$, $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1960$), UR по [5] ($^{87}Rb/^{86}Sr = 0.08199$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.704250$).

Геология, петрография и минералогия ультрабазитов

Известны восемь ультрабазитовых штоков худолазовского комплекса, локализованных в западном кры-

ле Худолазовской мульды (рис. 1а). Все они мелкие, в плане не превышают 150 м по длинной оси, имеют изометричную или вытянутую форму, мощность не более 150 м. Представлены результаты минералого-геохимического изучения семи из них – Малютка, Ташлы-Тау, Кусеево-1, Кусеево-2, Кусеево-3, Салих, Фазлы-Тау. Восьмая интрузия – Ифрат – не включена в текущие исследования, поскольку автору не удалось опробовать её из коренных обнажений, а только из элювиальных обломков, вероятно механически извлечённых при геологоразведочных работах 1970-х гг. Вмещающими породами массивов являются терригенные и вулканотерригенные породы биягодинской свиты (Dzf-fm), среди которых наиболее развиты полимиктовые песчаники и туфопесчаники.

Главной разновидностью пород являются шприсгеймиты и плагиошприсгеймиты – роговообманковые перидотиты и плагиоперидотиты с пойкилитовой структурой. Меньше развиты перидотиты и пикрогаббро. В эндоконтакте встречаются роговообманковые долериты. Породы неравномерно метасоматизированы. В массиве Ташлы-Тау были обнаружены метасоматические амфибол-альбитовые жилы, рассекающие плагиошприсгеймиты. По реликтам и типичным псевдоморфозам вторичных фаз (серпентина, хлорита, эпидота, пренита и др.) установлено, что первичными породообразующими минералами являются (об. %): оливин (20–80), амфибол (25–55), плагиоклаз (0–20) и клинопироксен (3–10) (рис. 1б). Типичным аксессуарным минералом является хромшпинель. Сульфидная Cu-Ni минерализация представлена прожилками и вкраплениями пирротина, халькопирита и пентландита (суммарно достигающим 10 об. %), содержащими включения сперилита, мончеита, майчнерита и других Pt-Pd минералов [2]. Согласно соотношениям этих минералов между собой можно выделить следующие типы кумулатов: оливин+роговая обманка, оливин+плагиоклаз и оливин+роговая обманка+клинопироксен.

Оливин представлен субидiomорфными и идиоморфными изометричными и реже уплощёнными зёрнами размером обычно 1–4 мм. Его состав варьирует от Fo₈₆ до Fo₇₃, содержание Ni 0.07–0.21 мас. %, Cr до 0.02 мас. %. Наиболее богаты оливином породы массивов Кусеево-1 и Кусеево-3, где его количество местами достигает 80 об. %. Хромшпинель встречается как в виде включений в оливине, образуя изометричные зёрна размером 0.05–0.2 мм, так и ксеноморфные зёрна в интерстициях (до 0.5 мм). В первом случае состав хромшпинели отвечает хромистой алумошпинели, а во втором – хроммагнетиту. Амфибол чаще всего образует ксеноморфные пойкилитовые выделения размером 1–10 мм, заполняющие промежутки между кристаллами оливина, реже плагиоклаза. Обычно амфибол представляет собой продукт преобразования клинопироксена. По составу он соответствует магнезиогорнблендиту и магнезиогастингситу с Mg#=75–83 мол. %, где $Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+}) \times 100$ (формул. ед.). Плагиоклаз (An₆₆₋₆₁) практически отсутствует в породах массивов Кусеево-1 и Кусеево-3,

но встречается в остальных, где образует таблитчатые кристаллы размером 0.5–2 мм, встроенные в оливиную матрицу. В эндоконтактовых долеритах плагиоклаз является одним из двух главных минералов (вместе с амфиболом). Клинопироксен ($Wo_{25-43}En_{38-49}Fs_{19-31}$) представлен либо реликтами внутри амфибола, либо ксеноморфными пойкилитовыми выделениями до 3–5 мм в тех участках пород, где относительно

мало амфибола. Редко клинопироксен образует субидiomорфные призматические кристаллы в сростании с оливинном, окружённые амфиболом. В клинопироксене $Ni < 0.01$ мас. % и Cr 0.1–0.6 мас. %. Тот факт, что оливин беднее хромом, чем клинопироксен, может быть связан либо с ранней оливин-шпинелевой котектикой, либо с поздним переуравновешиванием оливина [6].

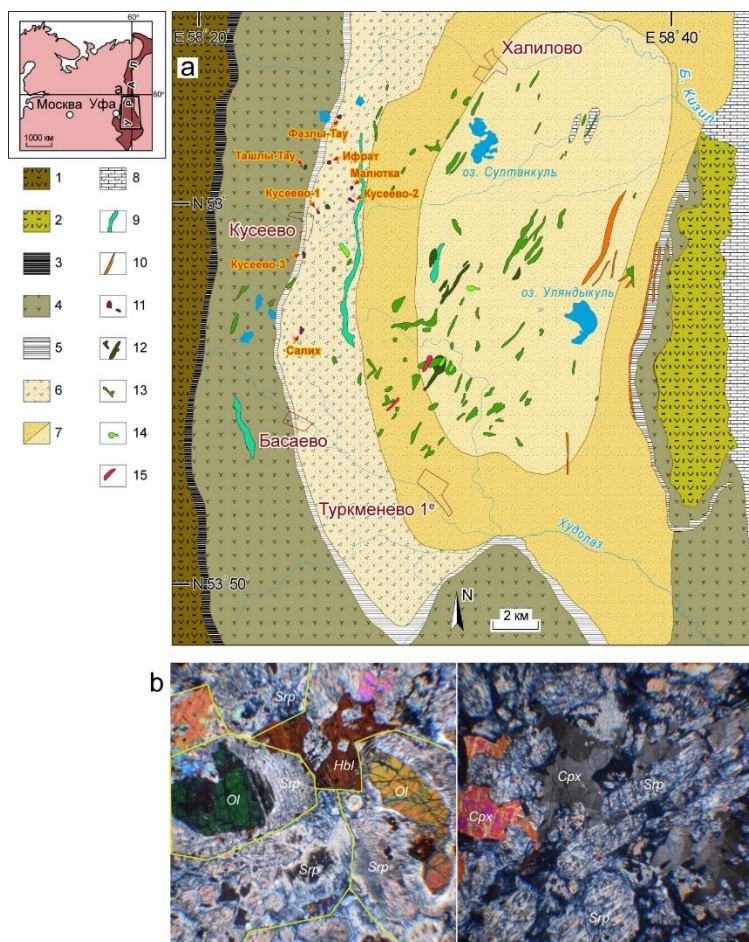


Рис. 1. *a* – Геологическая карта Худолазовской мульды по [7]: 1–8 – стратифицированные вулканогенно-осадочные отложения: 1 – ирендыкской свиты (D_{2ef1}), 2 – карамалыташской свиты (D_{2ef2}), 3 – ярлыкпавской свиты (D_{2ef2}), 4 – улутауской свиты ($D_{2-3zv-f}$), 5 – мукасовской свиты (D_{3f}), 6 – биягодинской свиты (D_{3f-fm}), 7 – нижней подсвиты ($D_{3fm_{1-2}}$) / верхней подсвиты ($D_{3fm_2-C_{1t1}}$) зилаирской свиты, 8 – берёзовской свиты (C_{1t-v}); 9–15 – массивы интрузивных комплексов карбона: 9 – басаевского (долериты), 10 – кизильского (плагиограниты), 11–15 – худолазовского (11 – перидотиты и габброперидотиты, 12 – оливинные габбро, 13 – безоливинные габбро, 14 – диориты, 15 – плагиограниты); *b* – микрофотографии ультрабазитов из массивов Малютка (слева) и Кусеево-2 (справа) в скрещенных николях. Жёлтыми линиями обозначены предполагаемые границы зёрен оливиннов до серпентинизации. *Cpx* – клинопироксен, *Hbl* – роговая обманка, *Ol* – оливин, *Srp* – серпентин.

[Fig. 1.] (*a*) – Geological map of the Khudolaz trough after [7]: (1–8) – stratified volcanic-sedimentary deposits: (1) – Irendyk Suite (D_{2ef1}), (2) – Karamalytash Suite (D_{2ef2}), (3) – Yarlykapovo Suite (D_{2ef2}), (4) – Ulutau Suite ($D_{2-3zv-f}$), (5) – Mukasovo Suite (D_{3f}), (6) – Biyagoda Suite (D_{3f-fm}), (7) – Lower SubSuite ($D_{3fm_{1-2}}$) / Upper SubSuite ($D_{3fm_2-C_{1t1}}$) of Zilair Suite, (8) – Beryozovskiy Suite (C_{1t-v}); (9–15) – massifs of Carboniferous intrusive complexes: (9) – Basaev (dolerites), (10) – Kizil (plagiogranites), (11–15) – Khudolaz ((11) – peridotites and gabbroperidotites, (12) – olivine gabbro, (13) – olivineless gabbro, (14) – diorites, (15) – plagiogranites); (*b*) – photomicrographs of ultrabasic rocks from

Malyutka (left) and Kuseevo-2 (right) in XPL. Yellow lines shows the assumed boundaries of olivine grains before serpentinization. *Cpx* – clinopyroxene, *Hbl* – hornblende, *Ol* – olivine, *Srp* – serpentine.]

Геохимия ультрабазитов

Химический состав изученных проб из каждого массива представлен в табл. 1. Породы имеют низкое содержание SiO_2 (35.2–45.7 мас. %), что связано с повышенным содержанием рудных минералов – сульфидов, оксидов и вторичных гидроксидов, а также частично с вторичными изменениями (например, с хлоритизацией клинопироксена и роговой обманки). Наиболее высокое содержание SiO_2 свойственно приконтактовым породам (обр. 3492, 46.3 мас. % SiO_2). Содержания петрогенных оксидов широко варьируют, что отражено на вариационных бинарных диаграммах (рис. 2). На этих же диаграммах отражены составы породообразующих минералов, а распределение точек составов пород хорошо согласуется с трендами фракционирования в координатах «оливин–амфибол»,

«оливин–плагиоклаз» и «плагиоклаз–амфибол» (рис. 2a–d). Клинопироксен играет несущественную роль, а отдельные смещения точек с трендов могут быть связаны с влиянием сульфидного оруденения (распределение железа) и метасоматических изменений (распределение кальция). Положительная корреляция в содержаниях MgO и Cr связана с обогащённостью наиболее магнезиальных пород хромшпинелью, неясная корреляция между MgO и Ni обусловлена тем, что более половины всего никеля находится в сульфидной форме, а наиболее богатые сульфидами породы не всегда являются наиболее магнезиальными. Шрисгеймиты содержат умеренное количество TiO_2 (0.4–1.1 мас. %), имеют умеренно пониженную магнезиальность ($Mg\# = 72–85$) и умеренное количество щелочей (Na_2O+K_2O 0.6–3.2 мас. %). Содержание серы

Табл. 1. Представительные анализы ультрабазитов худолазовского комплекса
(петрогенные оксиды в мас. %, микроэлементы в г/т)
[**Table 1.** Representative chemical analyzes of Khudolaz complex ultrabasic rocks
(major in wt. %, trace elements in ppm)]

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Element	K ₁₈₋₉₀	3485	3492	K ₁₈₋₉₅	3777	K ₁₈₋₁₁₅	D ₄₋₁₁	D ₁₋₆	K ₂₂₋₂₆	K ₂₂₋₃₁
SiO ₂	41.00	38.06	46.27	41.47	40.48	38.45	42.42	41.12	37.13	36.63
TiO ₂	0.49	0.78	1.37	0.40	0.48	0.77	0.48	0.74	0.59	0.92
Al ₂ O ₃	13.65	5.08	16.03	9.59	11.58	5.89	16.22	5.71	6.99	6.08
Fe ₂ O ₃ *	10.95	18.31	10.61	13.90	18.24	15.02	11.33	12.08	14.22	16.24
MnO	0.14	0.23	0.16	0.19	0.24	0.23	0.12	0.23	0.24	0.25
MgO	19.78	24.00	9.55	20.16	13.54	28.00	12.73	29.85	27.61	27.63
CaO	8.19	3.42	8.59	6.75	6.98	3.27	10.07	3.74	4.53	3.87
Na ₂ O	1.00	0.45	3.75	1.05	1.40	0.46	2.04	0.10	0.44	0.41
K ₂ O	0.14	0.22	0.04	0.48	0.15	0.54	0.23	0.76	0.50	0.43
P ₂ O ₅	0.18	0.26	0.27	0.30	0.38	0.18	0.13	0.08	0.16	0.24
S*	0.05	1.78	0.10	0.05	1.22	0.22	0.28	0.12	0.01	0.01
LOI	3.43	6.44	2.42	5.39	4.84	7.95	3.15	4.50	7.28	7.73
Sum	99.01	99.02	99.16	99.79	99.64	100.97	99.20	98.94	99.70	100.44
Li	11	6	13	21	18	11	9.8	5.9	28	11.9
Be	0.14	0.25	0.6	0.49	0.2	0.3	0.24	0.46	0.32	0.46
Sc	10	8	27	12	29	15	16.8	13.2	14.5	14.9
V	60	70	220	80	90	100	70	73	82	84
Cr	370	700	50	180	400	2100	194	1431	1652	1090
Co	50	190	38	42	90	120	67	104	102	107
Ni	270	3000	60	140	900	1300	337	534	540	500
Cu	37	2300	70	80	1100	250	706	182	93	39
Zn	40	60	60	30	90	60	25	34	44	47
Ga	8	5	21	9	11	9	2	1.24	2.1	1.7
Rb	5	5	1.8	43	5	27	3.6	20	14.1	19
Sr	260	160	600	400	230	100	313	98	193	135
Y	7	8	20	10	12	8	7	9.9	7.8	9.9
Zr	30	63	100	59	97	50	28	69	36	65
Nb	0.7	1.2	2.4	2.6	3.4	1.1	0.69	1.7	1.7	2
Cs	2.9	1	0.22	1.3	0.48	9.6	1.04	11	0.48	0.23
Ba	21	30	80	260	26	50	32	21	10.3	18.6
La	1.6	3.1	6	7	4	2.3	2.1	3.7	68	38
Ce	4.5	8	15	14	8	6	5.2	9.6	3.5	4.7
Pr	0.7	1.2	2.1	1.6	1	0.9	0.79	1.4	8	11.5
Nd	3.5	6	10	7	4.5	4.1	4	6.6	1.11	1.6
Sm	1	1.4	2.6	1.4	1.1	1.1	1.15	1.7	5	7.1
Eu	0.42	0.47	1	0.5	0.41	0.4	0.51	0.58	1.4	1.9
Gd	1.2	1.5	3.1	1.7	1.5	1.2	0.9	1.3	0.48	0.62
Tb	0.18	0.22	0.5	0.24	0.2	0.19	0.21	0.29	1.3	1.8
Dy	1.2	1.4	3.2	1.5	1.3	1.2	1.13	1.6	0.24	0.32
Ho	0.25	0.28	0.7	0.31	0.27	0.25	0.27	0.37	1.3	1.8
Er	0.7	0.8	1.9	0.9	0.8	0.7	0.7	1	0.31	0.38
Tm	0.1	0.12	0.27	0.13	0.11	0.1	0.088	0.13	0.85	1.09
Yb	0.6	0.7	1.7	0.8	0.8	0.7	0.79	1.14	0.107	0.13
Lu	0.09	0.11	0.26	0.13	0.12	0.11	0.099	0.15	0.96	1.18
Hf	0.6	1.1	2.2	0.8	1.6	1	0.65	1.3	0.118	0.15
Ta	0.042	0.09	0.5	<0.001	0.29	<0.001	0.037	0.097	0.77	1.23
Pb	0.8	11	1.4	2	2.9	1.6	2.5	1.4	1.6	1.6
Th	0.12	0.24	0.9	1	1.9	0.3	0.17	0.2	0.32	0.3
U	0.042	0.071	0.27	0.15	0.23	0.11	0.064	0.071	0.106	0.1

Примечание: 1–3 – Малютка, 4, 5 – Ташлы-Тай, 6 – Кусеево-1, 7 – Кусеево-2, 8 – Кусеево-3, 9 – Салих, 10 – Фазлы-Тай.
[Note: (1–3) – Malyutka, (4, 5) – Tashly-Tau, (6) – Kuseevo-1, (7) – Kuseevo-2, (8) – Kuseevo-3, (9) – Salikh, (10) – Fazly-Tau.]

варьирует от 0.01 до 1.78 мас. %, причём низкие концентрации характерны для интенсивно метасоматизированных образцов, где сульфиды обычно замещены гидрокарбонатами и гидроксидами.

Микроэлементный состав ультрабазитов отражает умеренную обогащённость крупноионными литофильными элементами и некоторыми высокозарядными элементами. Нормированные спектры распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) характеризуются пологим уклоном (рис. 3а) при $(La/Yb)_N$ 1.3–6.0,

$(La/Gd)_N=0.8–3.5$, $\delta Eu=0.91–1.52$. Положительная аномалия Eu отмечена в плагиошригемите массива Кушеево-2. Также ультрабазиты характеризуются положительными аномалиями Cs, Sr, Zr и отрицательными – U, Ta (рис. 3б). Сильно неравномерным распределением характеризуются Rb, Th и K. В целом изученные породы по распределению микроэлементов близки к среднему составу островодужных базальтов и существенно отличаются от базальтов океанических островов (рис. 3).

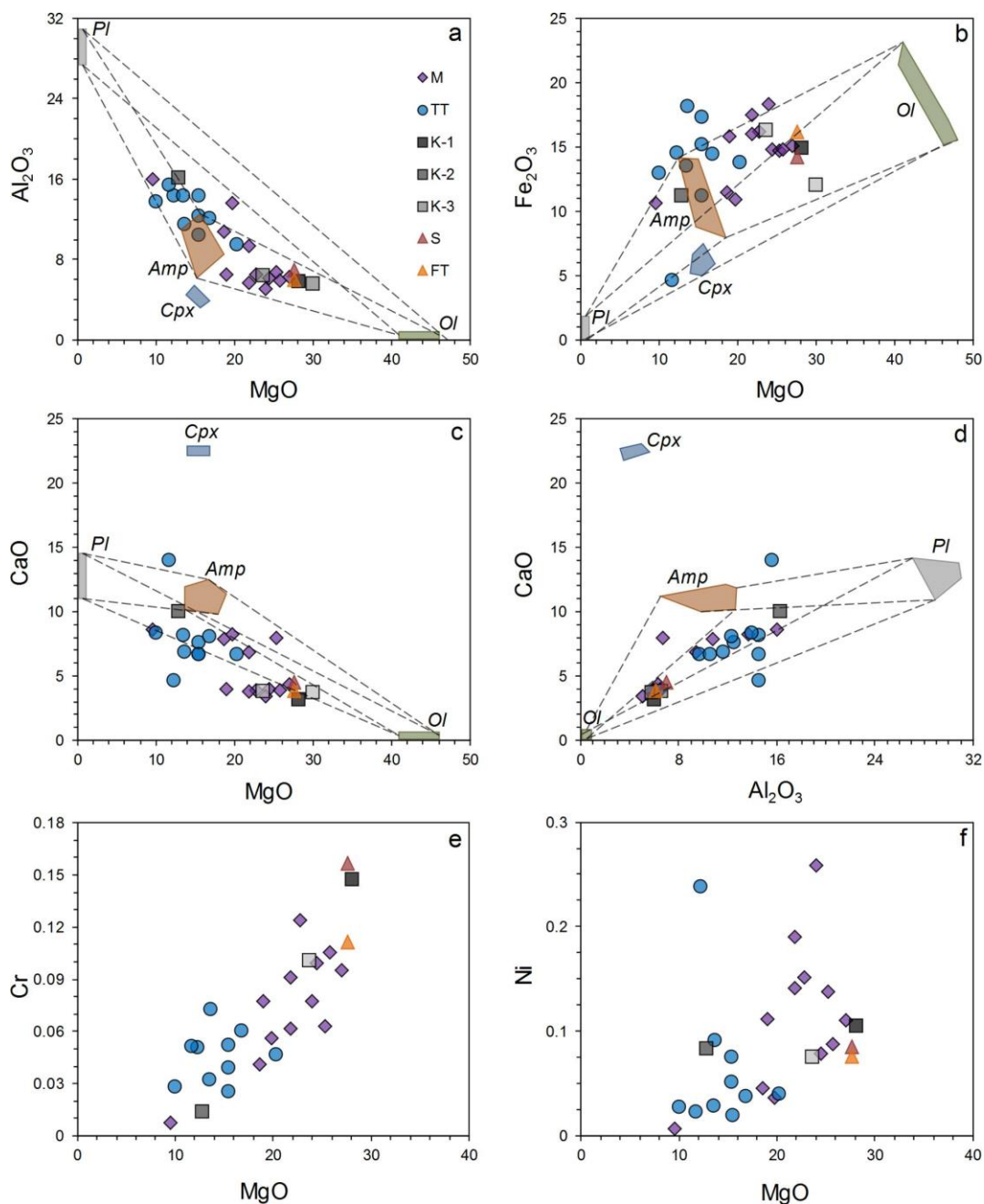


Рис. 2. Вариационные диаграммы (в мас. %) для ультрабазитов и слагающих их минералов (худолазовский комплекс): *M* – массив Малютка, *TT* – Ташлы-Тау, *K-1* – Кушеево-1, *K-2* – Кушеево-2, *K-3* – Кушеево-3, *S* – Салих, *FT* – Фазлы-Тау; *Amp* – амфибол, *Cpx* – клинопироксен, *Ol* – оливин, *Pl* – плагиоклаз.

[**Fig. 2.** Variation diagrams (in wt. %) for ultrabasic rocks and minerals composed their (Khudolaz complex): *M* – Malyutka massif, *TT* – Tashly-Tau, *K-1* – Kuseevo-1, *K-2* – Kuseevo-2, *K-3* – Kuseevo-3, *S* – Salikh, *FT* – Fazly-Tau; *Amp* – amphibole, *Cpx* – clinopyroxene, *Ol* – olivine, *Pl* – plagioclase.]

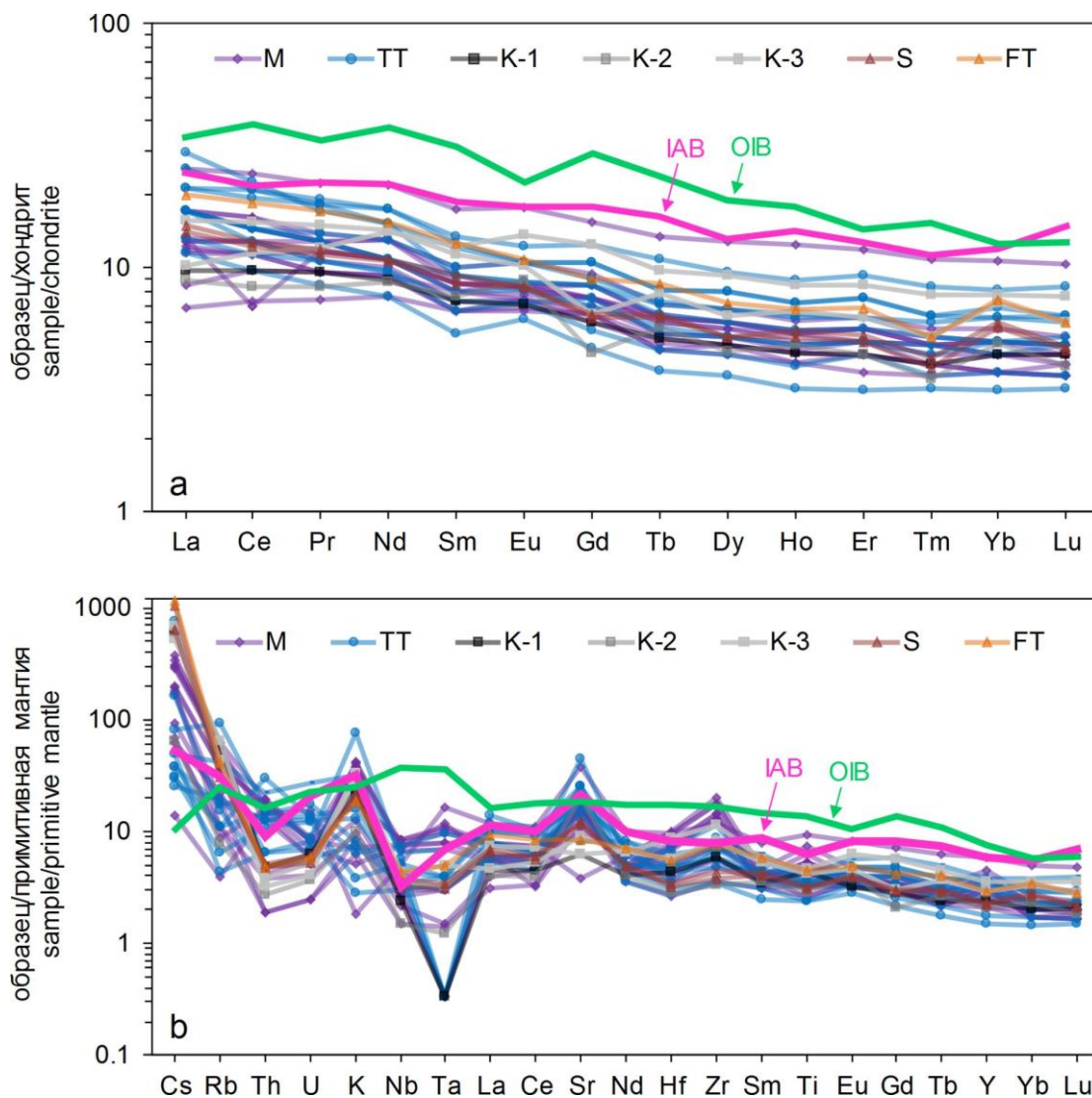


Рис. 3. Нормированные спектры распределения редкоземельных (а), редких и рассеянных (б) элементов в ультрабазитах худолазовского комплекса: *M* – Малютка, *TT* – Ташлы-Тау, *K-1* – Кусеево-1, *K-2* – Кусеево-2, *K-3* – Кусеево-3, *S* – Салих, *FT* – Фазлы-Тау. Составы примитивной мантии и хондрита CI взяты из [8], составы островодужных (IAB) и океанических внутриплитных (OIB) базальтов взяты из [9].

[Fig. 3. Normalized patterns of rare earth elements (a) and other trace elements (b) in ultrabasic rocks of the Khudolaz complex: *M* – Malyutka, *TT* – Tashly-Tau, *K-1* – Kuseevo-1, *K-2* – Kuseevo-2, *K-3* – Kuseevo-3, *S* – Salikh, *FT* – Fazly-Tau. Primitive mantle and chondrite CI compositions taken from [8], island arc basalts (IAB) and ocean island basalts (OIB) taken from [9].]

Изотопия Sr и Nd

Параметры Rb-Sr и Sm-Nd изотопных систем изучены в пробах массивов Малютка и Ташлы-Тау. Для расчёта начальных изотопных отношений были использованы значения абсолютного возраста 325 млн лет [1]. Первичный изотопный состав неодима характеризуется высоким значением $\epsilon_{\text{Nd}_{\text{CHUR}}(325)}$ (+5.3...+10.3) (табл. 2). Эта величина свидетельствует о ювенильном происхождении родоначальной магмы. Величины первичных отношений изотопов стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(T)$ умеренно варьируют (табл. 3) и характеризуются значениями $\epsilon_{\text{Sr}_{\text{UR}}(325)}$ от -5.8 до +8.0. Причём положительные значения $\epsilon_{\text{Sr}_{\text{UR}}(325)}$ характерны породам массива Ташлы-Тау, тогда как в образцах Малютки отмечаются отрицательные величины $\epsilon_{\text{Sr}_{\text{UR}}(325)}$, кроме пробы при-

контактового долерита (3492).

Обсуждение результатов

Источники расплавов ультрабазитов

Худолазовский комплекс характеризуется промежуточными геохимическими характеристиками надсубдукционного и внутриплитного магматизма [1], что осложняет интерпретацию источников родоначального расплава. На основе геохимических данных происхождение этого комплекса рассматривалось как результат смешения плюмового вещества с островодужным (мантийный клин) и коровым [1]. Одной из главных «внутриплитных» черт является сульфидная Cu-Ni-PGE геохимическая специализация худолазовского комплекса. На диаграмме Sr/Nb-Zr (рис. 4а) положение фигуративных точек ультрабазитов подчиняется единому тренду,

отражающему смещению островодужных (IAM – мантии островных дуг) и океанических (MORM – мантии COX и OIM – мантии океанических островов) источников. Связь с плюмовыми источниками не подтверждается. Кроме того, это не подтверждается и по относительно низким Zr/Y и Nb/Y отношениям [11]. На диаграмме La/Sm–Sm/Yb (рис. 4b) большинство фигуратив-

ных точек ультрабазитов (87 %) укладывается в диапазоне степени плавления 0.5–3 % шпинелевого перидотита. Относительно высокие La/Nb отношения в породах (0.9–3) отражают связь с литосферной мантией, хотя наличие величин <1 в нескольких пробах указывает на возможное участие в магмогенерации и более глубокой астеносферной мантии [12].

Табл. 2. Sm-Nd ID TIMS данные для ультрабазитов худолазовского комплекса
[Table 2. Sm-Nd ID TIMS data for Khudolaz complex ultrabasic rocks]

№	№ пробы [Sample]	Sm, г/т	Nd, г/т	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	±2σ	εNd(T)
1	K ₁₈ -90	1.419	4.999	0.171550	0.513044	0.000012	+9.09
2	3470	1.696	6.881	0.149012	0.512894	0.000021	+7.10
3	3479	2.296	9.392	0.147807	0.512904	0.000016	+7.34
4	3482	2.064	8.406	0.148458	0.512898	0.000016	+7.20
5	3485	1.481	6.118	0.146371	0.512940	0.000018	+8.11
6	3487	2.596	10.440	0.150327	0.512955	0.000009	+8.24
7	3492	3.661	14.530	0.152373	0.512895	0.000015	+6.98
8	3775	2.089	8.532	0.148026	0.512846	0.000013	+6.20
9	3780	2.816	11.490	0.148069	0.513055	0.000022	+10.28
10	3780A	2.170	8.700	0.150120	0.512800	0.000020	+5.25

Примечание: анализы 1 и 5 заимствованы из [10], 8–10 заимствованы из [7], остальные – оригинальные данные.
[Note: Analyzes (1) and (5) taken from [10], analyzes (8–10) taken from [7], others are original.]

Табл. 3. Rb-Sr ID TIMS данные для ультрабазитов худолазовского комплекса
[Table 3. Rb-Sr ID TIMS data for Khudolaz complex ultrabasic rocks]

№	№ пробы [Sample]	Rb, г/т	Sr, г/т	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	±2σ	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(T)	εSr(T)
1	K ₁₈ -90	6.14	306.32	0.056553	0.70399	0.000020	0.70373	+2.2657
2	3470	21.40	256.67	0.241100	0.704276	0.000014	0.70316	-5.8065
3	3479	13.05	271.40	0.210394	0.704246	0.000016	0.70327	-4.2172
4	3482	19.96	236.49	0.244055	0.70432	0.000013	0.70319	-5.3804
5	3485	5.32	172.70	0.086903	0.70394	0.000020	0.70354	-0.4404
6	3487	6.31	101.64	0.179688	0.704215	0.000011	0.70338	-2.6278
7	3492	0.92	699.71	0.003811	0.703864	0.000015	0.70385	+3.93835
8	3775	3.41	139.40	0.069042	0.70421	0.000020	0.70389	+4.57147
9	3780	10.01	339.70	0.083621	0.70452	0.000025	0.70413	+8.01907
10	3780A	11.351	400.39	0.081994	0.70425	0.000005	0.70387	+4.29509

Примечание: анализы 1 и 5 заимствованы из [10], 8–10 заимствованы из [7], остальные – оригинальные данные.
[Note: Analyzes (1) and (5) taken from [10], analyzes (8–10) taken from [7], others are original.]

Изотопные Sr-Nd данные характеризуют отсутствие признаков существенной коровой контаминации расплава. На диаграмме εSr(T)–εNd(T), построенной на время 325 млн лет, точки составов ультрабазитов практически полностью перекрываются с полем габбро-гранитных пород худолазовского комплекса, что отражает единство магматического источника (рис. 5). При этом поле составов вмещающих пород (песчаники

и туфопесчаники бягодинской свиты) значительно смещено в правую область диаграммы. Поле составов изучаемых пород частично перекрывается с полем островодужных базальтов. В целом, Sr-Nd изотопная геохимия ультрабазитов отражает близость к источнику типа PREMA, характерному для базальтов типа E-MORB, OIB, а также IAB при субдукции мощной (10–20 км) океанической коры [17].

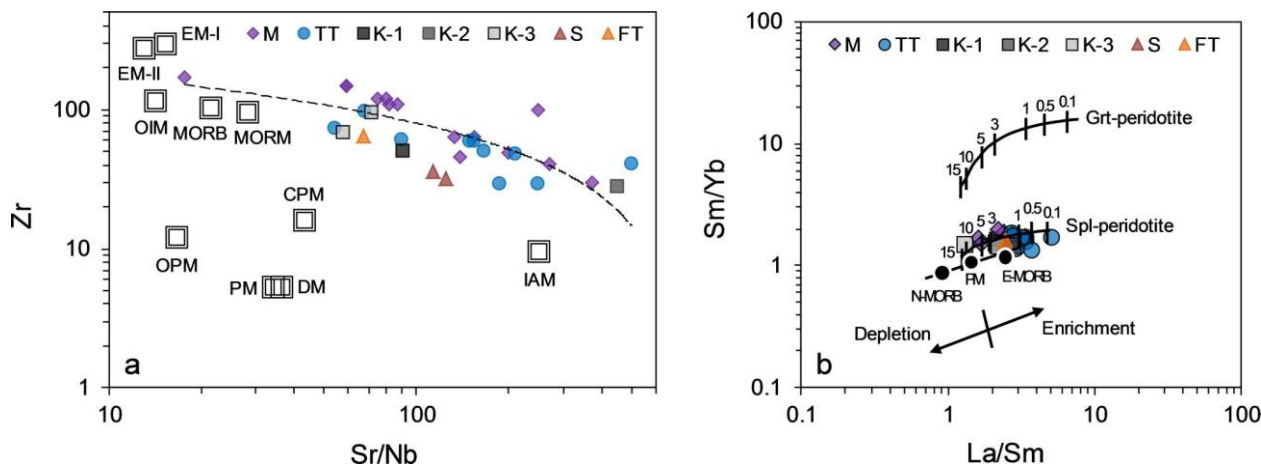


Рис. 4. Диаграммы Sr/Nb–Zr (a) [авторская] и La/Sm–Sm/Yb по [13] (b) для ультрабазитов худолазовского комплекса. Составы мантийных компонентов взяты из [14–16].
[Fig. 4.] Diagrams Sr/Nb–Zr (a) [author's] and La/Sm–Sm/Yb after [13] (b) for Khudolaz complex ultrabasic rocks. Mantle component's compositions taken from [14–16].]

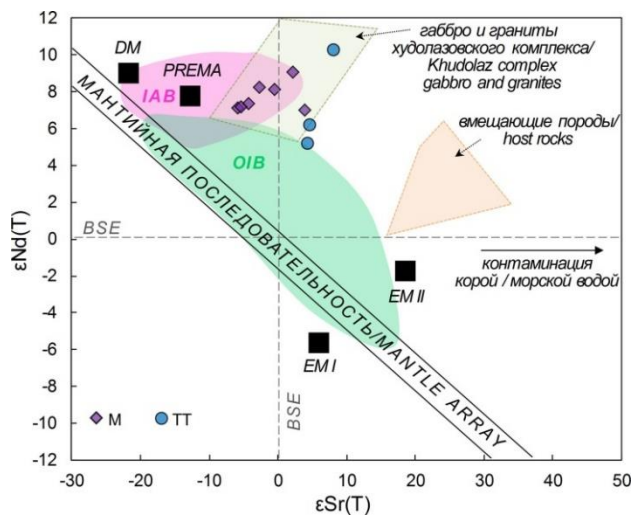


Рис. 5. Диаграмма $\epsilon Sr(325)$ – $\epsilon Nd(325)$ для ультрабазитов худолазовского комплекса по [7]. Глобальные мантийные изотопные резервуары: DM – истощённая мантия, EM I и EM II – обогащённые источники, PREMA – преобладающая мантия; OIB – поле базальтов океанических островов.
[Fig. 5.] Diagram $\epsilon Sr(T)$ – $\epsilon Nd(T)$ diagram for ultrabasic rocks of the Khudolaz complex after [7]. General mantle isotope reservoirs: DM – depleted mantle, EM I and EM II – enriched sources, PREMA – prevalent mantle, OIB – oceanic island basalts field.]

Таким образом, вероятным источником родоначального расплава худолазовского комплекса является мантийный (перидотитовый) компонент, полученный при смешении компонентов внутриплитного и надсубдукционного типа. Такой компонент мог возникнуть по двум сценариям: 1) при внедрении мантийного диапира в область метасоматизированного мантийного клина при отрыве слэба с последующим смешением магм; 2) при ассимиляции островодужной рамы магмами мантийного диапира (небольшого плюма). Учитывая то, что к моменту формирования худолазовского комплекса в восточной части Магнитогорской мегазоны уже был заложен и деформирован при косо́й коллизии рифт [1, 18], знаменующий деградацию над-

субдукционного режима, второй сценарий более предпочтителен. Причиной возникновения такого диапира (или верхнемантийного плюма) могло стать плавление субдцированной плиты, стагнированной в переходной зоне мантии [19]. Подобный сценарий предполагается для норильских траппов, также характеризующихся смешанными надсубдукционными и внутриплитными геохимическими характеристиками [20]. Такой сценарий, а не, к примеру, модель деламинации островодужной коры [21], лучше согласуется с платинометаллической геохимической специализацией худолазовского комплекса.

Модель формирования ультрабазитовых интрузий

Исходя из вышеизложенного можно предложить два варианта формирования шриггеймитов: 1) реакция оливнивого кумулата (\pm плаггиоклаз, \pm клинопироксен) с флюидом/флюидонасыщенным базальтовым расплавом, 2) кристаллизация оливин-амфиболового парагенезиса (\pm плаггиоклаз, \pm клинопироксен) непосредственно из водонасыщенного пикритового расплава in situ. Ранее проведённое моделирование параметров кристаллизации пород массива Ташлы-Тау показало [7], что исходная магма содержала не менее 16–18 мас. % вкрапленников оливина, что подразумевает частичную раскристаллизацию расплава на промежуточном уровне коры. Обилие роговой обманки в ультрабазитах худолазовского комплекса свидетельствует о водонасыщенном характере расплава. Наши исследования показали, что основное количество амфибола образовалось при субсолидусном изменении клинопироксена вследствие его реакции с остаточным водонасыщенным расплавом в диапазоне температур 920–1040 °C и часть – непосредственно при кристаллизации этого расплава [22]. Исходное содержание воды в расплаве было не менее 1.7 мас. % и её содержание по мере кристаллизации возрастало, тогда как содержание MgO уменьшалось [7]. В связи с этим, по методике [23] было оценено количество воды в расплаве в момент кристал-

лизации наиболее магнезиального ($Mg\#=82$) амфибола – 4.8 мас. % H_2O . В дальнейшем, предел растворимости воды в расплаве был превышен, что спровоцировало на позднемагматической стадии серпентинизацию оливина и растворение сульфидов (автометасоматоз).

Тот факт, что серия ультрабазитовых штоков выявлена лишь на западном фланге Худолазовской синклинали может быть обусловлен двумя разными факторами: 1) они ещё не обнаружены в других частях синклинали вместе с габбро-гранитными интрузиями, 2) возникновение тектонически благоприятной ситуации для миграции кумулата со дна промежуточной камеры именно на западном фланге. Отметим, что большая часть интрузий худолазовского комплекса морфологически представлена хонолитами – телами вытянутой формы с ответвлениями, повторяющими контуры разрывных нарушений [3]. Исходя из геологического строения и особенностей петрографических вариаций пород в массивах, нет предпосылки предполагать, что шрисгеймиты являются лишь нижней, сохранившейся частью тела, тогда как верхняя

более лейкократовая часть могла быть полностью эродирована. Соответственно, ультрабазиты штоков являются не *in situ* образовавшимся кумулом, а производными от продуктов дифференциации базальтовой магмы в промежуточных камерах. На рис. 6а показана схематическая модель формирования интрузий худолазовского комплекса, в том числе ультрабазитового (шрисгеймитового) штока. Вначале примитивная магма проникает из магматического очага в кору. Далее на промежуточном уровне формируется камера, где происходит фракционирование магмы с образованием оливинового кумулата и выпадением сульфидных капель (рис. 6б). В дальнейшем возникновение разрывных нарушений в коре сделало возможным миграцию магмы как из кумулатной, так и из надкумуляной частей промежуточной камеры. Внутри пояса ультрабазитовых штоков и к востоку от него встречаются мелкие интрузии безоливиновых амфиболовых габбро, в том числе пегматоидных, производных от высокофракционированного силикатного расплава.

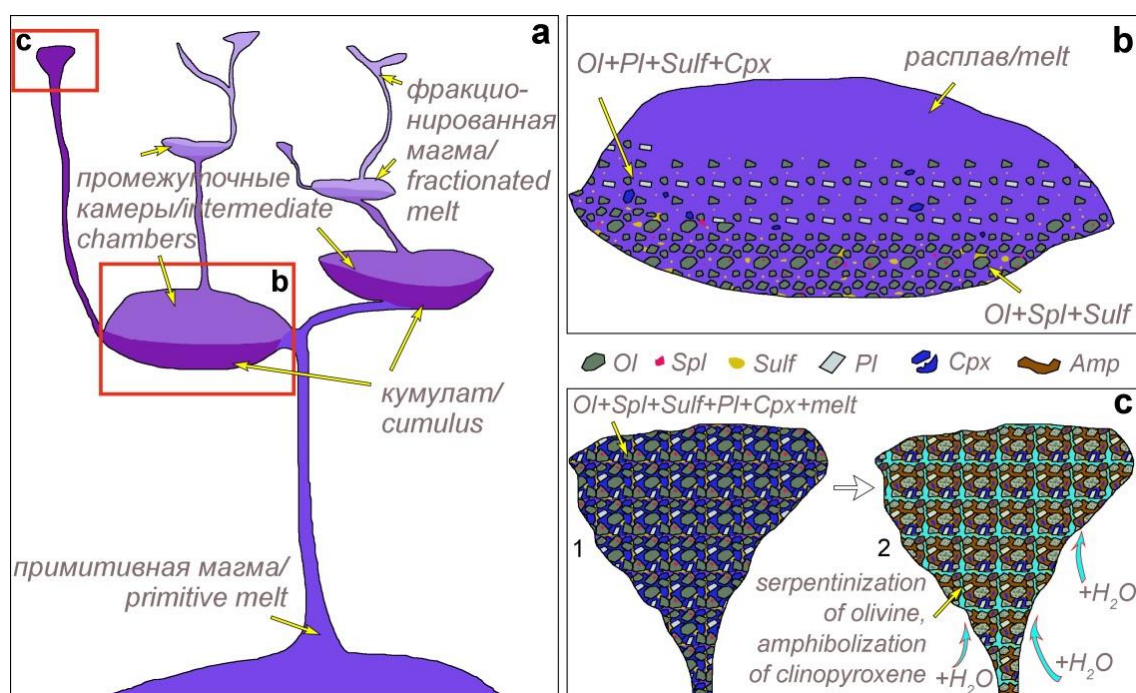


Рис. 6. Схематическая модель формирования худолазовского комплекса (а), ультрабазитового штока при внутрикамерной дифференциации магмы (б) и последующем преобразовании пород на поздне- и постмагматической стадии (с): Amp – амфибол, Cpx – клинопироксен, Ol – оливин, Pl – плагиоклаз, Sulf – сульфид.

[Fig. 6. Schematic model of Khudolaz complex formation (a), formation of ultrabasic stock due magma differentiation in chamber (b) and farther late- and postmagmatic alteration of rocks (c). Amp – amphibole, Cpx – clinopyroxene, Ol – olivine, Pl – plagioclase, Sulf – sulfide.]

Вода является важнейшим агентом магм худолазовского комплекса и её источник – это один из ключевых вопросов в петрологии комплекса. Часть воды могла иметь мантийное происхождение, связанное с плавлением субдуцированного слэба и ассимиляцией пород островодужной коры. Однако тот факт, что на Худолазовской площади встречаются массивы, сложенные не только богатыми амфиболом, но и практи-

чески безамфиболовыми породами, подразумевает возможное участие седиментационной или метеорной воды в процессе миграции расплава на определённых этапах в коре. Об этом может свидетельствовать резкая положительная аномалия цезия в ультрабазитах, в которых содержится 1–19 г/т Cs, т.е. в десятки раз выше кларкового значения не только для ультрамафит-мафитов, но и даже для кислых пород. В связи с этим

обогащение расплава цезием могло произойти за счёт взаимодействия с коровым флюидом [24]. Массовая амфиболитизация пород за счёт клинопироксена могла быть вызвана именно добавлением воды в верхнекоровых условиях (рис. 6с).

Согласно проиллюстрированной на рис. 6 модели ультрабазитовые штоки не являются самыми ранними по возрасту интрузиями, а скорее промежуточными – моложе недифференцированных интрузий, сложенных оливин-амфиболовыми габбро, но древнее пегматоидных габбро и диоритов.

Выводы

Худолазовский дифференцированный комплекс включает большое разнообразие интрузивных тел, как по морфологии, так и по вещественному составу. В западном крыле Худолазовской мульды обнаружен пояс из восьми мелких штоков ультрабазитов, сложенных богатыми амфиболом перидотитами и пикрогаббро, и несущими сульфидно-платинометалльное оруденение.

Происхождение этих ультрабазитовых штоков связано с миграцией частично раскристаллизованной водонасыщенной базальтовой магмы из кумулюсных частей промежуточных камер. В верхнекоровых условиях могло произойти добавление седиментационной или метеорной воды, приведшее к резкой положительной аномалии цезия и интенсивной амфиболитизации пород.

Изотопные Sr-Nd данные свидетельствуют о незначительном вкладе вещества верхней коры в источник расплава. Источник родоначальной магмы образовался при взаимодействии вещества шпинель-перидотитовой мантии и вещества нижней части островодужной коры.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Салихов Д. Н., Холоднов В. В., Пучков В. Н., Рахимов И. Р. Магнитогорская зона Южного Урала в позднем палеозое: магматизм, флюидный режим, металлогения, геодинамика. М.: Наука, 2019. 392 с.
2. Rakhimov I. R., Vishnevskiy A. V., Saveliev D. E. Geochemical evolution of PGE-sulfide mineralization of the Khudolaz differentiated complex in the South Urals: The role of R-factor and hydrothermal alteration // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 138. 104411.
3. Салихов Д. Н., Пшеничный Г. Н. Магматизм и оруденение зоны ранней консолидации Магнитогорской эвгеосинклинали. Уфа: БФАН СССР, 1984. 112 с.
4. 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(1–2). P. 48–57. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.06.010
5. 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. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0151>
6. Николаев Г. С., Арискин А. А., Бармина Г. С. Моделирование котекстик оливин – шпинелид и оливин – шпинелид – сульфид при кристаллизации ультрамафитовых магм. *Ультра-*

мафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал: материалы V Международной конференции. Улан-Удэ: Бурятский Госуниверситет. 2017. С. 196–198.

7. Рахимов И. Р. Петрология и геохимия массива Ташлы-Тай, худолазовский дифференцированный комплекс, Южный Урал // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2020. № 2. С. 44–57. DOI: 10.17308/geology.2020.2/2858
8. Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance // *Journal of geophysical research*. 2007. Vol. 112. P. 1–21. DOI: 10.1029/2005JB004224
9. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А. и др. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стеклах // *Геохимия*. 2010. № 12. С. 1266–1288.
10. 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.
11. Condie K.C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003. Vol. 4(1). 1005. DOI: 10.1029/2002GC000333.
12. Putirka K., Busby C.J. The tectonic significance of high-K₂O volcanism in the Sierra Nevada, California // *Geology*. 2007. Vol. 35. P. 923–926.
13. Shaw D.M. Trace element fractionation during anatexis // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1970. Vol. 34(2). P. 237–243.
14. Коваленко В. И., Наумов В. Б., Гирнис А. В., Дорофеева В. А., Ярмолюк В. В. Средние составы магм и мантии срединно-океанических хребтов и внутриплитных океанических и континентальных обстановок по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол базальтов // *Петрология*. 2007. Т. 15. № 4. С. 361–396.
15. Коваленко В. И., Наумов В. Б., Гирнис А. В., Ярмолюк В. В. Средний состав базитовых магм и мантийных источников островных дуг и активных континентальных окраин по данным изучения расплавных включений и закалочных стекол пород // *Петрология*. 2010. Т. 18. № 1. С. 3–28.
16. Greenough J. D., Dostal J., Mallory-Greenough L. M. Igneous Rock Associations 5. Oceanic Island Volcanism II: Mantle Processes // *Geoscience Canada*. 2005. Vol. 32(2). P. 77–90.
17. Hofmann A. W. Mantle Reservoirs. Abstracts Presented to the Topical Conference Origin of the Earth. Berkeley, California, 1988. P. 33–34.
18. Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
19. Зорин Ю. А., Турутанов Е. Х., Кожевников В. М., Рассказов С.В., Иванов А. В. О природе кайнозойских верхнемантийных плюмов в Восточной Сибири (Россия) и Центральной Монголии // *Геология и геофизика*. 2006. Т. 47. № 10. С. 1060–1074.
20. Иванов А. В. Внутриконтинентальный базальтовый магматизм (на примере мезозоя и кайнозоя Сибири): автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. 31 с.
21. Плечов П. Ю. Множественность источников островодужных магм и динамика их взаимодействия: дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2008. 328 с.
22. Рахимов И. Р., Вишневецкий А. В. Роговая обманка в ультрамафит-мафитах худолазовского комплекса Южного Урала: условия кристаллизации и петрологические следствия // *Лумосфера*. 2023 Т. 23. № 5. С. 766–784. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-5-766-784
23. Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2010. Vol. 160. P. 45–66.
24. Арсанова Г.И. Происхождение термальных вод вулканических областей // *Вулканология и сейсмология*. 2014. № 6. С.44–58.

Ultrabasic stocks of the Khudolaz differentiated complex (Southern Urals) as evidence of magma differentiation in intermediate chambers

©2023 I. R. Rakhimov✉

Institute of Geology, 16/2 Karl Marx st., 450077, Ufa, Russian Federation

Abstract

Introduction: The Khudolaz differentiated complex of the Southern Urals is characterized by a complex geological structure and a wide variety of intrusions in terms of morphology, petrography and mineralogy. It includes a belt of ultrabasic stocks containing sulfide-platinum-metal mineralization. The issues of origin of the complex are debatable, therefore, the mineralogical and geochemical study of ultrabasic rocks makes it possible to better understand the problem of the Khudolaz complex genesis.

Methodology: The chemical composition of the rocks was determined using an X-Calibur X-ray fluorescence spectrometer and an Agilent 7500cx mass spectrometer. The study of the Sm-Nd isotope system was carried out on a seven-channel Finnigan-MAT 262 (RPQ) mass spectrometer, the Rb-Sr isotope system was studied using an MI-1201-T mass spectrometer.

Results and discussion: The main rock type is schriesheimite having a cumulative structure characterized by the presence of olivine phenocrysts with a variable amount of plagioclase and intercumulus amphibole. It is shown that variations in the chemical composition of rocks are associated with trends in the fractionation of the three main minerals of rocks - olivine, amphibole and plagioclase. In general, the geochemical features of the rocks are close to the average composition of island arc basalts. A model for the formation of schriesheimite stocks is proposed, which includes the differentiation of the initial melt in intermediate chambers followed by the migration of partially crystallized magma from the cumulus part of the chamber. At the place of intrusion clinopyroxene was replaced by amphibole due to interaction with a water-saturated melt/fluid. An additional source of water could be the crust, as indicated by a sharp positive anomaly of cesium in the rocks. *Conclusion:* The Sr-Nd isotope data indicates an insignificant contribution of the upper crust material to the source of the melt. The source of parental magma was a component obtained by the interaction of the spinel-peridotite mantle and the lower part of the island-arc crust.

Keywords: Khudolaz complex, schriesheimite, fractionation, geochemistry, Sr-Nd isotope, magma source.

Funding: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-77-10049. Part of analytical studies was carried out within the State Assignment of IG UFRC RAS (No. (FMRS-2022-0012).

For citation: Rakhimov I. R. Ultrabasic stocks of the Khudolaz differentiated complex (Southern Urals) as evidence of magma differentiation in intermediate chambers // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 63–74. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/63-74>

Conflict of interests: The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ildar R. Rakhimov, e-mail: rigel92@mail.ru

REFERENCES

- Salikhov D. N., Kholodnov V. V., Puchkov V. N., Rakhimov I. R. *Magnitogorskaya zona Yuzhnogo Urala v pozdnem paleozoe: magmatizm, flyuidnyi režim, metallogeniya, geodinamika* [Magnitogorsk Zone of the Southern Urals in the Late Paleozoic: magmatism, fluid regime, metallogeny, geodynamics]. Moscow, Nauka publ., 2019. 392 p. (In Russ.)
- Rakhimov I. R., Vishnevskiy A. V., Saveliev D. E. Geochemical evolution of PGE-sulfide mineralization of the Khudolaz differentiated complex in the South Urals: The role of R-factor and hydrothermal alteration. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 138, 104411.
- Salikhov D. N., Pshenichnyi G. N. *Magmatizm i orudnenie zony ranney konsolidatsii Magnitogorskoy evgeosinklinali* [Magmatism and mineralization of the Magnitogorsk eugeosynclinal earlier consolidation zone]. Ufa: BB AS USSR publ., 1984. 112 p. (In Russ.)
- 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(1–2), pp. 48–57. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.06.010
- 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, pp. 45–59. DOI: 10.2343/geochemj.1.0151
- Nikolaev G. S., Bychkov K. A., Ariskin A. A. Modelirovanie tektoniki olivine–shpinelid i olivine–shpinelid–sul’fid pri kristallizatsii ul’tramafitovykh magm [Modelling Ol–Sp and Ol–Sp-sulfide Cotectics at Crystallization of Ultramafic Magmas]. *Ul’tramafit–mafityvye komplekсы: geologiya, stroenie, rudnyy potencial: materialy konferencii*. [Ultramafic-mafic complexes: geology, structure, ore potential: materials of the meeting]. Ulan-Ude, Buryat State University publ., pp. 196–198. (In Russ.)
- Rakhimov I. R. Petrology and geochemistry of Tashly-Tau massif, Khudolaz layered complex, South Urals. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2020, no. 2, pp. 44–57. DOI: 10.17308/geology.2020.2/2858. (In Russ.)
- Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth’s primitive mantle and its variance. *Journal of geophysical research*, 2007, vol. 112, pp. 1–21. DOI: doi.org/10.1029/2005JB004224
- Naumov V. B., Dorofeeva V. A., Tolstykh M. L., Girmis A. V., Yarmolyuk V. V. Composition and Geochemical Specifics of Magmatic Melts in Kamchatka: Evidence from Melt Inclusions and Quenched Glasses of Rocks. *Geochem. Int.*, 2020, vol. 58, pp. 271–290. DOI: 10.1134/S001670292003009X (In Russ.)
- Rakhimov I. R. Magma sources and the Malutka massive formation model (Khudolaz complex, Southern Urals): geological and geochemical features and Rb–Sr – Sm–Nd isotope system. *Geologicheskii Vestnik*, 2020, vol. 3, pp. 112–122. (In Russ.)
- Condie, K. C., Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2003, vol. 4(1), 1005. DOI: 10.1029/2002GC000333.
- Putirka K., Busby C. J. The tectonic significance of highK₂O volcanism in the Sierra Nevada, California. *Geology*, 2007, vol. 35, pp. 923–926.
- Shaw D. M. Trace element fractionation during anatexis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1970, vol. 34(2), pp. 237–243.
- Kovalenko, V. I., Naumov, V. B., Girmis, A. V., Dorofeeva V. A., Yarmolyuk V. V. Average compositions of magmas and mantle sources of mid-ocean ridges and intraplate oceanic and continental settings estimated from the data on melt inclusions and quenched glasses of basalts. *Petrology*, 2007, vol. 15, pp. 335–368. DOI: 10.1134/S0869591107040029 (In Russ.)
- Kovalenko, V. I., Naumov, V. B., Girmis, A. V., Dorofeeva V. A., Yarmolyuk V. V. Average composition of basic magmas and mantle sources of island arcs and active continental margins estimated from the data on melt inclusions and quenched glasses of rocks. *Petrology*, 2010, vol. 18, pp. 1–26. DOI: 10.1134/S0869591110010017 (In Russ.)
- Greenough J. D., Dostal J., Mallory-Greenough L. M. Igneous Rock Associations 5. Oceanic Island Volcanism II: Mantle Processes. *Geoscience Canada*, 2005, vol. 32(2), p. 77–90.
- Hofmann, A. W. Mantle Reservoirs. Abstracts Presented to the Topical Conference Origin of the Earth. Berkeley, California, 1988, pp.33–34.
- Puchkov V. N. *Geologiya Urala i Priural’ya (aktual’nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and Cis-Urals (topical issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa, Dizain Poligraf Servis publ., 2010. 280 p. (In Russ.)
- Zorin Ju. A., Turutanov E. H., Kozhevnikov V. M., Ras-skazov S. V., Ivanov A. V. O pppipode kajnozojckix vepxnemantijnyx pljumov v Voctochnoj Cibipi (Poccija) i Centpal’noj Mongolii [On the nature of Cenozoic upper-mantle plumes in Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia]. *Geologiya i geofizika – Geologiya i Geofizika*, 2006, vol. 47(10), pp. 1060–1074. (In Russ.)
- Ivanov A. V. *Vnutrikontinental’nyi bazal’tovyy magmatizm (na primere mezozoya i kaynozoya Sibiri): avtoref. dis. ... d-ra geol.-min. nauk* [Intracontinental basaltic magmatism (on the example of the Mesozoic and Cenozoic of Siberia). Abstract of PhD diss.]. Irkutsk, IEC SB RAS publ., 2011. 31 p. (In Russ.)
- Plechov P. Yu. *Mnozhestvennost’ istochnikov ostrovoduzhnykh mag mi dinamika ikh vzaimodeystviya: dis. ... d-ra geol.-min. nauk*. [Multiple sources of island-arc magmas and dynamics of their interaction. Abstract of Dr. diss.]. Moscow, MSU publ., 2008. 328 p. (In Russ.)
- Rakhimov I. R., Vishnevskiy A. V. Rogovaya obmanka v ul’tramafit-mafitakh khudolazovskogo kompleksa Yuzhnogo Urala: usloviya kristallizatsii i petrologicheskie sledstviya [Hornblende in ultramafic-mafic rocks of the Khudolaz complex in the South Urals: crystallization conditions and petrological implications]. *Litospere (Russia)*, 2023, vol. 23(5), pp. 766–784. DOI:10.24930/1681-9004-2023-23-5-766-784 (In Russ.)
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2010, vol. 160, pp. 45–66.
- Arsanova, G. I. The origin of thermal waters in volcanic areas. *J. Volcanolog. Seismol.*, 2014, vol. 8, pp. 361–374. DOI:10.1134/S0742046314060025

Рахимов Ильдар Рашитович, к.г.-м.н. с.н.с., Институт геологии – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, Российская Федерация; e-mail: rigel92@mail.ru; ORCID 0000-0002-2808-2402

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Ildar R. Rakhimov, PhD in Geology and Mineralogy, Senior Researcher: Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRS RAS), Ufa, Russian Federation; E-mail: rigel92@mail.ru, ORCID 0000-0002-2808-2402

Author have read and approved the final manuscript.