

## Петрология и геохимия массива Ташлы-Тау, худолазовский дифференцированный комплекс, Южный Урал

©2020 И.Р. Рахимов✉

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

### Аннотация

*Введение:* Массив Ташлы-Тау представляет собой небольшой шток оливин-роговообманковых габбро, отвечая наиболее ранним по времени проявления продуктам дифференцированного магматизма худолазовского комплекса. Комплекс имеет сложное геологическое строение, поэтому детальные петролого-геохимические исследования отдельных массивов с привлечением численного моделирования параметров кристаллизации позволяют выявить особенности формирования худолазовского комплекса в целом. Цель статьи – реконструкция петрогенезиса габброидов массива Ташлы-Тау, имеющая важное значение ещё и в связи с его сульфидным Cu-Ni оруденением.

*Методика:* Породообразующие минералы габброидов исследовались в оптическом микроскопе Axioskop 40 и на сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3. Химический состав пород определялся с помощью рентгенофлуоресцентного анализа и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Изотопный состав Sr и Nd изучался с помощью термоионизационной спектрометрии. Для разработки модели петрогенезиса использовалось численное COMAGMAT-моделирование и метод геохимической термометрии.

*Результаты и обсуждение:* Выполнено петролого-геохимическое изучение пород массива Ташлы-Тау. В них отмечается широкое развитие роговой обманки – титанистого магнезиогастингсита (~50 мас. %). Габброиды характеризуются относительной обогащённостью крупноионными литофильными элементами (Cs, Rb, Sr, Ba) и обеднённостью высокозарядными элементами (Nb, Ta, Zr, Hf, REE). На основе геохимических данных сделан вывод о том, что магматический расплав являлся слабодифференцированным. Численное моделирование показало, что породы формировались из магмы, состоящей из ~20 мас. % вкрапленников оливина (Fo<sub>76</sub>) и водонасыщенного базальтового расплава (~1.7 мас. % H<sub>2</sub>O), характеризующегося высокой глинозёмистостью, железистостью и умеренной магнезиальностью. Sr-Nd изотопный состав пород свидетельствует в пользу слабой коровой контаминации исходного расплава. Для них характерны высокие положительные значения εNd(T) (+5.2...+10.3) и пониженное содержание радиогенного стронция. В качестве источника материнского расплава мог служить мантийный резервуар типа PREMA.

*Заключение:* Полученные результаты важны для понимания природы формирования сложно дифференцированного худолазовского комплекса, специализированного на сульфидное оруденение. Для Урала этот комплекс является уникальным. Показано, что применение численного моделирования для водонасыщенных базальтовых систем может быть вполне эффективно до момента кристаллизации гидроксилсодержащих породообразующих минералов (роговой обманки).

**Ключевые слова:** массив Ташлы-Тау, расплав, численное моделирование, геохимия, Sr-Nd изотопная систематика, мантийный источник.

*Источник финансирования:* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-35-00391) в рамках Госзадания по теме № 0252-2017-0012 «Магматические системы в истории развития Южного Урала (геодинамические обстановки формирования и металлогеническая специализация



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Рахимов Ильдар Рашитович, e-mail: [rigel92@mail.ru](mailto:rigel92@mail.ru)

Для цитирования: Рахимов И. Р. Петрология и геохимия массива Ташлы-Тау, худолазовский дифференцированный комплекс, Южный Урал // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология.* 2020. №2. С. 44–57. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2858>

### **Введение**

Худолазовский дифференцированный комплекс является одним из интереснейших объектов Южного Урала в связи со сложностью его геологического строения, петрогенезиса и геодинамической интерпретации обстановки магмогенерации, а также наличие сульфидно-платинометалльного оруденения [1]. Ранее особенности петрогенезиса и оруденения комплекса наиболее детально изучались Д. Н. Салиховым [2, 3], U-Pb методом по циркону и бадделеиту определён возраст его формирования – 325–329 млн лет [4]. Однако не была предложена модель, удовлетворительно объясняющая петрографическое разнообразие и различия внутреннего строения отдельных массивов, не решены вопросы источника родоначального расплава и целый ряд более частных проблем.

Особенностью худолазовского комплекса, в отличие от других известных ультрабазит-базитовых сульфидоносных комплексов, является то, что он представлен не крупным расслоенным массивом, а множеством интрузивных тел, соответствующих отдельным «расслоенным горизонтам». В его строении было выделено три типа интрузивных тел: 1) мелкие штоки ультраосновных пород однородного строения, 2) относительно крупные хонолиты дифференцированного состава неоднородного строения, 3) небольшие хонолиты переходного состава от основных пород к средним относительно однородного строения. Штоки расположены в западной части мульды. Они представляют собой первую фазу внедрения наименее дифференцированного расплава [1], что даёт возможность наиболее обоснованно охарактеризовать природу и геохимические особенности родоначальной магмы. Среди штоков худолазовского комплекса одним из наиболее изученных является массив Ташлы-Тау [5]. Как и в других интрузиях, его породы метасоматизированы, что выражается, прежде всего, в хлоритизации, серпентинизации и пелитизации при воздействии гидротермального флюида. Однако в настоящей статье этот этап рассматривается мало, а делается попытка реконструировать именно магматический этап формирования интрузии.

Настоящая статья сфокусирована на петролого-геохимической характеристике пород массива Ташлы-Тау и численном моделировании параметров кристаллизации расплава для оценки его геохимических особенностей и температуры ликвидуса. Её цель – реконструкция петрогенезиса магматических пород массива, которая важна также в связи с открытием в нём ликвационно-магматических сульфидных Ni-Cu руд [6].

### *Краткая геологическая и петрографическая характеристика*

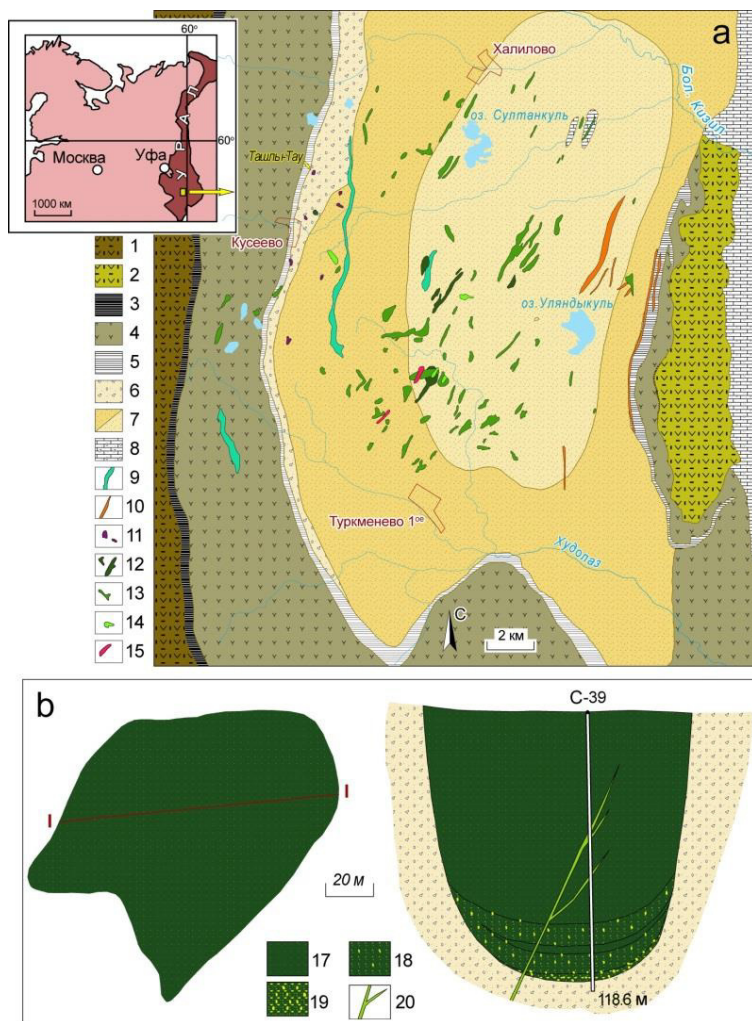
Массив Ташлы-Тау расположен в западном борту Худолазовской мульды (рис. 1а). Его размеры в плане составляют 100×150 м. Через него пробурена единственная скважина, в результате чего магмоподводящий канал не был выявлен. Глубина залегания подошвы не менее 112.5 м. По имеющимся геологическим данным предполагается корытообразная форма массива в поперечном сечении. Контакты имеют падение под углом 70–80°. Предполагается, что он продолжается на глубину в юго-восточном направлении. Вмещающими породами являются туфопесчаники биягодинской свиты (D<sub>3f</sub>). В экзоконтактовой зоне вмещающие породы ороговикованы. Линзовидные сульфидные рудные тела были вскрыты рядом с подошвой интрузии (рис. 1б).

### **Методы исследований**

Изучение прозрачно-полированных шлифов выполнялось на поляризационном микроскопе Axioskop 40 A, а также сканирующем электронном микроскопе Tescan Mira 3. Составы минералов определялись при помощи ЭДС приставки (Oxford Instruments) с использованием программного комплекса INCA Energy. Измерения производились при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе 15 нА, времени накопления спектра 40 с. Предел обнаружения большинства элементов около 0.1–0.3 мас. %.

Химический состав пород определялся с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) (для петрогенных элементов) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП МС) (микроэлементы). РФА проводился на спектрометре Carl Zeiss VRA-30 (ИГ УФИЦ РАН, 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 ИСП МС выполнялся при помощи масс-спектрометра Perkin Elmer ELAN 9000 (ЦКП «Геоаналитик», ИГГ УрО РАН, 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 неодима и концентраций Sm и Nd проводились на 7-канальном твердофазном масс-спектрометре Finnigan-MAT 262 (RPQ) (ЦКП ГИ КНЦ РАН, Апатиты) в статическом двухлучевом режиме с использованием ренийевых и танталовых лент. Ошибка в <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd отношениях составляет 0.3 % (2σ) – среднее значение из 7 измерений в стандарте BCR. Погрешность измерения изотопного состава Nd в индивидуальном анализе не превышала 0.005 %. Изотопный состав Sr и определение содержаний Rb и Sr проводили на масс-спектрометре МИ-1201-Т



**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта Худолозовской мульды (а) и план обнажения массива Ташлы-Тау с геологическим разрезом через линию I–I (б) по [5]: 1–8 – стратифицированные вулканогенно-осадочные отложения: 1 – ирендыкской свиты ( $D_{2ef1}$ ), 2 – карамалыташской свиты ( $D_{2ef2}$ ), 3 – ярлыккаповской 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 (плагииграниты), 11–14 – худолозовского (11 – перидотиты и габброперидотиты, 12 – оливинные габбро, 13 – безоливинные габбро, 14 – диориты), 15 – япрактского (плагииграниты); 17–20 – породы массива Ташлы-Тау: 17 – габбро с редкой сульфидной вкрапленностью, 18 – убогие Ni-руды ( $Ni < 0.3$  мас. %), 19 – рядовые Ni-руды ( $Ni 0.3-1$  мас. %), 20 – дайки долеритов.

**[Fig. 1.** Schematic geological map of Khudolaz trough (a) and outcrop plan of Tashly-Tau massif with geological section across line I–I (b) after [5]: 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), 11–14 – Khudolaz (11 – peridotites and gabbroperidotites, 12 – olivine gabbro, 13 – oliviness gabbro, 14 – diorites), 15 – Yaprakty (plagiogranites); 17–20 – rocks of Tashly-Tau massif: 17 – rare sulfide impregnation gabbro, 18 – poor Ni-ores ( $Ni < 0.3$  wt. %), 19 – ordinary Ni-ores ( $Ni 0.3-1$  wt. %), 20 – dolerite dykes.]

(ЦКП ГИ КНЦ РАН, Апатиты) в одноленточном режиме на танталовых лентах. Погрешности изотопного состава (95 %-й доверительный интервал)  $^{87}Sr/^{86}Sr$  не превышают  $\pm 0.04$  %, определения  $^{87}Rb/^{86}Sr$  отношений  $\pm 1.0$  %. При расчёте величин  $\epsilon Nd(T)$  и  $\epsilon Sr(T)$  использованы современные значения CHUR по [7] ( $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512630$ ,  $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1960$ ), UR по [8] ( $^{87}Rb/^{86}Sr = 0.08199$ ,  $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.704250$ ).

Численное моделирование параметров кристаллизации исходного расплава проводилось в программе COMAGMAT 3.73 (полибарическая «водная» версия) [9]. Для оценки состава и температуры исходного расплава был применён метод геохимической термометрии [10].

### Результаты исследований

Массив Ташлы-Тау сложен, большей частью, оливин-роговообманковыми габбро с пойкилоофитовой структурой (рис. 2). Текстура пород массивная, но иногда встречаются признаки такситовой (шпировой) текстуры, когда наблюдается тенденция к формированию зёрнами оливина обособленных скоплений-сростков, хотя из-за метасоматических преобразований их часто не удаётся обнаружить.

Роговая обманка является самым распространённым минералом пород (около 45 об. %). Она образует ксеноморфные зёрна – ойкокристаллы размером до 3–5 мм. По составу отвечает титанистому магнезиогастингситу ( $TiO_2$  до 3 мас. %,  $(Mg/Fe^{2+})=0.86-0.98$ ).

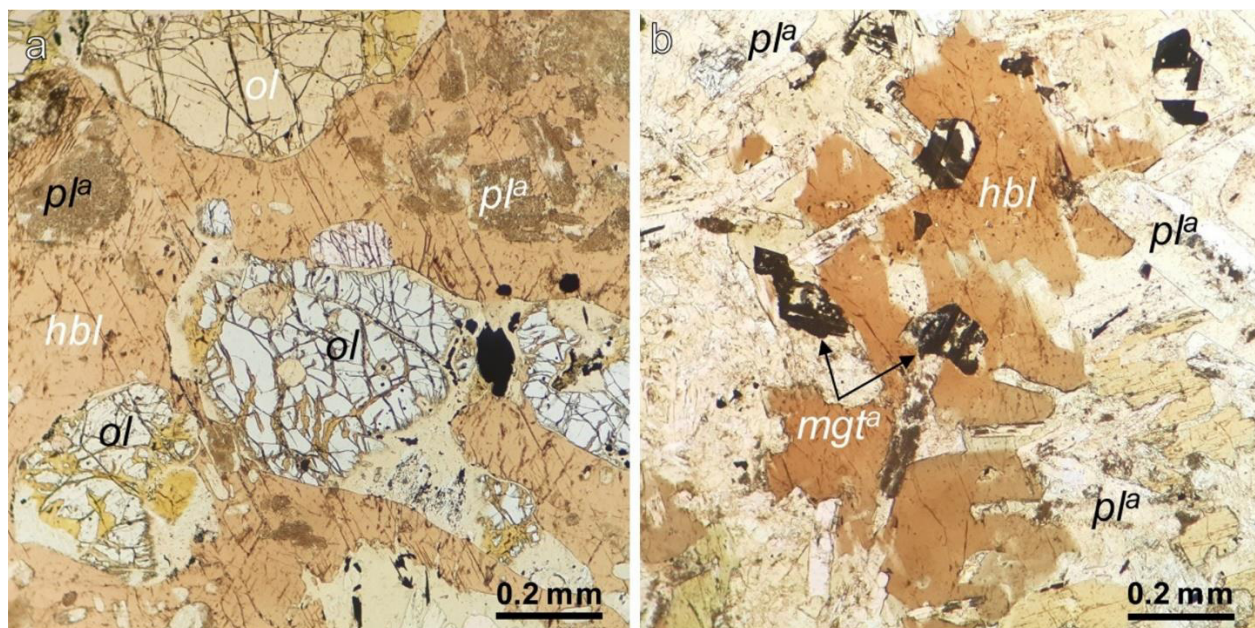
Плагноклаз (~ 35%) образует таблитчатые кристаллы длиной 0.5–1.5 мм и по составу соответствует лабрадору  $An_{61.3-65.6}Ab_{34.1-38.4}Or_{0.3-0.5}$ .

Оливин ( $Fo_{78-73}$ ) присутствует в количестве около 20% объёма пород. Он представлен часто округлыми или слабо вытянутыми призматическими зёрнами размером до 2 мм.

Второстепенные минералы – клинопироксен (~ 5 об. %), флогопит (~ 5%). Среди рудных минералов распространены сульфиды (от 0.1–0.5 до 5–7%), представленные сростками пирротина, халькопирита и пентландита, также в небольшом количестве встречаются шпинелиды.

### Геохимия

Относительная петрографическая однородность массива Ташлы-Тау не согласуется с выявленными вариациями химического состава пород. С одной стороны, это можно объяснить такситовой текстурой пород



**Рис. 2.** Микрофотографии пород массива Ташлы-Тау (проходящий свет): а) участок габбро, богатый оливином; б) участок габбро, богатый плагиоклазом. Примечание: *hbl* – роговая обманка, *mgt<sup>a</sup>* – изменённый магнетит, *ol* – оливин, *pl<sup>a</sup>* – изменённый плагиоклаз.

[**Fig. 2.** Photomicrographs of Tashly-Tau massif rocks (transmitted light): a) olivine-rich gabbro fragment; b) plagioclase-rich gabbro fragment. Note: *hbl* – hornblende, *mgt<sup>a</sup>* – altered magnetite, *ol* – olivine, *pl<sup>a</sup>* – altered plagioclase.]

в результате чего пробы могли быть отобраны из более лейкократовых или меланократовых участков. С другой стороны, это, вероятно, связано с неравномерными метасоматическими преобразованиями пород. Содержания MgO и FeO<sub>t</sub> варьируют в пределах 9.9–20.2 и 11.2–18.2 мас. % соответственно, SiO<sub>2</sub> = 40.5–48.8 мас. % (табл. 1). Для габброидов характерны довольно умеренные вариации *Mg#* ( $100 \times \text{MgO} / (\text{MgO} + \text{FeO}_t + \text{Mn})$ ) = 42–57. Они низкоглинозёмистые с широкими вариациями значений коэффициента глинозёмистости *al'* ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 +$

MgO)) – 0.28–0.61, в среднем составляет 0.44. По содержанию TiO<sub>2</sub> (0.4–0.7 мас. %) габброиды классифицируются как низкотитанистые. При этом они имеют стабильно повышенные содержания P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (~ 0.33 мас. %). Они отвечают ряду нормальнощелочных ультрабазит-базитов с калий-натровым типом щёлочности (Na/K ~ 3.9). Содержание SiO<sub>2</sub> в них составляет 40.5–45.8 мас. %. По соотношению FeO<sub>t</sub>/MgO и SiO<sub>2</sub> габброиды характеризуются промежуточным положением между известково-щелочной и толетитовой сериями, что типично для всего худолазовского комплекса [1].

**Табл. 1.** Химический состав пород массива Ташлы-Тау (петрогенные оксиды в мас. %, редкие элементы – в г/т)  
[**Table 1.** Chemical composition of Tashly-Tau massif rocks (oxides in wt. %, trace elements in ppm)]

Элемент [Element]	№ пробы [Sample number]									
	3750s	3750t	3759	3775	3777	3780	3783	K <sub>18-94</sub>	K <sub>18-95</sub>	K <sub>18-114</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO <sub>2</sub>	48.75	40.95	42.09	42.12	40.48	45.47	41.88	41.47	43.42	45.75
TiO <sub>2</sub>	0.51	0.42	0.43	0.59	0.48	0.72	0.57	0.40	0.54	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.50	12.43	14.50	10.51	11.58	13.91	12.19	9.59	14.51	14.50
FeO <sub>t</sub>	4.67	15.24	13.60	17.39	18.24	13.02	14.55	13.90	11.25	14.60
MnO	0.12	0.23	0.18	0.29	0.24	0.20	0.19	0.19	0.16	0.29
MgO	11.58	15.29	13.43	15.30	13.54	9.92	16.71	20.16	15.36	12.15
CaO	14.03	7.68	8.21	6.76	6.98	8.40	8.11	6.75	6.77	4.71
Na <sub>2</sub> O	0.50	1.35	2.25	1.02	1.40	2.79	0.50	1.05	1.60	1.35
K <sub>2</sub> O	0.07	0.17	0.19	0.09	0.15	0.37	0.30	0.48	1.73	0.74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.35	0.28	0.39	0.25	0.38	0.23	0.45	0.30	0.30	0.38
S	0.02	0.74	0.44	0.47	1.22	0.27	0.13	0.05	0.01	0.01
ППП	3.33	4.83	3.48	4.60	4.84	3.69	3.83	5.39	4.42	5.07
Сумма [Total]	99.51	99.68	99.23	99.37	99.64	99.00	99.48	99.79	100.11	100.22
Li	13	16	18	25		11	16	20		22
Be	0.21	0.22	0.5	0.28		0.31	0.5	0.2		0.44

Продолжение Табл. 1  
[Continued Table 1]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Sc	31	8	13	15	25	16	20	8	23	19
V	100	60	80	90	71	90	120	40	82	80
Cr	340	250	280	490	642	250	470	290	228	270
Co	19	66	73	80	108	42	70	57	69	52
Ni	110	500	300	600	924	250	400	280	209	1700
Cu	18.4	600	250	460	2989	210	290	100	154	500
Zn	21	88	50	60	133	50	90	30	78	50
Ga	9	8	16	8		9	15	8		12
Ge	0.9	0.7	1	1		0.8	1	0.9		1.5
As	1.03	0.97	4.1	2.7		6.6	2.4	0.3		24.5
Se	0.43	0.99	0.51	1.08		0.61	0.44	0.2		0.34
Rb	2	7	5	3	19	8	9	15	40	19
Sr	700	300	400	130	190	300	300	400	362	270
Y	10	6	9	13		12	11	5		13
Zr	41	29.5	48	73	67	59	50	29	81	61
Nb	1.4	1.6	1.9	2.4		2	1.8	1.6		3
Mo	0.22	1	0.22	0.6		0.4	0.32	0.22		0.21
Ag	0.036	0.29	0.103	5.2		0.129	0.124	0.135		0.106
Cd	0.04	0.4	0.07	0.18		0.12	0.13	0.05		0.16
Sn	0.51	10	0.42	0.6		0.7	0.47	0.32		0.6
Sb	0.25	0.18	0.05	0.1		0.08	0.06	0.04		0.3
Te	0.023	0.029	0.018	0.064		0.063	0.033	0.013		0.06
Cs	0.8	2.6	0.6	0.5		0.6	0.41	12		0.8
Ba	22	26	50	23	28	60	40	40	185	100
La	4	3.1	4	6		5	4	2.7		5
Ce	9	7	9	13		12	9	6		13
Pr	1.3	1	1.2	1.8		1.7	1.2	0.8		1.7
Nd	6	4.4	5	8		7	5	3.5		8
Sm	1.5	1	1.2	1.9		1.8	1.4	0.8		2
Eu	0.6	0.41	0.46	0.6		0.6	0.5	0.35		0.7
Gd	1.8	1.1	1.4	2.1		2.1	1.7	0.94		2.5
Tb	0.27	0.17	0.21	0.3		0.3	0.26	0.14		0.4
Dy	1.7	1.1	1.3	2		2	1.7	0.9		2.4
Ho	0.35	0.22	0.27	0.4		0.4	0.36	0.18		0.5
Er	1	0.7	0.8	1.2		1.2	1	0.5		1.5
Tm	0.13	0.09	0.12	0.16		0.16	0.15	0.08		0.21
Yb	0.8	0.6	0.7	1.1		1	1	0.5		1.3
Lu	0.12	0.09	0.12	0.16		0.16	0.15	0.08		0.21
Hf	1	0.7	1.1	1.2		1.1	1.1	0.61		1.4
Ta	0.1	0.09	<	0.12		0.12	<	0.12		0.21
W	0.23	0.4	<	0.24		0.15	<	0.04		0.21
Tl	0.007	0.05	0.019	0.013		0.025	0.026	0.07		0.07
Pb	2	13	2.3	1.4	10	4	4	1.7	19	7
Bi	0.015	0.037	0.035	0.086		0.069	0.081	0.031		0.093
Th	0.4	0.3	0.9	0.7		0.8	0.8	0.4		1.4
U	0.14	0.1	0.3	0.21		0.24	0.22	0.12		0.47

Примечание: 3777 и K<sub>18-95</sub> – данные микроэлементов по РФА, остальные – ИСПМС; 3750s – кальцит-полевошпат-хлоритовая метасоматическая жила, остальные – различно изменённые габброиды; < – ниже предела обнаружения.

[Note: 3777 and K<sub>18-95</sub> – XPF data, others – ICP MS; 3750s – calcite-feldspar-chlorite metasomatic vein, others – altered gabbroids; < – below limit of detection.]

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<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и Na<sub>2</sub>O наблюдается довольно отчётливая отрицательная корреляция с MgO. Содержания этих компонентов (кроме TiO<sub>2</sub>) контролируются полевыми шпатами, соответ-

ственно более лейкократовые разновидности обогащены этими элементами и обеднены магнием. Отчасти содержания глинозёма и оксида натрия, а также оксид титана, контролируются роговой обманкой. Между содержаниями FeO<sub>t</sub> и MgO отсутствует корреляция, что также может быть связано с метасоматизацией.

Микроэлементный состав габброидов массива Ташлы-Тау характеризуется относительно высокими

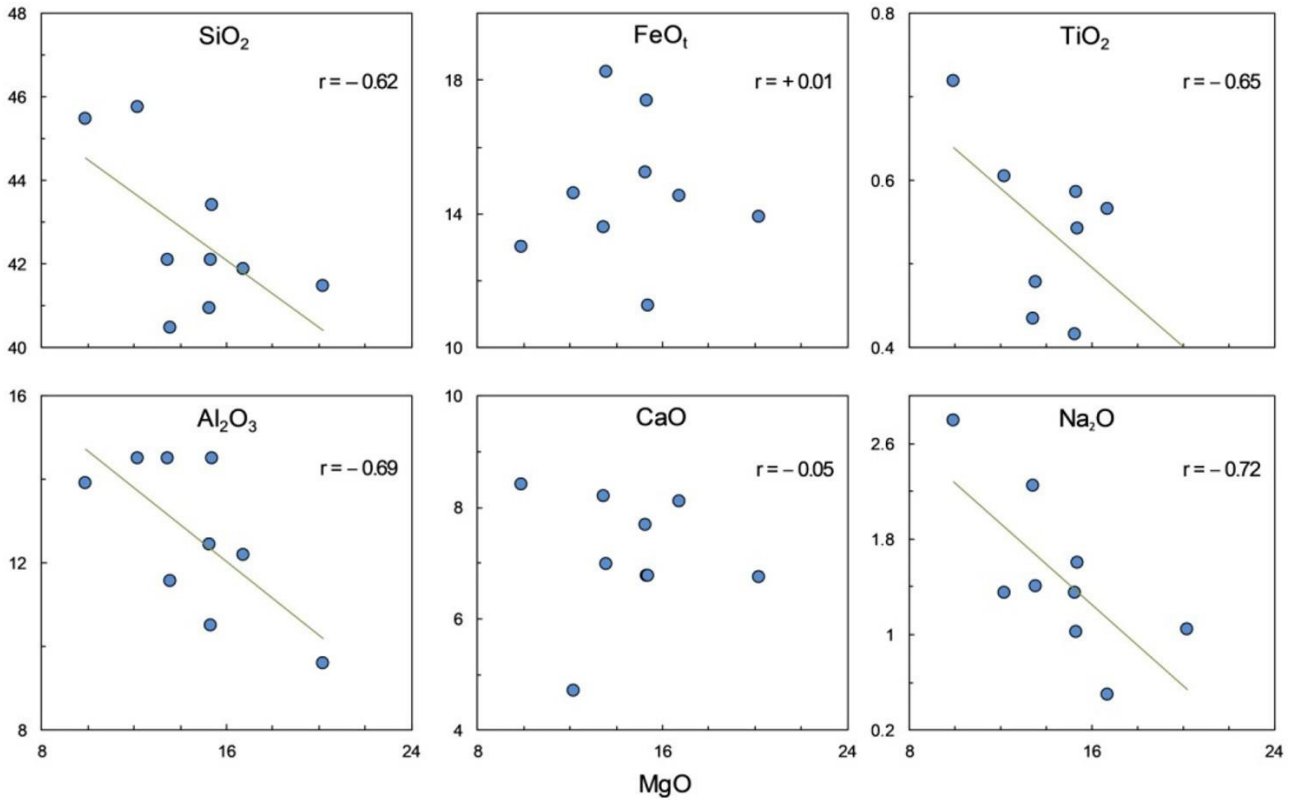


Рис. 3. Бинарные диаграммы в координатах “MgO–оксид” для пород массива Ташлы-Тау. Примечание:  $r$  – коэффициент корреляции Пирсона.

[Fig. 3. Binary plots in “MgO–oxide” series for Tashly-Tau massif rocks. Note:  $r$  – Pearson correlation coefficient.]

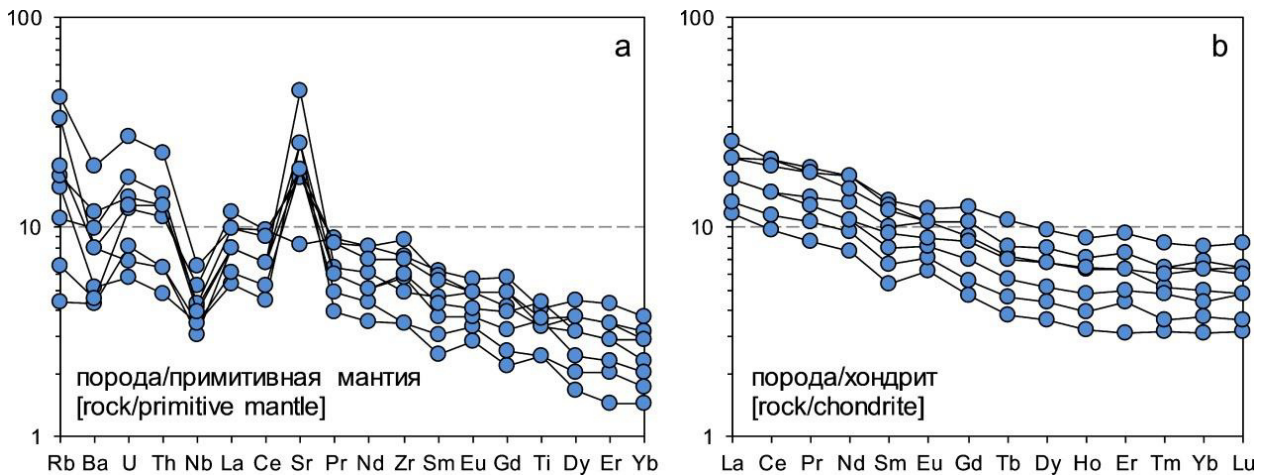


Рис. 4. Мультиэлементные спайдер-диаграммы для пород массива Ташлы-Тау по данным табл. 1:  $a$  – нормировано на состав примитивной мантии [11],  $b$  – нормировано на состав хондрита [12].

[Fig. 4. Multi-element diagrams for Tashly-Tau massif rocks from Table 1 data:  $a$  – normalized in primitive mantle composition,  $b$  – normalized in chondrite composition [12].]

концентрациями крупноионных литофильных элементов (Cs, Rb, Sr, U, Th) и относительно пониженными содержаниями таких высокозарядных элементов, как Nb, Ta, Zr, Hf, Sc, Y, REE. Первой группе присущи значительные количественные вариации, обусловленные, по-видимому, метасоматическими процессами. На спайдер-диаграмме наблюдается резкая положительная аномалия Sr и достаточно чёткий минимум Nb (рис. 4а). Поведение стронция достаточно ясно коррелирует с глинозёмистостью пород (коэф. корр. = 0.54).

Спектры распределения редкоземельных элементов в целом единообразны (рис. 4б), отмечается их незначительное фракционирование ( $La_n/Yb_n \sim 3.4$ ). Характерно либо отсутствие, либо слабое положительное значение Eu-аномалии ( $Eu_n/Eu_n^* = 1.23$ ).

Вариации концентраций рудных элементов (Cu, Ni, Co) и TABS-элементов (Te, As, Bi, Sb, Se) в породах обусловлены главным образом распределением в

них сульфидных минералов. Так наибольшие концентрации указанных элементов приурочены к рудным телам (пробы 3775 и 3777, табл. 1), залегающим в донной части массива. Ранее также было установлено значительное влияние гидротермально-метасоматических процессов на перераспределение этих элементов в массиве [13].

#### *Sm-Nd и Rb-Sr изотопная систематика*

Sm-Nd и Rb-Sr изотопные исследования проводились в 3 порошковых пробах массива Ташлы-Тау, а также в 1 пробе из неизменённых вмещающих песчаников бугодакской свиты. Для расчёта начальных изотопных отношений были приняты значения абсолютного возраста массива по датировке соседних интрузий худолазовского комплекса – 325 млн лет [4]. Возраст отложения туфопесчаников бугодакской свиты, сформировавшихся за счёт разрушения изверженного материала франских вулканических построек [14] и являю-

щихся вмещающими породами массива Ташлы-Тау, был принят как 380 млн лет.

Первичный изотопный состав неодима характеризуется высоким значением  $\epsilon\text{Nd}(325)$  (+5.2...+10.3) (табл. 2). Высокорадиогенный состав Nd свидетельствует о ювенильной природе деплетированных мантийных расплавов, материнских для массива Ташлы-Тау. Изотопный состав Nd вмещающих песчаников отличается более низким значением  $\epsilon\text{Nd}(380)$  (+2.06), вероятно отражая специфику изотопного состава пород источника сноса – бугодакских базальтоидов.

Величины первичных отношений изотопов стронция  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(T)$  в 3 пробах весьма однородны (табл. 3) и характеризуются около нулевыми или слаболожительными значениями  $\epsilon\text{Sr}_{\text{UR}}(325)$  (0...+3.72), отражая близость к составу модельного резервуара UR (uniform reservoir). Напротив, вмещающие песчаники обогащены радиогенным стронцием,  $\epsilon\text{Sr}_{\text{UR}}(380) = +30.92$ , что вполне характерно для терригенных осадочных пород.

**Табл. 2.** Sm-Nd изотопные данные для габброидов (1–3) массива Ташлы-Тау и вмещающих песчаников (4)  
[Table 2. Sm-Nd isotopic data for Tashly-Tau massif gabbroids (1–3) and host sandstones (4)]

№	№ пробы [Sample number]	Sm, г/г	Nd, г/г	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon\text{Nd}(T)$
1	3775	2.10	8.53	0.14800	0.512846	0.000021	+6.20
2	3780	2.82	11.50	0.14810	0.513055	0.000015	+10.28
3	3780 <sup>A</sup>	2.17	8.70	0.15012	0.512800	0.000020	+5.25
4	K <sub>18</sub> -97	3.69	16.67	0.13390	0.512581	0.000009	+2.06

**Табл. 3.** Rb-Sr изотопные данные для габброидов массива Ташлы-Тау и вмещающих песчаников  
[Table 3. Rb-Sr isotopic data for Tashly-Tau massif gabbroids and host sandstones]

№	№ пробы [Sample number]	Rb, г/г	Sr, г/г	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(T)$	$\epsilon\text{Sr}(T)$
1	3775	3.41	139.4	0.06904	0.70421	0.000210	0.70390	+0.28
2	3780	10.01	339.7	0.08362	0.70452	0.000250	0.70410	+3.72
3	3780 <sup>A</sup>	11.35	400.4	0.08199	0.70425	0.000005	0.70387	0
4	K <sub>18</sub> -97	13.71	356.59	0.10850	0.70660	0.00015	0.70598	+30.92

#### *Численное моделирование*

Применение компьютерных программ для моделирования параметров кристаллизации магматического расплава, сформировавшего породы массива Ташлы-Тау, осложнено их интенсивной метасоматической переработкой. К тому же расплав, очевидно, был водонасыщенным, что подтверждается широким развитием роговой обманки. В существующих петрологических приложениях-симуляторах (например, MELTS, COMAGMAT, PETROLOG и др.) набор кристаллизующихся минеральных фаз не включает гидроксилсодержащие минералы. Исходя из этого, а также из представления о позднемагматическом происхождении роговой обманки (~50 мас. %), на что указывают структуры пород, степень кристаллизации расплава для каждой сессии ограничивалась 50%. Также в основу было заложено представление о закрытости моделируемой

системы, о чём свидетельствует внутреннее строение массива и закономерности химического состава породообразующих минералов. Параметры моделирования включали: равновесная кристаллизация, кислородный буфер QFM, давление 2 кбар, содержание воды 1.5 мас. %. Оценка давления основывалась на геологических представлениях и степени литификации вмещающих песчаников. Содержание воды обусловлено, во-первых, наличием в породах роговой обманки (~50 мас. %), содержащей в своём химическом составе около 2 мас. % H<sub>2</sub>O, а также некоторыми водосодержащими акцессорными минералами (флогопит, апатит). Это определяет минимальное количество воды в расплаве ( $\geq 1$  мас. %). Во-вторых, согласно экспериментальным данным [15, 16], кристаллизация роговой обманки при давлении 2 кбар возможна лишь при содержании воды в расплаве не менее 3–3.5 мас. %. Подбирая параметры

симуляции, для получения 3 мас. % воды в остаточном расплаве после 50 % кристаллизации необходимо её исходное содержание в 1.5 мас. %.

Для получения состава исходного расплава были использованы модельные кривые кристаллизации по составам 3 образцов. Два из них – пробы оливин-роговообманковых габброидов – 3750t и 3759, а в качестве третьего (TTM) использовался средний состав по 10 пробам (табл. 4). Выбор этих проб обусловлен спецификой метода геохимической термометрии, требующей обеспечения контрастности моделируемых составов [10]. Проба по средним составам использовалась

из-за неравномерной метасоматической переработки пород массива. Составы пород были пересчитаны на 98.5% за вычетом ППП, поскольку количество ППП в анализах превышает расчётное содержание воды (1.5 %). Величина ППП в пробах обусловлена и высоким количеством воды из-за метасоматической хлоритизации, серпентинизации и пелитизации, и присутствием летучих ( $\text{CO}_3^{2-}$ , F,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ).

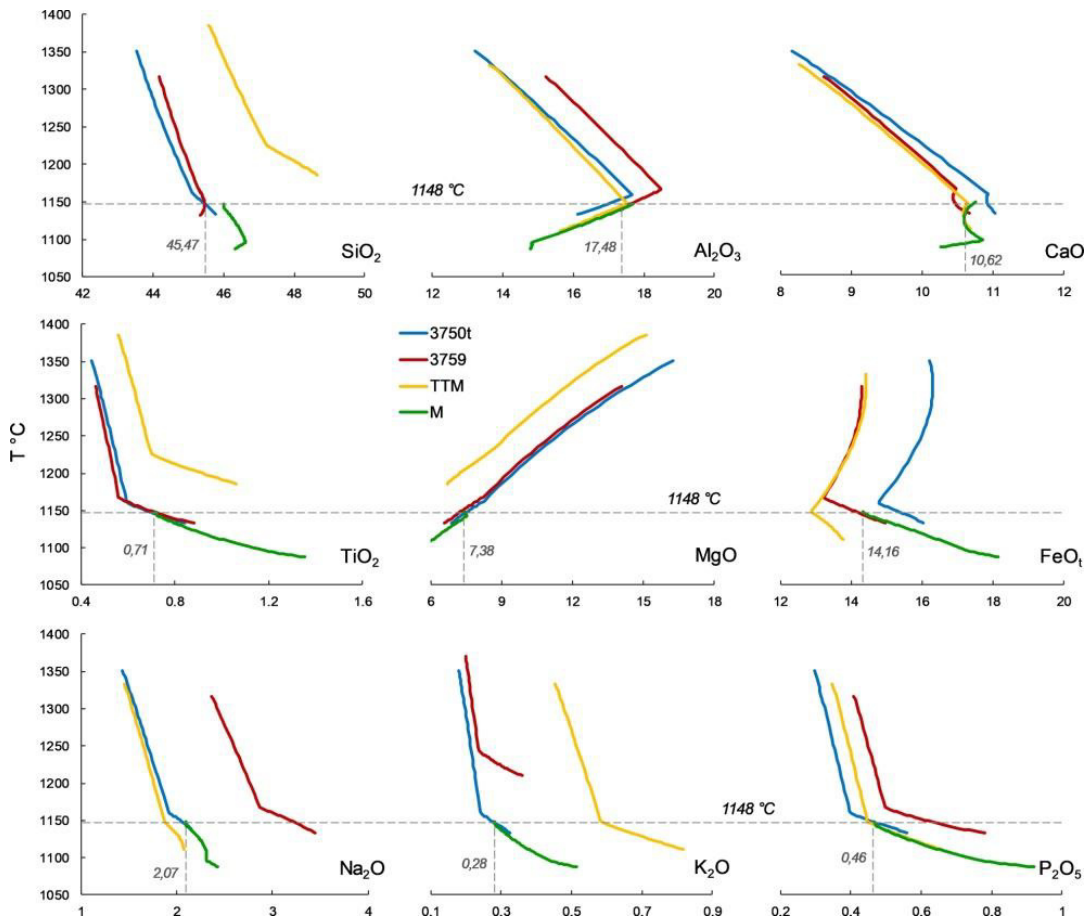
На бинарных диаграммах (рис. 5) показаны кривые кристаллизации расплавов природных и модельных составов. Состав исходного расплава, согласно методу геохимической термометрии [10], оценивался по точкам

**Табл. 4.** Составы проб и модельных расплавов, использованных в COMAGMAT-моделировании  
 [Table 4. Composition of samples and model melts, used in COMAGMAT-simulation]

№	Sample	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>2</sub> O
1	3750 t	42.53	0.43	12.91	15.82	0.24	15.88	7.98	1.40	0.18	0.29	1.5
2	3759	43.29	0.45	14.91	13.99	0.19	13.81	8.45	2.31	0.19	0.40	1.5
3	TTM	44.70	0.54	13.36	14.11	0.22	14.83	8.11	1.43	0.44	0.34	1.5
4	C	45.47	0.71	17.48	14.16	0.20	7.38	10.62	2.07	0.28	0.46	1.5
5	M	46.01	0.72	17.69	14.33	0.20	7.47	10.75	2.10	0.28	0.47	1.7

Примечание: TTM – средний состав по 10 пробам (табл. 1); C – состав расплава, полученный методом геохимической термометрии; M – состав расплава, скорректированный по результатам моделирования.

[Note: TTM – average composition of 10 samples (from Table 1); C – composition of melt, derived from simulation; M – composition of melt, corrected according simulation.]



**Рис. 5.** Тренды кристаллизации природных и рассчитанных составов пород (из табл. 4) массива Ташлы-Тай в координатах “оксид–температура”.

[Fig. 5. Crystallization plots of natural and calculated compositions of Tashly-Tau massif rocks (from Table 4) in “oxide–temperature” pairs.]



пересечения и узлам сближения модельных кривых. От оси ординат построены линии, пересекающие узлы пересечения и фиксирующие температуру ликвидуса на уровне 1148°C. От оси абсцисс к точкам пересечения или к средним кривым построены проекции с указанием содержания каждого элемента (рис. 5). В табл. 4 показан оценённый таким образом состав расплава (С). В дальнейшем этот состав был смоделирован, чтобы воспроизвести количественные характеристики петрогенных оксидов в породе и в минералах. Оказалось, что для получения начальной температуры кристаллизации в 1148°C содержание воды в рассчитанном расплаве нужно было увеличить до значения 1.7 мас. %. В результате был получен модельный состав (М), в целом очень близкий к составу С, отличающийся лишь по кремнекислотности на 0.5 мас. % (табл. 4). Тренд кристаллизации модельного состава (М) нанесён на бинарные диаграммы (рис. 5).

### Обсуждение результатов

#### *Петрографическая номенклатура*

По минеральному составу габброиды массива Ташлы-Тау довольно необычны. Породы со столь высоким количеством роговой обманки, вероятно, должны называться горнблендитами, хотя номенклатура богатых гидроксилсодержащими минералами пород имеет различные неопределённости [17]. В мире отмечаются оливиновые (аржеиниты, до 40% оливина) и полевошпатовые (исситы, иногда – иситы, до 10–22% плагиоклаза) разновидности горнблендитов, встречающиеся очень редко [18, 19]. В нашем случае целесообразно использовать наименование “оливиновый плагиогорнблендит”, однако, применение данной терминологии к изучаемым породам пока проблематично из-за высокой степени их вторичных изменений. Первично магматическое происхождение горнблендитов у некоторых исследователей вызывает сомнение [20]. Магматогенное происхождение роговой обманки в массиве Ташлы-Тау подтверждается её характерным составом, взаимоотношениями с оливином и плагиоклазом в малоизменённых породах, отсутствием признаков замещения ею других минералов, а также замещениями самой роговой обманки низкотемпературными амфиболами (например, актинолитом) и хлоритом.

#### *Петрогенезис и численное моделирование*

Массив Ташлы-Тау, согласно петрогенетической модели образования худолазовского комплекса [1, 5], отвечает первой фазе внедрения магмы из единой крупной магматической камеры, эволюционирующей во времени. Соответственно данный массив, как и вся серия однотипных штоков, формировался из наименее фракционированных порций расплава. Эти выводы подтверждаются результатами моделирования в программе COMAGMAT 3.57 и имеющимися геолого-геофизическими данными [1].

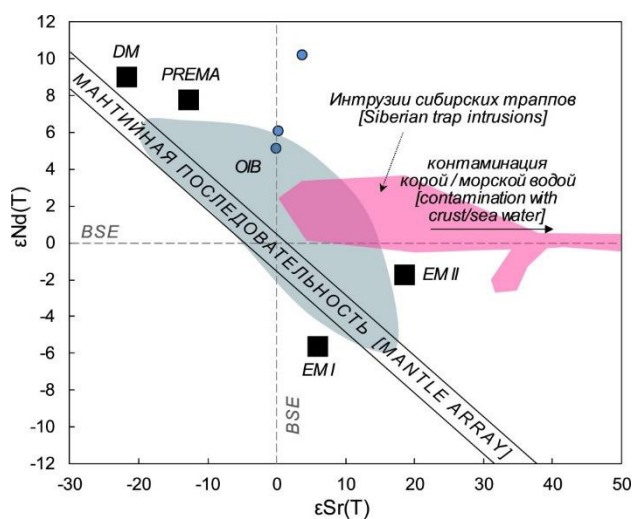
Внутреннее строение массива Ташлы-Тау характеризуется относительной однородностью, при этом в химическом составе отмечаются вариации ряда петро-

генных элементов, связанные с неоднородной (шпиротакситовой) текстурой пород и их метасоматической переработкой. Различия среднего состава пород с модельным расплавом (табл. 4) связаны с наличием в магме фенокристов оливина, находящихся в равновесии с расплавом. Это подтверждается присутствием зёрен оливина в приконтактных породах. То есть в момент внедрения *in situ* магма состояла из расплава и твёрдой фазы – вкрапленников оливина (и возможно, шпинели). При этом состав оливина во вкрапленниках мог отличаться от состава оливина, который мы наблюдаем в породах, поскольку этот минерал может переуравновешиваться за счёт взаимодействия с интеркумулусом [21]. Тем не менее, руководствуясь данными о составе оливина (Fo<sub>77–73</sub>) можно рассчитать, что для компенсации недостающей разницы в содержании MgO между модельным расплавом и средним составом изучаемых пород нужно около 16–18 мас. % вкрапленников оливина в магме.

Согласно численной модели кристаллизации состава М первым на ликвидусе при температуре 1148°C появляется плагиоклаз An<sub>86</sub>. Далее при снижении температуры на 6°C система достигает точки эвтектической кристаллизации оливина (Fo<sub>75</sub>). При 1096°C начинает кристаллизоваться авгит (En<sub>39.97</sub>Fs<sub>21.54</sub>Wo<sub>38.49</sub>). При степени кристаллизации 50% температура расплава снижается до 1087°C, количество плагиоклаза в этот момент составляет 31 мас. %, оливина – 14%, авгита – 5%. Содержание H<sub>2</sub>O достигает 3.36 мас. %, что удовлетворяет условиям стабильности роговой обманки. Если симулятор не останавливать на уровне 50% кристаллизации, в системе продолжается медленный рост содержаний оливина и плагиоклаза и существенный рост количества авгита. В реальности вместо пироксена кристаллизуется роговая обманка, что связано и с водонасыщенностью расплава, и с его повышенной глинозёмистостью. Содержание H<sub>2</sub>O в изучаемой системе определяется как обилием роговой обманки (не менее 50 мас. %), так и пределом растворимости воды в магме, оцениваемым в алумосиликатных расплавах при давлении 2 кбар на уровне 4–8 мас. % [22–24]. Также, судя по минеральному составу пород, присутствие повышенного количества воды ограничивает кристаллизацию Ti-оксидов и весь титан входит в структуру амфибола. В целом воспроизводимые в симуляторе массовые доли плагиоклаза и авгита соответствуют наблюдаемым природным, но доля оливина, учитывая вкрапленники, выше реальной в 1.5 раза. Возможно, природный расплав изначально содержал количество воды больше, чем 1.7 мас. %. Хотя составы модельного и природного оливина очень близки. Напротив, в составах плагиоклазов различия между модельной системой и природной существенны: модельный плагиоклаз (An<sub>86–68</sub>) богаче анортитовым миналом, чем природный (An<sub>66–61</sub>). Однако это может быть связано с недостаточной выборкой анализов из-за интенсивных метасоматических замещений основного плагиоклаза в породах.

Источники магмы

Изотопно-геохимические данные, включая Pb и S [1], свидетельствуют о несущественной роли коровой контаминации родоначального расплава, как минимум в верхнекоровых условиях. Так, на диаграмме “ $\epsilon\text{Sr}(T)$ – $\epsilon\text{Nd}(T)$ ” (рис. 6), построенной на время формирования худолазовского комплекса (325 млн лет), фигуративные точки массива Ташлы-Тау занимают область, наиболее близкую к мантийной компоненте PREMA. Близость к источнику PREMA демонстрирует и изотопный состав свинца [1]. Однако изучаемые габброиды характеризуются более высоким отношением  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , в целом отвечая по Sr-Nd изотопному составу внутриплитным океаническим базальтам с высоким отношением  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . Худолазовский комплекс часто сопоставлялся исследователями с норильским интрузивным комплексом благодаря специализации на Ni-Cu сульфидное оруденение [1, 2]. Эти объекты действительно очень схожи по морфологии, петрографии и внутреннему строению тел, а также по химическому составу рудовмещающих пород, однако как видно на диаграмме “ $\epsilon\text{Sr}(T)$ – $\epsilon\text{Nd}(T)$ ” интрузии Норильского района, включая и норильский комплекс, отличаются в значительной мере контаминированными магмами. Это, наряду с различием в размерах тел, в конечном итоге могло стать одной из основных причин более низкого ресурсного потенциала худолазовского комплекса в сравнении с норильским [25–27].



**Рис. 6.** Диаграмма  $\epsilon\text{Sr}(T)$ – $\epsilon\text{Nd}(T)$  для пород массива Ташлы-Тау. Глобальные мантийные изотопные резервуары: DM – истощённая мантия, EM I и EM II – обогащённые источники, PREMA – преобладающая мантия; OIB – поле базальтов океанических островов. Поля OIB и интрузий сибирских траппов заимствованы из [28], составы остальных компонент взяты из [29, 30]. [Fig. 6.  $\epsilon\text{Sr}(T)$ – $\epsilon\text{Nd}(T)$  diagram for Tashly-Tau massifs rocks. General mantle isotope reservoirs: DM – depleted mantle, EM I and EM II – enriched sources, PREMA – prevalent mantle, OIB – oceanic island basalts field. The OIB and Siberia intrusive trap fields taken from [28], other component compositions taken from [29, 30].]

Выводы

По результатам проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

– массив Ташлы-Тау худолазовского дифференцированного комплекса сложен богатыми первичной роговой обманкой (~ 50 мас. %) оливиновыми габброидами, к которым можно применить термин «оливиновые плагиогорнблендиты»;

– породы характеризуются повышенными, но варьирующими содержаниями MgO и FeO, низкой глинозёмистостью, а также повышенными концентрациями крупноионных литофильных элементов (Cs, Rb, Sr, Ba) и пониженными – высокозарядных элементов (Nb, Ta, Zr, Hf, REE);

– согласно методу геохимической термометрии и численному моделированию параметров кристаллизации исходная магма состояла из водонасыщенного (~1.7 мас. % H<sub>2</sub>O), умеренномagneзиального, высокоглинозёмистого и высокожелезистого базальтового расплава и ~ 20 мас. % вкрапленников оливина (Fo<sub>76</sub>); температура ликвидуса – 1148 °C;

– Sr-Nd изотопные данные свидетельствуют о низкой роли коровой контаминации родоначального расплава ( $\epsilon\text{Nd}(T) = +5.2...+10.3$ ,  $\epsilon\text{Sr}_{\text{UR}}(T) = 0...+3.72$ );

– в качестве источника родоначального расплава мог служить мантийный резервуар типа PREMA (ювенильная дебетированная мантия);

– особенности внутреннего строения и элементно-изотопных геохимических свойств пород массива Ташлы-Тау позволяют его рассматривать как закрытую систему, сформированную в результате одноактной инъекции магматического расплава в место консолидации.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Рахимов И. Р. Геология, петрология и рудоносность позднедевонско-карбонového интрузивного магматизма Западно-Магнитогорской зоны Южного Урала: дис. ... канд. геол.-мин. наук. Уфа, 2017. 181 с.
2. Салихов Д. Н., Пшеничный Г. Н. Магматизм и оруденение зоны ранней консолидации Магнитогорской эвгеосинклинали. Уфа: БФАН СССР, 1984. 112 с.
3. Салихов Д. Н., Бердников П. Г. Магматизм и оруденение позднего палеозоя Магнитогорского мегасинклинария. Уфа, 1985. 94 с.
4. Салихов Д. Н., Беликова Г. И., Пучков В. Н., Эрнст Р., Сёдерлунд У., Камо С., Рахимов И. Р., Холоднов В. В. Никеленосный интрузивный комплекс на Южном Урале // *Литосфера*. 2012. № 6. С. 66–72. URL: <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/705/704> (дата обращения: 22.05.2020).
5. Рахимов И. Р., Вишневецкий А. В., Зайлямов Ш. Р., Михеева А. В. Минералогия пород и руд интрузии Ташлы-Тау худолазовского комплекса // *Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН РБ*. 2018. № 25. С. 77–85. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37173518> (дата обращения: 22.05.2020).
6. Бучковский Э. С., Перминов Г. М., Калташов А. П., Караваяв И. Н. Отчёт о результатах работ, проведённых Худолазовской геолого-поисковой партией в северной части Баймакского и южной части Абзелиловского районов БАССР «Оценка никеленосности основных интрузий Худолазовского комплекса». Уфа: ГосГеолФонд, 1971. Т.1. 275 с.

7. 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. I. 1–2. pp. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.06.010>
8. 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: <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0151>
9. Ariskin A. A., Barmina G. S., Frenkel M. Ya., Nielsen R. CO-MAGMAT: a Fortran program to model magma differentiation processes // *Computers and Geosciences*. 1993. Vol. 19. pp. 1155–1170. DOI: [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90020-6)
10. Арискин А. А., Бармина Г. С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 363 с. URL: [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_63545](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_63545) (дата обращения: 22.05.2020).
11. 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: <https://doi.org/10.1029/2005JB004224>
12. Lodders K., B. Fegley. The Planetary Scientist's Companion. Oxford University Press, New York, 1998. 400 p.
13. Рахимов И. Р., Вишневецкий А. В., Савельев Д. Е. Роль гидротермально-метасоматических изменений в формировании полигенной сульфидной и благороднометаллической минерализации габброидов худолозовского комплекса, Южный Урал // *Металлогения древних и современных океанов*. Миасс: ЮУ ФНЦ УрО РАН, 2019. С. 55–58. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38165446> (дата обращения: 22.05.2020).
14. Маслов В. А., Артюшкова О. В. Стратиграфия и корреляция девонских отложений Магнитогорской мегазоны Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 288 с. URL: [https://www.researchgate.net/publication/264746375\\_Stratigrafija\\_i\\_korrelacija\\_devonskih\\_otlozenij\\_Magnitogorskoj\\_megazoni\\_Uznogo\\_Urala](https://www.researchgate.net/publication/264746375_Stratigrafija_i_korrelacija_devonskih_otlozenij_Magnitogorskoj_megazoni_Uznogo_Urala) (дата обращения: 22.05.2020).
15. Nanev M. T. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems // *American Journal of Science*. 1983. Vol. 283. pp. 993–1033. DOI: 10.2475/ajs.283.10.993
16. Bonechi B., Perinelli C., Gaeta M., Tecchiato V., Granati S.F. Experimental constraints on amphibole stability in primitive alkaline and calc-alkaline magmas // *Periodico di Mineralogia*. 2017. Vol. 86. pp. 231–245. DOI: 10.2451/2017PM735
17. Дубровский М. И. Комплексная классификация магматических горных пород. Апатиты: Изд. Кольского научного центра РАН, 2002. 234 с. URL: [http://wiki.web.ru/images/0/01/Dubr\\_monografiya.pdf](http://wiki.web.ru/images/0/01/Dubr_monografiya.pdf) (дата обращения: 22.05.2020).
18. Петрографический словарь Ф.Ю. Левинсон-Лессинга и Э.А. Струве / Под ред. Г. Д. Афанасьева, В. П. Петрова, Е. К. Устиева. М.: ГОСГЕОЛТЕХИЗДАТ, 1963. 448 с. URL: [http://mmtk.ginras.ru/pdf/Levinson-Lessing,1963\\_Petrographicheskij\\_slovar.pdf](http://mmtk.ginras.ru/pdf/Levinson-Lessing,1963_Petrographicheskij_slovar.pdf) (дата обращения: 22.05.2020).
19. Cox K. G., Bell J. D., Pankhurst R. J. The interpretation of igneous rocks. Springer, 1979. 459 p.
20. Магматические горные породы. Классификация. Номенклатура. Петрография / Под ред. О. А. Богатикова, В. И. Гоньшаковой, А. М. Борсук, В. И. Коваленко, Кононовой В. А., Е. Е. Лазько, Е. В. Шаркова. М.: Наука, 1983. Ч. 1. 372 с.
21. Арискин А. А., Данюшевский Л. В., Конников Э. Г., Бармина Г. С., Николаев Г. С. Использование линий оливнинового контроля и модели Комагат для оценки состава исходной магмы расслоенного Йоко-Довыренского интрузива // *Материалы третьей международной конференции «Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения»*. Качканар, 2009. С. 57–60. URL: [http://www.igg.uran.ru/Conferences/2009-Ultramafic/pdf/vol1/Ariskin\\_57-60.pdf](http://www.igg.uran.ru/Conferences/2009-Ultramafic/pdf/vol1/Ariskin_57-60.pdf) (дата обращения: 22.05.2020).
22. Moore G., Vennemann T., Carmichael I. S. Solubility of water in magmas to 2 kbar // *Geology*. 1995. Vol. 23. No. 12. pp. 1099–1102. DOI: 10.1130/0091-7613(1995)023<1099:SOWIMT>2.3.CO;2
23. Webster J. D., Kinzler R. J., Matheza E. A. Chloride and water solubility in basalt and andesite melts and implications for magmatic degassing // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999. Vol. 63. I. 5. pp. 729–738. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00043-5)
24. Lesne P., Scaillet B., Pichavant M., Iacono-Marziano G., Bény J.-M. The H<sub>2</sub>O solubility of alkali basaltic melts: an experimental study // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2011. Vol. 162. No. 1. pp.133–151. DOI: 10.1007/s00410-010-0588-x
25. Спиридонов Э. М., Кулагов Э. А., Серова А. А., Куликова И. М., Коротаева Н. Н., Серeda Е. В., Тушенцова И. Н., Беляков С. Н., Жуков Н. Н. Генетическая минералогия Pd, Pt, Au, Ag, Rh в норильских сульфидных рудах // *Геология рудных месторождений*. 2015. Т. 57. № 5. С. 445–476. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24149841> (дата обращения: 22.05.2020).
26. Юдовская М. А. Роль ассимиляции при формировании магматических сульфидных месторождений // *Металлогения древних и современных океанов*. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 28–30. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32870240> (дата обращения: 22.05.2020).
27. Прасолов Э. М., Сергеев С. А., Беляцкий Б. В., Богомолов Е. С., Груздов К. А., Капитонов И. Н., Крымский Р. Ш., Халенев В. О. Исследование изотопов He, Ar, S, Cu, Ni, Re, Os, Pb, U, Sm, Nd, Rb, Sr, Lu и Hf в породах и рудах норильских месторождений // *Геохимия*. 2018. № 1. С. 50–69. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0016752517110085>
28. Sereda E., Belyatsky B., Krivolutskaia N. Geochemistry and Geochronology of Southern Norilsk Intrusions, SW Siberian Traps // *Minerals*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 1–27. DOI: 10.3390/min10020165
29. Гусев А. И. Петрология, геохимия и рудоносность кызылташского комплекса Горного Алтая // *Современные наукоемкие технологии*. 2013. № 12. С. 111–116. URL: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=33608> (дата обращения: 22.05.2020).
30. Филина М. И., Сорокина Е. С., Рассомахин М. А., Кононова Н. Н., Костицын Ю. А., Сомсикова А. В. Генетическая связь корундовых плагиоклазитов–кыштымитов и миаскитов Ильмено-Вишневогорского комплекса, Южный Урал, Россия: новые данные Rb-Sr и Sm-Nd изотопного состава, геохимии и минералогии // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 7. С. 742–749. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0016-7525647742-749>

## Petrology and geochemistry of the Tashly-Tau massif, Khudolaz differentiated complex (Southern Urals)

©2020 I. R. Rakhimov✉

*Institute of Geology UFRS RAS, 16/2 K. Marx st., Ufa 450077, Russian Federation*

### Abstract

**Introduction:** The Tashly-Tau massif is a small olivine-hornblende gabbro stock that represents the earliest manifestations of the products of differentiated magmatism in the Khudolaz complex. The complex has a complicated geological structure. Therefore, the detailed petrological and geochemical studies of individual massifs using numerical simulation of crystallisation parameters make it possible to determine the formation features of the Khudolaz complex as a whole. The aim of the study is to reconstruct the paleogenesis of the gabbroids of the Tashly-Tau massif, which is also important because of the massif's sulphide Cu-Ni mineralisation.

**Methodology:** Rock forming minerals of the gabbroids were studied using an optical microscope Axioskop 40 and a scanning electron microscope Tescan Mira 3. The chemical composition of the rocks was determined using the X-ray fluorescence analysis and inductively coupled plasma mass spectrometry. The isotopic composition of Sr and Nd was studied using thermal ionisation spectrometry. To model the petrogenesis, numerical COMAGMAT modelling and the method of geochemical thermometry were used.

**Results and discussion:** The petrological and geochemical study of the rocks in the Tashly-Tau massif was carried out. It showed an extensive presence of the hornblende, titanous magnesiohastingsite (~50 wt. %). The gabbroids are characterised by their relative enrichment in large-ion elements (Cs, Rb, Sr, Ba) and depletion in high field strength elements (Nb, Ta, Zr, Hf, REE). Based on the geochemical data, it was concluded that the magmatic melt was poorly differentiated. The numerical simulation showed that the rocks were formed from magma, consisting of ~20 wt. % olivine phenocrysts (Fo<sub>76</sub>) and water-saturated basalt melt (~1.7 wt. % H<sub>2</sub>O). The melt is characterised by high alumina and iron content and moderate magnesium content. The Sr-Nd isotopic composition of the rocks refers to little crustal contamination of the primitive melt. They are characterised by high positive values of εNd(T) (+5.2...+10.3) and a low content of radiogenic strontium. A mantle reservoir of the PREMA type could be a source of the parent melt.

**Conclusions:** The obtained results are important for understanding the formation nature of the complicatedly differentiated Khudolaz complex, specialised in sulphide mineralisation. This complex is unique to the Urals. It was shown that the use of numerical simulation of water-saturated basalt systems can be quite effective until the crystallisation of hydroxyl-containing rock forming minerals (the hornblende).

**Keywords.** Tashly-Tau massif, melt, numerical simulation, geochemistry, Sr-Nd isotopic systematics, mantle source.

**Funding:** The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant no. 18-35-00391) in the framework of the State Assignment on the topic no. 0252-2017-0012 "Magmatic systems in the history of the development of the Southern Urals (geodynamic conditions of formation and metallogenic specialisation)".

**For citation:** Rakhimov I. R. Petrology and geochemistry of the Tashly-Tau massif, Khudolaz differentiated complex (Southern Urals). // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya = Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology.* 2020, No. 2, pp. 44–57. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2020.2/2858>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ildar I. Rakhimov, e-mail: [rigel92@mail.ru](mailto:rigel92@mail.ru)

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

## REFERENCES

- Rakhimov I. R. *Geologiya, petrologiya i rudonosnost pozdne-devonsko-karbonovogo intruzivnogo magmatizma Zapadno-Magnitogorskoy zony Yuzhnogo Urala*. Diss. cand. geol.-min. nauk [Geology, petrology and ore-mineralization of Late Devonian–Carbon intrusive magmatism of the Western Magnitogorsk zone of the Southern Urals. PhD geol. and min. sci. diss.]. Ufa, 2017. 181 p. (in Russ.)
- 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, 1984. 112 p. (in Russ.)
- Salikhov D. N., Berdnikov P. G. *Magmatizm i orudnenie pozdnego paleozoya Magnitogorskogo megasinklinoziona* [Magmatism and ore-mineralization of Magnitogorsk megasynclorium in Late Paleozoic]. Ufa: BB AS USSR, 1985. 94 p. (in Russ.)
- Salikhov D. N., Belikova G. I., Puchkov V. N., Ernst R., Sederlund U., Kamo S., Rakhimov I. R., Kholodnov V. V. Nikeleunosnyi intruzivnyi kompleks na YUzhnom Urale [Ni-bearing intrusive complex in the Southern Urals]. *Litosfera*. 2012, no. 6, pp. 66–72. <https://www.lithosphere.ru/jour/article/view/705/704> (accessed 22.05.2020). (In Russ.)
- Rakhimov I. R., Vishnevskiy A. V., Zailyamov Sh. R., Mikhcheeva A. V. Mineralogy of rocks and ores of Tashly-Tau intrusion of the Khudolaz complex. *Geology. The bulletin of Department of Earth Science and Resources AS BR*. 2018, vol. 25, pp. 77–85. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37173518> (accessed 22.05.2020). (In Russ.)
- Buchkovskiy E. S., Perminov G. M., Karavaev B. A., Karavaev I. N. Otsenka nikelenosnosti osnovnykh intruziy Khudolazovskogo kompleksa [The values of basic intrusions of Khudolaz complex to nickel content]. *Report on results of carried out by the Khudolaz geology-searching party in the north part of Baymak and southern part of Abzelilovo districts of the BASSR*. Ufa: GosGeolFond, 1971, vol. 1, 275 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, iss. 1–2, pp. 48–57. DOI: <https://doi.org/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: <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0151>
- Ariskin A. A., Barmina G. S., Frenkel M. Ya., Nielsen R. L. COMAGMAT: a Fortran program to model magma differentiation processes. *Computers and Geosciences*. 1993, vol. 19, pp. 1155–1170. DOI: [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90020-6).
- Ariskin A. A., Barmina G. S. *Modelirovanie fazovykh ravnovesiy pri kristallizatsii bazal'tovykh magm* [Phase equilibrium modelling with basalt magmas crystallization]. Moscow, Nauka publ., 2000, 363 p. [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_63545](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_63545) (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: <https://doi.org/10.1029/2005JB004224>
- Lodders K., Fegley B. *The Planetary Scientist's Companion*. Oxford University Press, New York, 1998. 400 p.
- Rakhimov I. R., Vishnevskiy A. V., Saveliev D. E., Vladimirov A. G. Sul'fidnoe Cu-Ni orudnenie i svyazannaya s nim Pt-Pd mineralizatsiya ul'tramafit-mafitov khudolazovskogo differentsirovannogo kompleksa Yuzhnogo Urala [Sulfide Cu-Ni and related Pt-Pd mineralization of ultramafic-mafic rocks of the Khudolaz differentiated complex, South Urals]. *Proceedings of professor V.V. Zaykov XXIVth scientific youth school "Metallogeny of ancient and modern oceans–2018: volcanism and ore formation"*. 2018, no. 24, pp. 39–44. <https://elibrary.ru/item.asp?id=38165446> (accessed 22.05.2020). (in Russ.)
- Maslov V.A., Artyushkova O.V. *Stratigrafiya i korrelyatsiya devonskikh otlozheniy Magnitogorskoy megazony Yuzhnogo Urala* [Stratigraphy and correlation of Devonian sediments of Magnitogorsk megazone, Southern Urals]. Ufa, DesignPol-ygraphService, 2010. 88 p. [https://www.researchgate.net/publication/264746375\\_Stratigrafia\\_i\\_korrelyatsiya\\_devonskikh\\_otlozheniy\\_Magnitogorskoy\\_megazony\\_Uznogo\\_Urala](https://www.researchgate.net/publication/264746375_Stratigrafia_i_korrelyatsiya_devonskikh_otlozheniy_Magnitogorskoy_megazony_Uznogo_Urala) (accessed 22.05.2020). (in Russ.)
- Naney M. T. Phase equilibria of rock-forming ferromagnesian silicates in granitic systems. *American Journal of Science*. 1983, vol. 283, pp. 993–1033. DOI: 10.2475/ajs.283.10.993
- Bonechi B., Perinelli C., Gaeta M., Tecchiato V., Granati S. F. Experimental constraints on amphibole stability in primitive alkaline and calc-alkaline magmas. *Periodico di Mineralogia*. 2017, vol. 86, pp. 231–245. DOI: 10.2451/2017PM735
- Dubrovskiy M. I. Complex classification of magmatic rocks. Apatity: Print. Kola Science Centre RAS, 2002. 234 p. [http://wiki.web.ru/images/0/01/Dubr\\_monografiya.pdf](http://wiki.web.ru/images/0/01/Dubr_monografiya.pdf) (accessed 22.05.2020). (in Russ.)
- Petrographic dictionary of P. Y. Levinson-Lessing and E. A. Struve. By editorial of G.D. Afanasyev, V.P. Petrov, E.K. Ustiev. Moscow: GOSGEOLTECHIZDAT, 1963. 448 p. [http://mmtk.ginras.ru/pdf/Levinson-Lessing,1963\\_Petrographicheskoy\\_slovar.pdf](http://mmtk.ginras.ru/pdf/Levinson-Lessing,1963_Petrographicheskoy_slovar.pdf) (accessed 22.05.2020). (in Russ.)
- Cox K. G., Bell J. D., Pankhurst R. J. *The interpretation of igneous rocks*. Springer, 1979. 459 p.
- Magmatic rocks. Classification. Nomenclature. Petrography. / By editorial of O. A. Bogatkov, V. I. Gonshakova, A. M. Bor-suk, V. I. Kovalenko, V. A. Kononova, E. E. Lazko, E. V. Shar-kov. Moscow, Nauka publ., 1983, p. 1, 372 p.
- Ariskin A. A., Danyushevsky L. V., Konnikov E. G., Barmina G. S., Nikolaev G. S. *Ispol'zovanie liniy olivinovogo kontrolya i modeli Comagmat dlya otsenki sostava iskhodnoy magmy rassloennogo Yoko-Dovyrenskogo intruziva* [Use of olivine control lines and the Comagmat model for evaluation of the parental magma composition of the Ioko-Dovyren layered intrusion]. *Materials of third international conference "Ultrabasic-basic complexes of orogenic belts and related deposits"*. Kachkanar, 2009, pp. 57–60. [http://www.igg.uran.ru/Conferences/2009-Ultrabasic/pdf/vol1/Ariskin\\_57-60.pdf](http://www.igg.uran.ru/Conferences/2009-Ultrabasic/pdf/vol1/Ariskin_57-60.pdf) (accessed 22.05.2020). (in Russ.)
- Moore G., Vennemann T., Carmichael I. S. Solubility of water in magmas to 2 kbar. *Geology*. 1995, vol. 23, no. 12, pp. 1099–1102. DOI: 10.1130/0091-7613(1995)023<1099:SOWIMT>2.3.CO;2
- Webster J. D., Kinzler R. J., Matheza E. A. Chloride and water solubility in basalt and andesite melts and implications for magmatic degassing. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1999, vol. 63, iss. 5, pp. 729–738. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00043-5)
- Lesne P., Scaillet B., Pichavant M., Iacono-Marziano G., Bény J.-M. The H<sub>2</sub>O solubility of alkali basaltic melts: an experimental study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2011, vol. 162, no. 1, pp. 133–151. DOI: 10.1007/s00410-010-0588-x

25. Spiridonov E. M., Serova A. A., Korotaeva N. N., Zhukov N. N., Kulagov E. A., Belyakov S. N., Kulikova I. M., Sereda E. V., Tushentsova I. N. Genetic Pd, Pt, Au, Ag, and Rh mineralogy in Noril'sk sulfide ores. *Geology of Ore Deposits*. 2015, vol. 57, no. 5, pp. 402–432. DOI: 10.1134/S1075701515050062
26. Yudovskaya M. A. *Rol' assilyatsii pri formirovani magmaticheskikh sul'fidnykh mestorozhdeniy* [Role of assimilation during formation of magmatic sulfide deposits]. *Proceedings of professor V.V. Zaykov XXIVth scientific youth school "Metallogeny of ancient and modern oceans–2018: volcanism and ore formation"*. 2018, no. 24, pp. 28–30. <https://elibrary.ru/item.asp?id=32870240> (accessed 22.05.2020). (in Russ.)
27. Prasolov E. M., Sergeev S. A., Belyatsky B. V., Bogomolov E. S., Gruzlov K. A., Kapitonov I. N., Krymsky R. S., Khalenev V. O. Isotopic systematics of He, Ar, S, Cu, Ni, Re, Os, Pb, U, Sm, Nd, Rb, Sr, Lu, and Hf in the rocks and ores of the Norilsk deposits. *Geochemistry International*. 2018, vol. 56, no. 1, pp. 46–64. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702917110088>
28. Sereda E., Belyatsky B., Krivolutskaya N. Geochemistry and Geochronology of Southern Norilsk Intrusions, SW Siberian Traps. *Minerals*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 1–27. DOI: 10.3390/min10020165
29. Gusev A. I. Petrologiya, geokhimiya i rudonosnost' kyzyltashskogo kompleksa Gornogo Altaya [Petrology, geochemistry and ore-mineralization of Kyzyltash complex of the Gornyi Altai]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii = Modern high technology*. 2013, no. 12, pp. 111–116. <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=33608> (accessed 22.05.2020). (in Russ.)
30. Filina M. I., Sorokina E. S., Kononkova N. N., Kostitsyn Y. A., Somsikova A. V., Rassomakhin M. A. Genetic Linkage of Corundum Plagioclases–Kyshtymites and Miaskites of the Ilmenogorsky–Vishnevogorsky Complex, South Urals, Russia: New Rb–Sr and Sm–Nd Isotopic, Geochemical and Mineralogical Data. *Geochemistry International*. 2019, vol. 57, no. 7, pp. 821–828. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0016702919070048>

---

*Рахимов Ильдар Рашитович* – к.г.-м.н., с.н.с., Институт геологии Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), Уфа, Российская Федерация; E-mail: [rigel92@mail.ru](mailto:rigel92@mail.ru)  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-0020-6634>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

---

*Ildar R. Rakhimov* - PhD in Geol.-Min., senior researcher: Institute of Geology of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa, Russian Federation; E-mail: [rigel92@mail.ru](mailto:rigel92@mail.ru)  
ORCID <http://orcid.org/0000-0003-0020-6634>

Author have read and approved the final manuscript.