

МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ЧЕВКИНИТА В ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ ИНТРУЗИЯХ БАЗИТ-ГИПЕРБАЗИТОВОГО СОСТАВА (ЗАПАДНЫЙ СКЛОН ЮЖНОГО УРАЛА)

© 2024 г. Д. члены С. Г. Ковалев*, С. С. Ковалев, А. А. Шарипова

Институт геологии УФИЦ РАН, ул. К. Маркса, 16/2, Уфа, 450077, Россия

**e-mail: kovalev@ufaras.ru*

Поступила в редакцию: 03.07.2023 г.

После доработки: 10.04.2024 г.

Принята к публикации: 17.06.2024 г.

При детальном изучении дифференцированных интрузий мисаелгинского комплекса, расположенного в тараташском метаморфическом блоке, впервые на Урале обнаружена редкоземельная минерализация, представленная минералами группы чевкинита. Установлено, что в процессе кристаллизационной дифференциации на заключительных этапах становления массива происходит увеличение щелочности и глиноземистости последних порций расплава, при которых становится возможной формирование редкоземельной минерализации в температурном интервале от ~800 °С до ~1050 °С и парциальном давлении кислорода $\lg fO_2 = -12.7$.

Ключевые слова: Южный Урал, базит-ультрабазитовая интрузия, редкоземельная минерализация, минералы группы чевкинита

DOI: 10.31857/S0869605524040036, **EDN:** PDFUYS

Минералы группы чевкинита представляют собой моноклинные орто-диортосиликаты редкоземельных элементов, титана и железа с содержанием REE_2O_3 до ~50 мас. %. Кроме того, известны минералы с преобладанием Mg, Al, Mn, Cr, Sr или Zr в одной из катионных позиций. Минералы группы обнаружены в различных магматических (Macdonald, Belkin, 2002; Troll et al., 2003; Vlach, Gualda, 2007; Bagiński, Macdonald, 2013; Macdonald et al., 2019; Спиридонов и др., 2019; Domańska-Siuda et al., 2022) и метаморфических (Belkin et al., 2009; Macdonald et al., 2015) породах, включая лунные базальты (Muhling et al., 2014). По данным Р. Макдональда с соавторами минералы группы чевкинита могут образовываться в диапазоне давлений от 50 до 10 и менее кбар, в широком диапазоне температур (Macdonald et al., 2019).

В статье сообщается о находке минералов группы чевкинита, впервые обнаруженных в дифференцированных интрузиях базит-гипербазитового состава западного склона Южного Урала.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералы были изучены на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega Compact с энерго-дисперсионным анализатором Xplorer Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, Уфа). Обработка спектров производилась автоматически при помощи

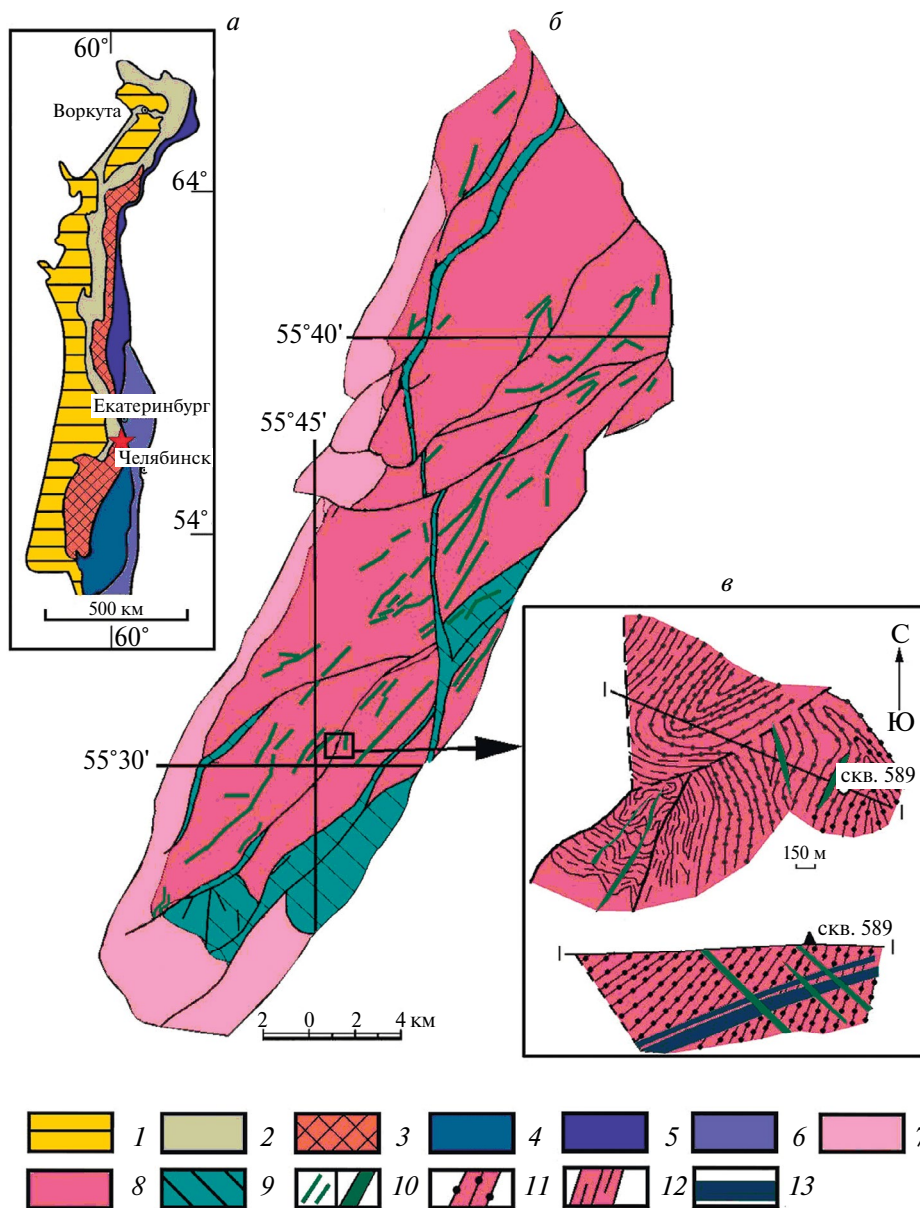


Рис. 1. Структурная схема Урала (а), геологические схемы тараташского комплекса (б) и участка «Магнитный» с телами пород мисаелгинского комплекса (в).

Мегазоны Урала: 1 — Предуральская; 2 — Западно-Уральская; 3 — Центрально-Уральская; 4 — Тагильская; 5 — Магнитогорская; 6 — Восточно-Уральская; 7 — отложения айской свиты (RF₁); 8 — архей-протерозойские отложения нерасчлененные; 9 — тектонические зоны с бластомилонитами; 10 — разновозрастные дайки базитов; 11 — мигматиты; 12 — гранат-биотитовые гнейсы; 13 — расслоенные тела мисаелгинского комплекса.

Fig. 1. Structural scheme of the Urals (a), geological schemes of the Taratash complex (b) and the «Magnitnyy» site with rock bodies of the Misaelga complex (v).

Megazones of the Urals: 1 — Cis-Urals; 2 — West Ural; 3 — Central Ural; 4 — Tagil; 5 — Magnitogorsk; 6 — East Ural; 7 — deposits of the Ai Formation (RF₁); 8 — undivided Archean-Proterozoic deposits; 9 — tectonic zones with blastomylonites; 10 — uneven-aged mafic dikes; 11 — migmatites; 12 — garnet-biotite gneisses; 13 — layered bodies of the Misaelga.

программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ. Условия съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 4 нА, время накопления спектра в точке 60 с в режиме Point&ID, диаметр пучка составлял ~3 мкм. При анализе использовался встроенный комплект эталонов Oxford Instruments Standards, представленный природными и синтетическими соединениями.

Концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) определены методом ICP-MS в ЦИИ Института Карпинского (г. Санкт-Петербург). Методика анализа обеспечивает с надежностью 95 % получение результатов анализа с погрешностью, не превышающей значений, приведенных в ОСТ 41-08-214-04 для III категории точности. Анализ подготовленных растворов проводили на приборах ELAN-6100 DRC и Agilent 7700 с использованием компьютерной программы обработки данных TOTALQUANT. Формулы минералов рассчитывались по методике (Булах, 1967; Кривовичев, Гульбин, 2022). Расчет выполнен на 22 атомах кислорода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Мисаелгинский комплекс является одним из представителей дифференцированных интрузий западного склона Южного Урала (Алексеев, 1984; Ковалев, 2011; Сазонова и др., 2011; Носова и др., 2012). В его состав входят два тела мощностью 45 и более 216 м, расположенных в юго-западной части тараташского метаморфического комплекса (рис. 1). В сложении тел участвуют: порфировидные оливиновые долериты (в эндоконтактных зонах), среднезернистые оливиновые пироксениты, габбро-долериты и феррогаббро-долериты. В интрузиве выделены следующие горизонты (снизу вверх): нижняя эндоконтактная зона мощностью около 2 м, ультраосновной горизонт (110—112 м) и габбровый горизонт (100—110 м).

Нижняя эндоконтактная зона сложена порфировидными оливиновыми долеритами со среднезернистой порфировидной структурой и массивной текстурой. В состав пород входят оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, бурая роговая обманка, биотит, магнетит, титаномagnetит, ильменит, сульфиды, апатит, титанит.

Ультраосновной горизонт представлен среднезернистыми оливиновыми пироксенитами и вебстеритами, микроструктурные особенности и минеральный состав которых изменяются (постепенно) в зависимости от местоположения в разрезе. В составе пород установлены оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз, амфибол, биотит, апатит, магнетит, ильменит (пикроильменит), хромшпинелид (хроммагнетит), сульфиды (халькопирит, пирротин, пентландит, зигенит). Ассоциация вторичных минералов включает актинолит, серпентин, тальк, хлорит, серицит, карбонат и тонкодисперсный магнетит. Для нижней части горизонта характерны породы с пойкилитовой структурой, в них часто присутствуют скопления оливина, образующие гломоропорфировые выделения (рис. 2). Далее вверх по разрезу преобладают породы с гипидиоморфнозернистой структурой (с элементами порфировидной структуры). В качестве порфировидных вкрапленников выступают кристаллы ортопироксена. Изменение минерального состава снизу вверх по разрезу заключается в закономерном уменьшении количества оливина и ортопироксена.

Габбровый горизонт сложен типичными габбро, феррогаббро-долеритами, более лейкократовыми разновидностями пород (до жильных плагиогранитов). Структура пород меняется от порфировидной до офитовой, гипидиоморфнозернистой — габбровой (в прожилковых плагиогранитах — гипидиоморфнозернистой гранитовой). Минеральный состав: клинопироксен, плагиоклаз, амфибол, биотит, магнетит,

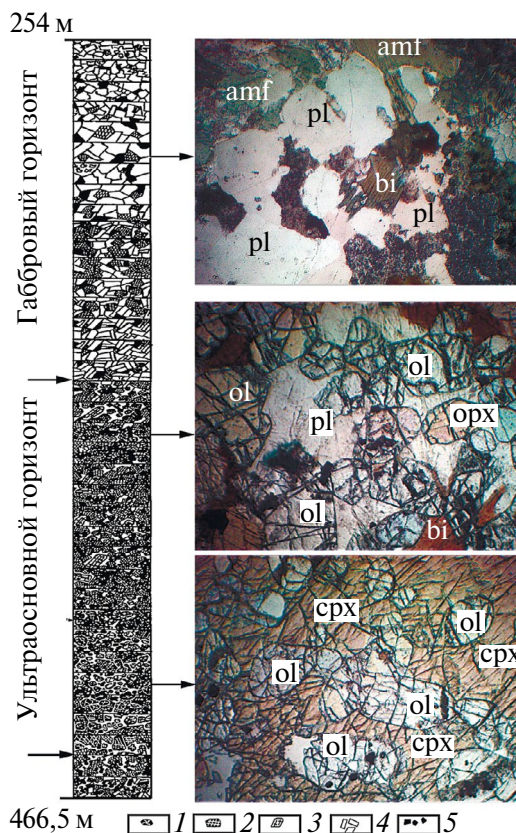


Рис. 2. Разрез и микрофотографии шлифов пород мисаелгинского комплекса.

1 — оливин, 2 — клинопироксен, 3 — ортопироксен, 4 — плагиоклаз, 5 — рудные минералы.

Fig. 2. Cross section and thin sections of rocks of the Misaelga Complex.

1 — olivine, 2 — clinopyroxene, 3 — orthopyroxene, 4 — plagioclase, 5 — ore minerals.

титаномагнетит, сульфиды (халькопирит, галенит, сфалерит, при преобладании пирита), апатит, циркон. В верхних частях тела присутствуют прожилки плагиогранитного состава мощностью 5—10 см, сложенные плагиоклазом (альбитом, олигоклазом) в количестве до 40—60 %, редким микроклином, серицитом, магнетитом, апатитом и кварцем.

Минералы группы чевкинита (табл. 1) обнаружены в породах габбрового горизонта в виде хорошо ограненных кристаллов призматического или уплощенно-призматического габитуса (рис. 3, а, б), удлиненно-ксерноморфных и изометрично-ксерноморфных выделений (рис. 3, в, д) размером до 50 мкм по удлинению. Минералы образуют включения в зернах амфибола или биотита. Они наблюдаются также в интерстициальном пространстве, выполненном кварц-полевошпатовым либо кварцевым материалом. Очень часто по периферии кристаллы замещаются алланитом (рис. 3, а, в—д) и в одном случае — титанитом (рис. 3, б). Ранее, в ультраосновном горизонте этого тела были обнаружены монацит-(Ce), алланит-(Ce) и РЗЭ-содержащий эпидот (Ковалев, Ковалев, 2023). Как видно из приведенных микрофотографий, монацит-(Ce) присутствует и в породах габбрового горизонта (рис. 3, е).

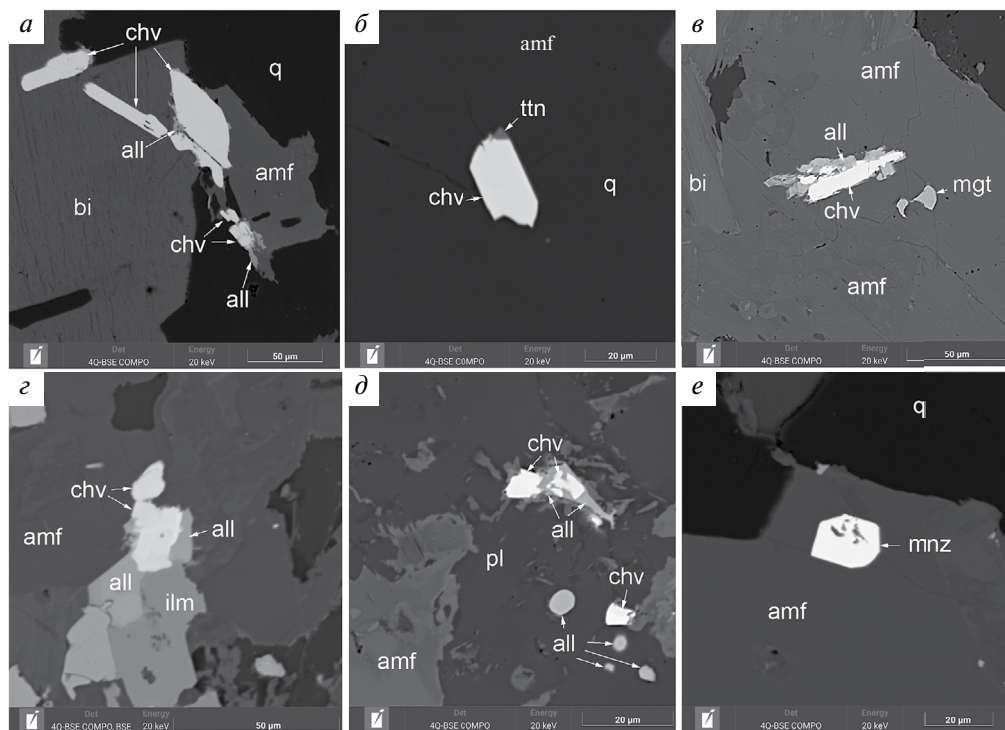


Рис. 3. Микрофотографии минералов группы чевкинита в породах мисаелгинского комплекса.

chv — минералы группы чевкинита, all — алланит, amf — амфибол, bi — биотит, ttn — титанит, mgt — магнетит, ilm — ильменит, pl — плагиоклаз (олигоклаз), q — кварц.

Fig. 3. Micrographs of chevkinite group minerals in rocks of the Misaelga complex.

chv — minerals of the chevkinite group, all — allanite, amf — amphibole, bi — biotite, ttn — titanite, mgt — magnetite, ilm — ilmenite, pl — plagioclase (oligoclase), q — quartz.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее было показано, что распределение редкоземельных элементов в породах мисаелгинского комплекса характеризуется определенным своеобразием. Так, степень фракционирования РЗЭ (среднее для габброидов: La_n/Lu_n 10.7, Ce_n/Yb_n 9.1; среднее для пироксенитов: 8.2, 7.3 соответственно), а также фракционирование легкой (La_n/Sm_n для габброидов — 2.2, пироксенитов — 2.0) и тяжелой (Gd_n/Yb_n для габброидов — 3.28, для пироксенитов — 3.06) групп, свидетельствует об «инертном» поведении РЗЭ при внутрикамерной дифференциации расплава. Лишь на заключительных этапах остаточный расплав плагиогранитного состава резко обогащается всей группой РЗЭ (Ковалев, Ковалев, 2021). Поскольку в ультраосновном горизонте большая часть РЗЭ входит в состав клинопироксена, редкоземельная минерализация в пироксенитах и вебстеритах встречается редко и представлена в основном мелкими выделениями монацита, алланита-(Ce) и РЗЭ-содержащего эпидота (Ковалев, Ковалев, 2023). В габбровом горизонте, при сопоставимом количестве РЗЭ, клинопироксен встречается гораздо реже. В этих условиях становится возможным формирование более обильной и разнообразной редкоземельной минерализации.

Согласно экспериментальным данным Т.Х. Грина и Н. Дж. Пирсона в обогащенных РЗЭ расплавах, варьирующих по основности от базальта до риолита, минералы

группы чевкинита (МГЧ) кристаллизуются в диапазоне температур от 900 °С до 1050 °С в интервале давлений 7.5—20 кбар (Green, Pearson, 1988). По данным Р. Макдональда и Х. Белкина породы, содержащие МГЧ, формировались в диапазоне от 660 до 1000 °С и давлении от 1 до 4 кбар. При этом летучесть кислорода изменялась от значений более низких, чем буфер FMQ, до значений выше буфера NNO (Macdonald, Belkin, 2002).

Таблица 1. Химический состав минералов группы чевкинита (мас. %) из пород мисаелгинского комплекса

Table 1. Chemical composition of minerals of the chevkinite group (wt %) from rocks of the Misaelga complex

[illegible]

Таблица 1 (окончание)

Компонент	Номер образца							
	11620-222	11620-223	11620-224	11620-247	11620-259	11620-260	11620-261	11620-269
SiO ₂	19.78	19.82	19.95	20.46	20.67	21.02	21.05	20.03
TiO ₂	16.99	17.3	18.42	18.39	18.6	18.49	18.57	17.91
ZrO ₂	—	—	—	1.39	0.67	—	0.73	0.48
Al ₂ O ₃	4.45	4.1	3.38	3.43	3.33	3.47	3.65	3.37
FeO	2.38	2.43	2.57	2.39	2.58	2.67	2.52	2.67
Fe ₂ O ₃	5.30	5.40	5.70	5.31	5.73	5.93	5.61	5.94
MgO	1.07	1.10	1.18	0.80	0.86	0.89	0.90	0.81
Sc ₂ O ₃	0.16	—	0.16	0.26	0.30	0.23	0.34	0.26
Y ₂ O ₃	—	—	—	—	0.74	—	—	—
La ₂ O ₃	13.35	13.40	13.00	10.65	10.49	10.54	10.6	10.75
Ce ₂ O ₃	24.14	24.29	22.49	22.05	22.7	22.39	22.10	22.29
Pr ₂ O ₃	1.92	1.86	1.75	1.77	1.74	1.76	1.68	1.73
Nd ₂ O ₃	5.65	5.52	5.28	6.96	6.81	7.02	6.59	6.92
Sm ₂ O ₃	—	—	0.58	—	—	—	—	—
ThO ₂	—	—	—	—	0.39	—	—	—
CaO	3.18	3.39	4.28	4.77	4.31	4.36	4.65	4.29
Сумма	97.84	98.07	98.17	98.1	99.35	98.18	98.43	96.86
Коэффициенты в формулах (O = 22)								
La	0.91	0.91	0.87	0.71	0.69	0.70	0.70	0.72
Ce	1.63	1.64	1.49	1.47	1.49	1.47	1.45	1.49
Pr	0.13	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12
Nd	0.37	0.36	0.34	0.45	0.44	0.45	0.42	0.45
Sm	—	—	0.04	—	—	—	—	—
Y	—	—	—	—	0.07	—	—	—
Th	—	—	—	—	0.02	—	—	—
Ca	0.63	0.67	0.83	0.93	0.83	0.84	0.89	0.84
Сумма	3.67	3.70	3.69	3.68	3.65	3.57	3.57	3.62
Sc	0.03	—	0.03	0.04	0.05	0.04	0.05	0.04
Zr	—	—	—	0.12	0.06	—	0.06	0.04
Al	0.63	0.55	0.34	0.45	0.40	0.49	0.53	0.39
Mg	0.30	0.30	0.32	0.22	0.23	0.24	0.24	0.22
Fe ⁺²	0.37	0.37	0.39	0.36	0.39	0.40	0.38	0.41
Fe ⁺³	1.64	1.67	1.73	1.61	1.72	1.78	1.68	1.82
Ti	2.36	2.40	2.51	2.51	2.51	2.49	2.50	2.46
Si	3.66	3.66	3.62	3.72	3.70	3.76	3.76	3.66
Al	0.34	0.34	0.38	0.28	0.30	0.24	0.24	0.34
Сумма	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

Анализ химического состава силикатов и алюмосиликатов, слагающих дифференцированное тело мисаелгинского комплекса, позволил расчетными методами восстановить термобарические параметры кристаллизации расплава в промежуточной камере

(Ковалев, Ковалев, 2021). В частности, установлено наличие высокотемпературных (1472 °C) интрателлурических кристаллов оливина, характеризующих условия магмогенерации в мантии и оливина, кристаллизующегося в условиях промежуточной камеры (1050—1183 °C). Рассчитанная температура кристаллизации пироксенов (1071—1073 °C) свидетельствует о том, что они кристаллизовались совместно с оливином основной массы пород. Установленные вариации P – T параметров для плагиоклаз-амфиболовой ассоциации (950—1045 °C, 4.0—7.4 кбар) и биотита (>700—800 °C) завершают количественную характеристику высокотемпературных процессов кристаллизации расплава.

Как уже говорилось, обнаруженные нами минералы группы чевкинита в породах мисаелгинского комплекса встречаются в виде включений в кристаллах амфибола и биотита (рис. 3). Это позволяет говорить о его ранней кристаллизации в диапазоне температур от ~800 °C до ~1050 °C, что в целом соответствует данным Т. Х. Грина и Н. Дж. Пирсона (Green, Pearson, 1988).

По литературным данным минералы группы чевкинита кристаллизуются в щелочной среде, в то время как алланит формируется в высокоглиноземистых породах (Vlach, Gualda, 2007). С учетом сказанного, упомянутое выше замещение МГЧ алланитом хорошо согласуется с процессами внутрикамерной дифференциации расплава, сформировавшего породы мисаелгинского комплекса. В частности, повышение щелочности остаточного расплава обусловлено ранней кристаллизацией оливина, пироксенов, плагиоклаза и отчасти амфибола, а формирование прожилков плагиогранитного состава на заключительных этапах становления массива свидетельствует об увеличении глиноземистости последних порций расплава. То есть увеличение щелочности делает возможным кристаллизацию минералов группы чевкинита, а глиноземистости — приводит к его замещению алланитом.

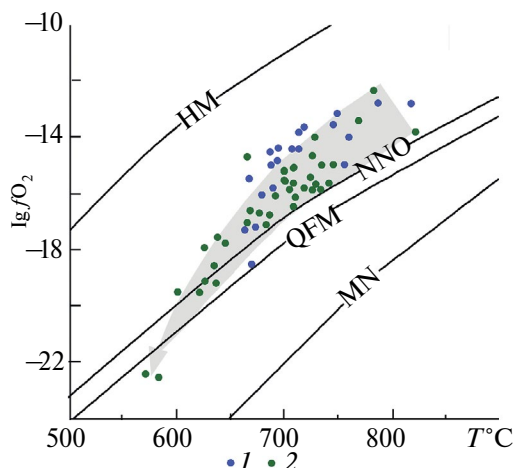


Рис. 4. Диаграмма $T - \lg fO_2$ для сростков и структур распада ильменита и титаномagnetита из пород мисаелгинского комплекса.

1 — минералы габбрового горизонта; 2 — минералы пикритового горизонта. Буферы HM и MW по (Myers, Eugster, 1983), QFM по (Berman, 1988), NNO по (Huebner, Sato, 1970).

Fig. 4. $T - \lg fO_2$ diagram for intergrowths and exsolution microstructures of ilmenite and titanomagnetite from rocks of the Misaelga Complex.

1 — minerals of the gabbro horizon; 2 — minerals of the picrite horizon. HM and MW buffers after (Myers, Eugster, 1983), QFM buffer after (Berman, 1988), NNO buffer after (Huebner, Sato, 1970).

Парциальное давление кислорода, рассчитанное¹ для сростков ильменита и титаномагнетита (821 °C, $\lg fO_2 = -12.7$) и для структур распада (572 °C, $\lg fO_2 = -22.4$) оказывается практически идентичным значениям, установленным в работе (Macedonald, Belkin, 2002). При этом снижение температуры при уменьшении фугитивности кислорода (рис. 4) свидетельствует о том, что расплав, сформировавший породы мисаелгинского комплекса, эволюционировал в закрытой по кислороду системе.

ВЫВОДЫ

1. Впервые на Урале в дифференцированной интрузии, расположенной в тара-ташском метаморфическом комплексе, обнаружена редкоземельная минерализация, представленная минералами группы чевкинита, что свидетельствует о многообразии процессов редкоземельного минералообразования при формировании дифференцированных тел базит-гипербазитового состава.

2. В процессе кристаллизационной дифференциации на заключительных этапах становления массива происходит увеличение щелочности и глиноземистости последних порций расплава, при которых становится возможной формирование обнаруженной минерализации в температурном интервале от ~800 °C до ~1050 °C и парциальном давлении кислорода $\lg fO_2 = -12.7$ и ее последующее замещение алланитом.

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ 23-27-00023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. М.: Наука, 1984. 136 с.

Булах А.Г. Руководство и таблицы для расчета формул минералов. М.: Недра, 1967. 141 с.

Ковалев С.Г. Новые данные по геохимии диабаз-пикритового магматизма западного склона Южного Урала и условия его формирования // Литосфера. 2011. № 2. С. 68–83.

Ковалев С.Г., Ковалев С.С. Условия и механизмы формирования сульфидно-оксидной минерализации при дифференциации расплава в промежуточной камере (на примере интрузии западного склона Южного Урала) // Геология рудных месторожд. 2021. Т. 63. № 6. С. 551–575.

Ковалев С.Г., Ковалев С.С. Первые данные о Th–REE минерализации в магматических породах основного-ультраосновного состава западного склона Южного Урала // Георесурсы. 2023. № 25(1). С. 95–107. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.1.10>

Кривовичев В.Г., Гульбин Ю.Л. Рекомендации по расчету и представлению формул минералов по данным химических анализов // ЗРМО. 2022. Т. 151. № 1. С. 114–124.

Носова А.А., Сазонова Л.В., Каргин А.В., Ларионова Ю.О., Горожанин В.М., Ковалев С.Г. Мезопротерозойская внутриплитная магматическая провинция Западного Урала: основные петрогенетические типы пород и их происхождение // Петрология. 2012. Т. 20. № 4. С. 392–428.

Сазонова Л.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О., Каргин А.В., Ковалев С.Г. Мезопротерозойские пикриты восточной окраины Восточно-Европейской платформы и Башкирского мегантиклинория: петрогенезис и особенности составов оливина и клинопироксена // Литосфера. 2011. № 3. С. 64–83.

Спиридонов Э.М., Филимонов С.В., Семиколенных Е.С., Коротаева Н.Н., Кривицкая Н.Н. Чевкинит-(Ce) и перрьерит-(Ce) из островодужных кварцевых габбро-норит-долеритов интрузива Аю-Даг, Горный Крым // ЗРМО. 2019. Т. 148. № 4. С. 61–79.

¹ Для расчетов использовалась программа ILMAT (Lepage, 2003). За конечный результат принимались данные, рассчитанные по модели (Lindsley, Spencer, 1982).

Minerals of the Chevkinite Group in Differentiated Basic-Ultrabasic Intrusions from Western Slope of the Southern Urals

S. G. Kovalev*, S. S. Kovalev, A. A. Sharipova

Institute of Geology, Ufa Federal Research Centre RAS, Ufa, Russia

**e-mail: kovalev@ufaras.ru*

A detailed study of differentiated intrusions of the Misaelga complex located in the Taratash metamorphic block for the first time in the Urals revealed rare-earth mineralization represented by minerals of the chevkinite group. It has been established that during the process of crystallization differentiation at the final stages of the formation of the massif, the alkalinity and alumina content of the last portions of the melt increase, at which the formation of perrierite-(Ce) mineralization becomes possible in the temperature range from ~800 °C to ~1050 °C and partial pressure of oxygen $\lg fO_2 = -12.7$.

Keywords: Southern Urals, basic-ultrabasic intrusion, rare earth mineralization, chevkinite group minerals

REFERENCES

- Alekseev A.A. Ripheikso-Vendian magmatism of the western slope of the Southern Urals. Moscow: Nauka, **1984**. 136 p. (in Russian).
- Bagiński B., Macdonald R. The chevkinite group: underestimated accessory phases from a wide range of parageneses. *Mineralogia*. **2013**. Vol. 44. N 2-3. P. 3—18.
- Belkin H.E., Macdonald R., Grew E.S. Chevkinite-group minerals from granulite-facies metamorphic rocks and associated pegmatites of East Antarctica and South India. *Miner. Mag.* **2009**. Vol. 73(1). P. 149—164.
- Bulakh A.G. Guide and tables for calculating mineral formulas. Moscow: Nedra, **1967**. 141 p. (in Russian).
- Domańska-Siuda J., Nejbert K., Bagiński B., Macdonald R., Kotowski J., Stachowicz M. Chevkinite-group minerals in selected intrusions of the Mazury Complex, North-Eastern Poland: insights into the formation of a titanite-like phase by hydrothermal alteration. *Miner. Petrol.* **2022**. Vol. 116. N 2. P. 105—119.
- Green T.H. and Pearson N.J. Experimental crystallization of chevkinite/perrierite from REE enriched silicate liquids at high pressure and temperature. *Miner. Mag.* **1988**. N 52. P. 113—120.
- Huebner J.S., Sato M. The oxygen fugacity-temperature relationships of manganese oxide and nickel oxide buffers. *Amer. Miner.* **1970**. Vol. 55. P. 934—952.
- Kovalev S.G. New data on the geochemistry of diabase-picrite magmatism of the western slope of the Southern Urals and the conditions of its formation. *Litosfera*. **2011**. N 2. P. 68—83 (in Russian).
- Kovalev S.G., Kovalev S.S. Conditions and mechanisms for the formation of sulfide-oxide mineralization during melt differentiation in an intermediate chamber (on the example of the intrusion of the western slope of the Southern Urals). *Geol. Ore Deposits*. **2021**. Vol. 63. N 6. P. 551—575 (in Russian).
- Kovalev S.G., Kovalev S.S. First data on Th—REE mineralization in mafic-ultrabasic igneous rocks of the western slope of the Southern Urals. *Georesources*. **2023**. Vol. 25. N 1. P. 95—107 (in Russian).
- Krivovichev V.G., Gulbin Yu.L. Recommendations for the calculation and presentation of mineral formulas based on chemical analysis data. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2022**. Vol. 151. N 1. P. 114—124 (in Russian).
- Lepage L.D. ILMAT: an excel worksheet for ilmenite-magnetite geothermometry and geobarometry. *Comput. Geosci.* **2003**. Vol. 29. N 5. P. 673—678.
- Lindsley D.H., Spencer K.J. Fe-Ti oxide geothermometry: Reducing analyses of coexisting Ti-magnetite (Mt) and ilmenite (Ilm). *American Geophysical Union*. **1982**. Vol. 63. N 18. P. 471.

Macdonald R., Bagiński B., Belkin H.E., Stachowicz M. Composition, paragenesis, and alteration of the chevkinite group of minerals. *Amer. Miner.* **2019**. Vol. 104. P. 348—369.

Macdonald R., Bagiński B., Kartashov P.M., Zozulya D., Dzierżanowski P., Jokubauskas P. Hydrothermal alteration of a chevkinite-group mineral to a bastnäsite-(Ce)-ilmenite- columbite-(Fe) assemblage: interaction with a F-, CO₂-rich fluid. *Miner. Petrol.* **2015**. Vol. 109. N 6. P. 659—678.

Macdonald R., Belkin H.E. Compositional variation in minerals of the chevkinite group. *Miner. Mag.* **2002**. Vol. 66(6). P. 1075—1098.

Muhling J.R., Suvorova A.A., Rasmussen B. The occurrence and composition of chevkinite-(Ce) and perrierite-(Ce) in tholeiitic intrusive rocks and lunar mare basalt. *Amer. Miner.* **2014**. Vol. 99. P. 1911—1921.

Nosova A.A., Sazonova L.V., Kargin A.V., Larionova Yu.O., Gorozhanin V.M., Kovalev S.G. Mesoproterozoic intraplate igneous province of the Western Urals: main petrogenetic types of rocks and their origin. *Petrology*. **2012**. Vol. 20. N 4. P. 392—428 (*in Russian*).

Sazonova L.V., Nosova A.A., Larionova Yu.O., Kargin A.V., Kovalev S.G. Mesoproterozoic picrites of the eastern margin of the East European Platform and the Bashkirian meganticlinorium: petrogenesis and compositional features of olivine and clinopyroxene. *Litosfera*. **2011**. N 3. P. 64—83 (*in Russian*).

Spiridonov E.M., Filimonov S.V., Semikolennyh E.S., Korotaeva N.N., Krivitskaya N.N. Chevkinite-(Ce) and perrierite-(Ce) from island-arc quartz gabbro-norite-dolerites of the Ayu-Dag intrusion, Mountainous Crimea. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2019**. Vol. 148. N 4. P. 61—79 (*in Russian*).

Troll V.R., Sachs P.M., Schmincke H.U., Sumita M. The REE-Ti mineral chevkinite in comenditic magmas from Gran Canaria, Spain: a SYXRF-probe study. *Contrib. Miner. Petrol.* **2003**. Vol. 145. P. 730—741.

Vlach S.R.F., Gualda G.A.R. Allanite and chevkinite in A-type granites and syenites of the Graciosa Province, southern Brazil. *Lithos*. **2007**. Vol. 97. P. 98—121.