

Научная статья

УДК 551.14

DOI: 10.31084/2619-0087/2024-3-8

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АМФИБОЛОВ ИЗ МАНТИЙНЫХ ПЕРИДОТИТОВ ЛЕРЦОЛИТОВЫХ МАССИВОВ УРАЛА

Т. Д. Шабутдинов¹, Д. Е. Савельев², А. А. Самигуллин³, Р. А. Гатауллин⁴

Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, г. Уфа, Россия

1 — timurgeolog11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-2346-1835>

2 — savl71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8910-6992>

3 — samigullinaidar85@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3089-0799>

4 — rusgatln97@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3089-0799>

Проведен сравнительный анализ состава амфиболов, которые присутствуют в ультрамафитах мантийных разрезов двух офиолитовых комплексов Урала — Крака и Сыум-Кеу, которые часто относят к «массивам лерцолитового типа». Установлено три морфологических типа выделений амфиболов в перидотитах: 1) относительно крупные ксеноморфные зерна (размером до 100–200 мкм), часто в ассоциации с клинопироксеном; 2) мелкие (25–50 мкм) призматические зерна в периферических частях, либо вблизи порфирукластов ортопироксена, также в ассоциации с мелкими зернами клино- и ортопироксенов и оливина; 3) ламели внутри деформированных зерен ортопироксена, реже — клинопироксена. Четвертый тип выделений представлен субмикронными включениями в рудообразующем хромите. Подавляющее большинство изученных зерен в перидотитах массивов Крака представлено существенно кальциевыми амфиболами, среди которых наиболее часто диагностированы паргасит, магнезиальная роговая обманка и чермакит, очень редко встречается тремолит и эденит. В ультрамафитах массива Сыум-Кеу, напротив, ведущая роль принадлежит эдениту, в единичных случаях отмечается роговая обманка. Составы амфиболов массива Сыум-Кеу довольно компактно концентрируются в поле «корово-мантийного источника», тогда как для составов амфиболов массивов Крака характерен более широкий диапазон значений с преобладанием «мантийной составляющей». Отмеченные различия в составе амфиболов коррелируют с оцененными РТ-условиями образования пород: более высокие температуры и давления характерны для лерцолитов Крака (граница шпинелевой и плагиоклазовой фации верхнемантийного источника), перидотиты Сыум-Кеу, вероятно, были перекристаллизованы в условиях нижней части земной коры.

Ключевые слова: амфиболы, офиолиты, ультрамафиты, лерцолиты, метаморфизм, Крака, Сыум-Кеу

Благодарности: Исследования выполнены за счёт гранта РФ № 22–17–00019.

Для цитирования: Шабутдинов Т. Д., Савельев Д. Е., Самигуллин А. А., Гатауллин Р. А. Сравнительный анализ амфиболов из мантийных перидотитов лерцолитовых массивов Урала // Геологический вестник. 2024. № 3. С. 77–87. DOI: 10.31084/2619-0087/2024-3-8

For citation: Shabutdinov T. D., Saveliev D. E., Samigullin A. A., Gataullin R. A. (2024) Comparative analysis of amphiboles from upper mantle peridotites of lherzolite massifs of the Urals. *Geologicheskii vestnik*. 2024. No. 3. P. 77–87. DOI: 10.31084/2619-0087/2024-3-8

© Т. Д. Шабутдинов, Д. Е. Савельев, А. А. Самигуллин, Р. А. Гатауллин, 2024

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF AMPHIBOLES FROM UPPER MANTLE PERIDOTITES OF LHERZOLITE MASSIFS OF THE URALS

T. D. Shabutdinov¹, D. E. Saveliev², A. A. Samigullin³, R. A. Gataullin⁴

Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia,

1 — timurgeolog11@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-2346-1835>

2 — savl71@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8910-6992>

3 — samigullinaidar85@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3089-0799>

4 — rusgatln97@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9839-4719>

A comparative analysis of the composition of amphiboles from ultramafic rocks of mantle sections of two ophiolite complexes of the Urals — Kraka and Syum-Keu, which are often referred to as «lherzolite-type massifs» is carried out. Three morphological types of amphibole segregations in peridotites are recognized: 1) anhedral grains (up to 100–200 μm in size), often in association with clinopyroxene; 2) small prismatic grains (25–50 μm) in the peripheral parts or close to orthopyroxene porphyroclasts, also in association with small Opx, Cpx or Ol grains; 3) lamellae inside deformed grains of orthopyroxene, less often — clinopyroxene. The fourth amphibole type is represented by submicron inclusions in ore-forming chromite. The vast majority of the studied grains in the Kraka peridotites are represented by essentially calcium amphiboles, among which the most frequently diagnosed are pargasite, magnesian hornblende and tschermakite; tremolite and edenite are very rare. In the ultramafic rocks of the Syum-Keu massif, on the contrary, the leading role belongs to edenite, in isolated cases hornblende is noted. The compositions of the amphiboles of the Syum-Keu massif are quite densely concentrated in the field of the «crust-mantle source», whereas for the compositions of the amphiboles of the Kraka massifs, a more significant range of values with a predominance of the «mantle component» is characteristic. The noted differences in the composition of amphiboles correlate with the estimated PT conditions of rock formation: higher temperatures and pressures are characteristic of the Kraka lherzolites (the boundary of the spinel and plagioclase facies of the upper mantle source), the Syum-Keu peridotites were probably recrystallized under the conditions of the lower part of the earth's crust.

Keywords: amphibole, ophiolite, ultramafic rocks, lherzolite, metamorphism, Kraka, Syum-Keu

Acknowledgements: The study was carried out within RSF project № 22–17–00019

Введение

Амфиболы, являясь одними из самых распространенных минералов земной коры, довольно часто встречаются в мантийных разрезах офиолитовых комплексов как минералы, сохраняющие информацию о глубинных процессах, в частности, частичном плавлении и деформационно-индуцированном распаде пироксенов [Савельев и др., 2017], дифференциации, контаминации и дегазации расплавов мантийного происхождения [Browne, Gardner, 2006; Erdmann et al., 2014], а также более позднем наложенном метаморфизме в коровых условиях. В отличие от номинально безводных порообразующих минералов мантийных ультрамафитов (оливина, орто- и клинопироксена), для амфиболов характерен более широкий диапазон состава, чувствительный к изменяющимся внеш-

ним условиям и различным петрогенетическим процессам, в которых данный минерал может кристаллизоваться.

В настоящей работе акцент сделан на изучении амфиболов, присутствующих в ультрамафитах офиолитовых массивов Урала с так называемым «лерцолитовым» типом разреза [Nicolas et al., 1971; Савельева, 1987]. Основными объектами для исследований были выбраны два наиболее крупных массива Кракинского комплекса (Северный и Южный) и массив Сыум-Кеу, расположенные соответственно на Южном и Полярном Урале (рис. 1). Для упомянутых массивов предполагаются различные обстановки формирования. В частности, В. Н. Пучков и Г. Н. Савельева выделяют Сыум-Кеу и остальные полярноуральские массивы (Рай-Из, Войкаро-Сыньинский) в группу надсубдукционных офиолитов, сформировавшихся

в задуговых и междуговых окраинных бассейнах в ранне-среднепалеозойское время, тогда как Крака прошли более простую эволюционную историю с сохранением более примитивных пород верхней мантии, быстро поднятых в рифтогенной обстановке [Савельева, 1987; Пучков, 2010].

Целью настоящей работы является определение процессов, ответственных за образование амфиболов в ультрамафитовых массивах Урала с лерцолитовым типом разреза, и восстановление условий формирования пород на основе изучения химического состава значительной выборки амфиболов из лерцолитов, гарцбургитов и хромититов.

Методика исследований

Изучение амфиболов выполнено из образцов ультрамафитов, отобранных в ходе полевых работ 2016–2023 гг. Основными камеральными методами изучения являлись стандартные петрографический и минераграфический методы (поляризационный микроскоп ПОЛАМ Р-311), химический анализ пород на петрогенные оксиды проведен силикатным методом в ИГ УФИЦ РАН, аналитик С. А. Ягудина).

Электронно-микроскопические исследования и изучение состава минералов проводились в полированных шлифах и шашках на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 4 Compact с энерго-дисперсионным анализатором Xplorer 15 Oxford Instruments (ИГ УФИЦ РАН, Уфа). Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с использованием методики TrueQ. При съемке использованы следующие установки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда в диапазоне 3–4 нА, время накопления спектра в точке 60 секунд в режиме «Point&ID».

Всего из 21 образца ультрамафитов получен 81 анализ амфиболов. Формулы амфиболов рассчитаны на 23 атома кислорода по методу, изложенному в работе [Leake et al., 1997]. На основе имеющихся спектров химического состава для амфиболов были построены классификационные и дискриминантные диаграммы по [Kamali et al., 2020; Czamanske et al., 1973; Ernst et al., 1998; Anderson, 1996; Changuy, Sanyuan, 1984], для которых рассчитывались основные геохимические характеристики ((Na+K), Al^{IV} и др.), исходя из «формульных коэффициентов» (ф.к.).



Рис. 1. Местоположение изученных массивов в структуре Урала

Основные обозначения: А — Предуральский краевой прогиб, Б — Западноуральская мегазона, В — Центральноуральская мегазона, Г — Тагило-Магнитогорская мегазона, Д — Восточноуральская мегазона, Е — Зауральская мегазона [Пучков, 2010].

Fig. 1. Studied massifs localization in the Urals

Legend: А — Pre-Ural foredeep, Б — West Ural megazone, В — Central Ural megazone, Г — Tagil-Magnitogorsk megazone, Д — East Ural megazone, Е — Trans-Ural megazone [Puchkov, 2010]

Результаты

Массивы Крака расположены южнее г. Белорецк, протягиваясь в виде цепочки из четырех различающихся по размерам и морфологии тел более чем на 60 км при ширине до 20 км. Наиболее крупными являются Северный и Южный Крака, но влияние вторичных процессов (серпентинизации) минимально в лерцолитах северной части комплекса. Северный массив характеризуется довольно простым строением: центральная часть представлена преимущественно лерцолитами (оливин 65–70 об. %, ортопироксен 10–25 об. %, клинопироксен 5–10 об. %, хромшпинелид 0.5–3 об. %), среди которых встречаются участки гарцбургитов, а также полосовидные, линзовидные либо столбовобразные тела дунитов. В Южном массиве также

распространены лерцолиты, но существенно выше здесь становится роль гарцбургитов и дунитов [Сначев и др., 2001; Савельев и др., 2008].

Массив Сьум-Кеу, являясь самым северным представителем полярноуральской группы офиолитов, расположен в зоне Главного Уральского разлома (ГУР) на Полярном Урале. Он протягивается в длину до 60 км при ширине до 12 км и занимает площадь 600 км². Массив с севера на юг представлен пятью блоками: Щучинским, Няропейским, Пусьерским, Сьумкеуским и Харчерузьским [Шмелёв, 1991; Макеев, Брянчанинова, 1999; Гурская и др., 2004]. В его строении с запада на восток выделяются следующие комплексы пород: лерцолит-гарцбургитовый, дунит-гарцбургитовый, дунит-верлит-пироксенитовый (полосчатый) [Шмелев, 1991].

В массивах Крака амфиболы чаще всего встречаются в лерцолитах, реже — в гарцбургитах, еще реже присутствуют в виде включений в зернах

рудобразующего хромита в хромититах. В лерцолитах для них характерны три основные формы выделения: 1) относительно крупные ксеноморфные зерна (размером до 100–200 мкм), часто в ассоциации с клинопироксеном (рис. 2а); 2) мелкие (25–50 мкм) призматические зерна в периферических частях, либо вблизи порфирокластов ортопироксена (см. рис. 2б), также в ассоциации с мелкими зернами клино- и ортопироксенов и оливина (см. рис. 2в); 3) ламели внутри деформированных зерен ортопироксена, реже — клинопироксена. В хромититах встречаются только мелкие включения амфибола идиоморфных либо изометричных очертаний (см. рис. 2 г). В перидотитах массива Сьум-Кеу также распространены указанные выше формы выделения, но отличительной особенностью является преобладание относительно крупных призматических зерен в основной массе породы (см. рис. 2д, 2е).

По химическому составу, согласно классификации [Leake et al., 1997], изученные амфиболы

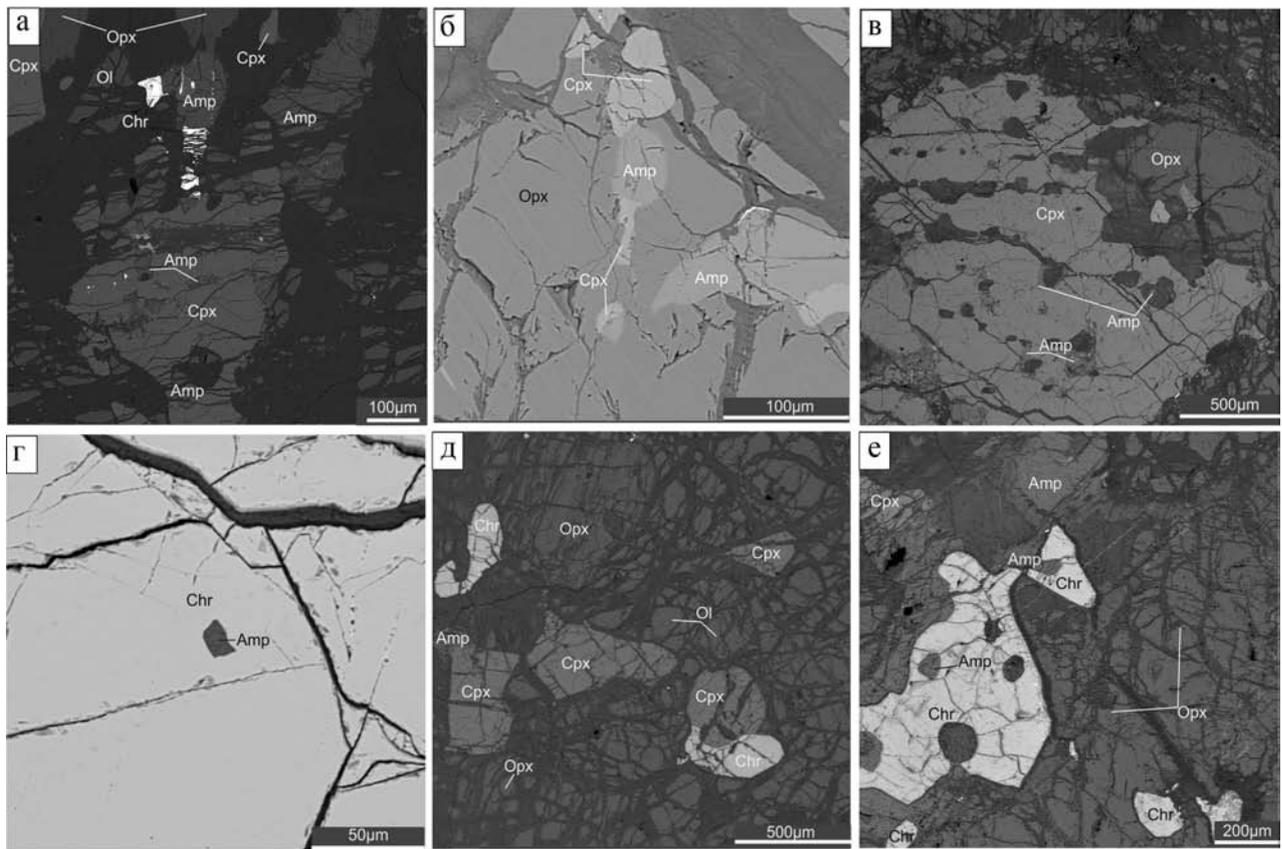


Рис. 2. BSE-изображения амфиболов в ультрамафитах и хромититах лерцолитовых массивов Урала

Условные обозначения: а — г — Крака (а — Сек-2153, б — ЮК — 2331, в — Сек-2183, г — ЮК — 2346); д, е — Сьум-Кеу (д — S-328, е — S-337-1). Amp — амфиболы; Chr — хромшпинелиды; Срх — клинопироксены; Ол — оливин; Орх — ортопироксен.

Fig. 2. BSE-images of amphibole grains in ultramafic rocks and chromitites of lherzolite-type massifs of Urals

Legend: а — г — Kraka (а — Сек-2153, б — ЮК — 2331, в — Сек-2183, г — ЮК — 2346); д, е — Syum-Keu (д — S-328, е — S-337-1). Amp — amphibole; Chr — Cr-spinel; Срх — clinopyroxene; Ол — olivine; Орх — orthopyroxene.

относятся к чермакиту ($\text{Ca}_2(\text{Mg}_3\text{AlFe}^{3+})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), магнезиальной роговой обманке ($\text{Ca}_2[\text{Mg}_4(\text{Al,Fe}^{3+})\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2]$), тремолиту ($\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), паргаситу ($\text{NaCa}_2(\text{Mg}_4\text{Al})\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) и эдениту ($\text{NaCa}_2\text{Mg}_5\text{Si}_7\text{AlO}_{22}(\text{OH})_2$) (рис. 3а, 3б). На диаграмме $\text{Al}^{\text{IV}}-(\text{Na}+\text{K})$ [Kamali et al., 2020] большая часть анализов из образцов Северного Крака попадает в поле роговой обманки. В других массивах состав амфиболов смещается в сторону поля паргасита (см. рис. 3в).

Представительные анализы изученных зерен амфиболов даны в таблице 1. За исключением образца Сек-1778-1 основные компоненты в амфиболах по содержанию варьируют в следующих пределах (мас. %): SiO_2 41.81–48.39, TiO_2 0.29–1.0, Al_2O_3 8.04–14.57, FeO 2.41–4.01, MgO 17.77–20.43, CaO 10.73–13.10, Na_2O 1.09–3.78, K_2O 0.02–2.74, Cr_2O_3 0.98–2.74. Концентрации MnO , F и Cl ниже пределов обнаружения ЭДС. Магнезиальность $\text{Mg}\#$ ($\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$) амфиболов возрастает от 0.89 в вебстеритах Северного Крака до 0.97 в хромититах Южного Крака, среднее значение составляет 0.92.

Составы амфиболов из перидотитов массива Сьум-Кеу на некоторых диаграммах выделяются

в обособленные поля. Почти все анализы демонстрируют низкую щелочность $(\text{Na}+\text{K}) < 0.5$, а на соответствующей классификационной диаграмме (см. рис. 3б) они попадают в поле эденита, отделяясь от низкощелочных амфиболов массивов Крака, локализованных в поле паргасита. Аналогичное разделение наблюдается и на диаграмме рис. 3в. При рассмотрении всей выборки изученных зерен амфиболов, отмечаются довольно отчетливые обратные корреляционные зависимости значений формульных коэффициентов в парах $\text{Si} - \text{Na}$, $\text{Si} - \text{Ti}$, $\text{Al} - \text{Mg}\#$ (рис. 4).

Обсуждение и выводы

Рассмотренные выше геохимические особенности амфиболов из разных массивов позволяют сделать некоторые обобщения относительно их генезиса, используя дискриминантные диаграммы [Czamanske, Wones, 1973; Ernst, Liu, 1998] (рис. 5). Здесь мы видим, что анализы амфиболов из перидотитов Сьум-Кеу также отделяются от таковых массивов Крака, попадая на одной из диаграмм в поле «метаморфических» (см. рис. 5а). В дру-

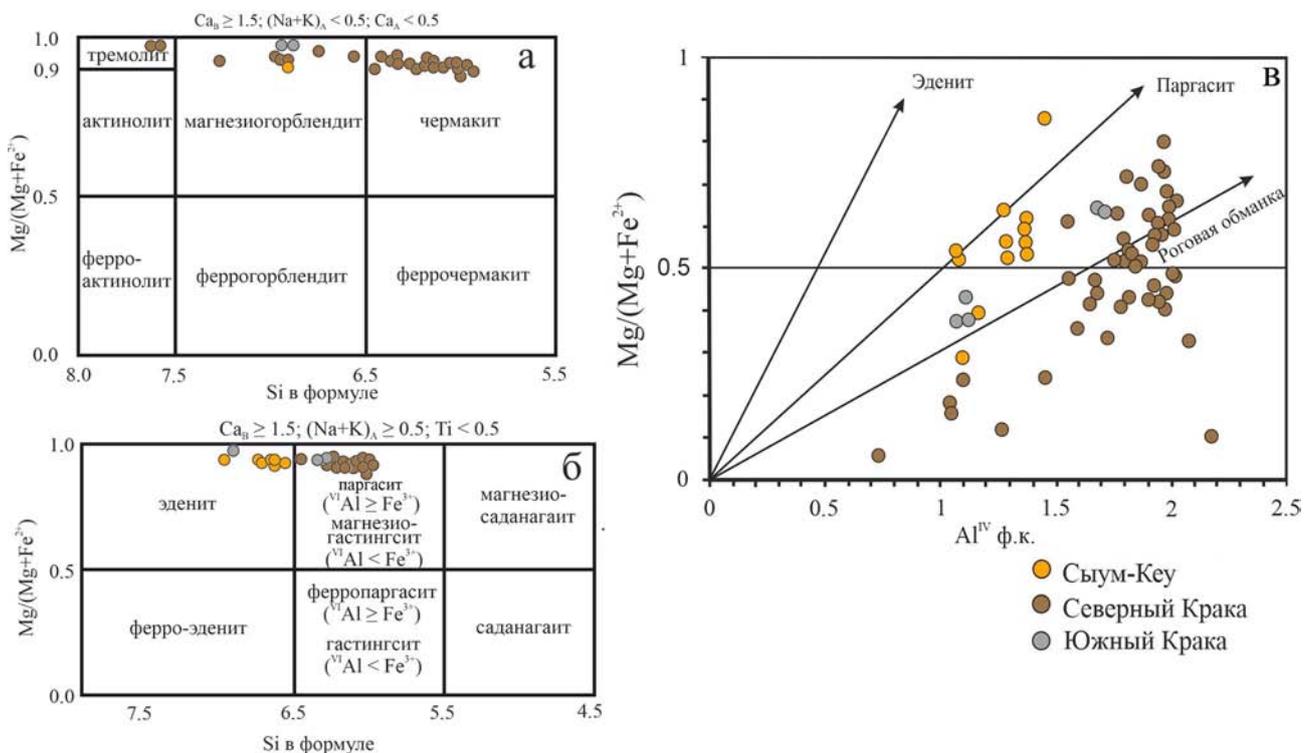


Рис. 3. Особенности химического состава амфиболов

Условные обозначения: а, б — классификационные диаграммы $\text{Si} - \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ [Leake et al., 1997]; в — [Kamali et al., 2020]

Fig. 3. Compositional features of studied amphibole grains

Legend: а, б — classification diagram $\text{Si} - \text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ [Leake et al., 1997]; в — [Kamali et al., 2020]

Таблица 1. Химический состав некоторых зерен амфиболов (мас. %)
Table 1. Composition of selected amphibole grains (wt. %)

№ п/п	S-328	S-337-1	Сек-1776	Сек-1751	Сек-1778-1	Сек-2196-4	Сек-2185	Сек-2153	ЮК-2331
SiO ₂	47.35	48.39	46.36	43.65	52.71	41.83	41.81	42.7	44.69
TiO ₂	0.29	0.52	0.84	0.5	0.05	0.8	1	0.85	0.83
Al ₂ O ₃	8.04	9.9	10.35	13.76	5.01	13.93	14.57	14.3	12.45
FeO	3.07	2.69	2.41	2.7	2.57	4.01	2.95	3.76	2.45
MgO	19.21	20.11	20.43	19.02	22.12	17.77	18.02	19.49	18.76
CaO	12.61	13.1	11.67	11.96	12.43	11.42	11.05	10.73	12.47
Na ₂ O	1.09	2.32	2.26	3.29	0.74	2.8	3.78	2.77	2.72
K ₂ O	-	-	0.02	-	-	-	-	0.03	-
Cr ₂ O ₃	0.98	1.19	2.11	2.1	0.49	1.59	1.43	1.45	2.74
Сумма	92.78	98.21	96.58	96.98	96.13	94.16	94.61	96.08	97.14
Формульные коэффициенты (ф.к./a.p.f.u)									
Si	6.91	6.72	6.46	6.13	7.28	6.05	6.03	5.92	6.3
Ti	0.03	0.05	0.09	0.05	0	0.09	0.11	0.09	0.09
Al ^{IV}	1.09	1.28	1.54	1.87	0.72	1.95	1.97	2.08	1.7
Al ^{VI}	0.3	0.34	0.16	0.41	0.09	0.42	0.5	0.27	0.37
Fe	0.37	0.31	0.28	0.32	0.3	0.48	0.36	0.44	0.29
Mg	4.18	4.16	4.24	3.99	4.55	3.83	3.87	4.05	3.95
Ca	1.98	1.95	1.74	1.8	1.84	1.77	1.71	1.61	1.89
Na	0.31	0.63	0.61	0.9	0.2	0.79	1.06	0.75	0.74
K	-	-	0.01	-	-	-	-	0.01	-
Cr	0.11	0.13	0.23	0.23	0.05	0.18	0.16	0.16	0.31
К	15.28	15.58	15.35	15.7	15.03	15.56	15.78	15.37	15.64

Примечание. Прочерк — ниже предела обнаружения
Note: Dash means below of detection limit

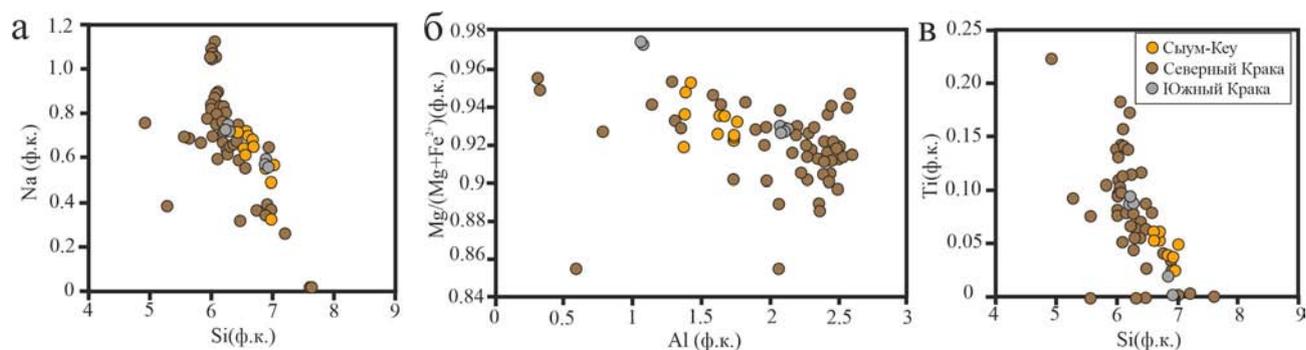


Рис. 4. Корреляционные зависимости между некоторыми элементами в изученных амфиболов

Условные обозначения: а — Si — Na; б — Al — Mg#, в — Si — Ti (все — в формульных коэффициентах, ф.к.).

Fig. 4. Correlation relationships between some elements in the studied amphiboles

Legend: а — Si — Na; б — Al — Mg#, в — Si — Ti (all — in a.p.f.u.).

гом случае их составы концентрируются вблизи границы «магматических» и «метаморфических» амфиболов (см. рис. 5б).

С другой стороны, довольно отчетливо эти диаграммы показывают, что амфиболы из перидотитов массива Северный Крак представляют собой «магматическую фацию», лишь несколько их точек не попадают в соответствующие поля. Неоднозначное расположение фигуративных точек амфиболов из массива Южный Крак может быть связано главным образом с небольшим количеством проанализированных зерен, второстепенной причиной является попадание в эту выборку амфиболов из включений в хромититах. На диаграмме $Al^{IV} - Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ фигуративные

точки амфиболов всех массивов попадают в поле составов, характеризующихся образованием в условиях относительно высокой фугитивности кислорода (см. рис. 5в). В то же время, необходимо отметить, что использование данной диаграммы для высокомагнезиальных сред, каковыми являются мантийные перидотиты, вряд ли является информативным.

Различие в изученных составах амфиболов отражено на диаграмме $Al_2O_3 - TiO_2$ (см. рис. 5 г), где составы амфиболов массива Сьум-Кеу довольно компактно концентрируются в поле «корово-мантийного источника», тогда как для составов амфиболов массивов Крак характерен более широкий диапазон значений с преобладанием «мантийной

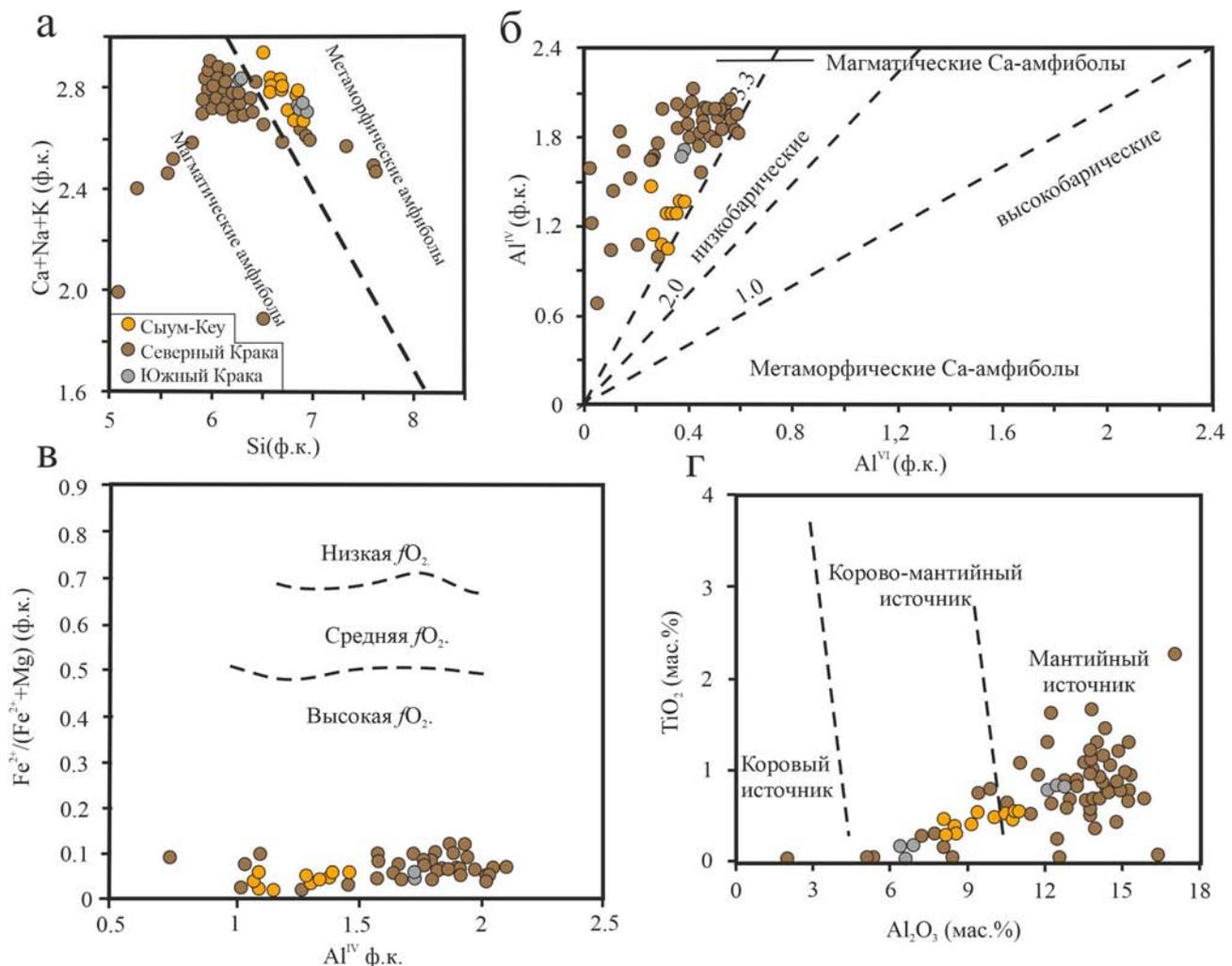


Рис. 5. Дискриминантные диаграммы для Са-амфиболов

Условные обозначения: а — Si — Ca+Na+K в ф.к. по [Czamanske, Wones, 1973]; б — Al^{VI} — Al^{IV} в ф.к. по [Ernst, Liu, 1998]; в — Si — Ti; в — Al^{IV} — $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$ в ф.к. по [Anderson, 1996]; г — Al_2O_3 — TiO_2 в мас. % по [Changyi, Sanyuan, 1984].

Fig. 5. Discrimination diagrams for Ca-amphiboles

Legend: а — Si — Ca+Na+K, in a.p.f.u. after [Czamanske, Wones, 1973]; б — Al^{VI} — Al^{IV} , a.p.f.u., after [Ernst, Liu, 1998]; в — Si — Ti; в — Al^{IV} — $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg)$, a.p.f.u., after [Anderson, 1996]; г — Al_2O_3 — TiO_2 in wt. %, after [Changyi, Sanyuan, 1984].

составляющей», хотя незначительная часть анализов и попадает в «корово-мантийное» поле (см. рис. 5 г). Наблюдаемое различие в химическом составе и генезисе амфиболов Крака и Сыум-Кеу, по-видимому, связано с разными условиями формирования массивов в процессе их подъема из верхней мантии и последующего наложенного корового метаморфизма. На это указывает повышенное содержание железа в хромшпинелидах Сыум-Кеу с наблюдаемым Fe трендом на тройной диаграмме для трехвалентных катионов [Макеев,

Брянчанинова, 1999; Перевозчиков и др., 2007; Шабутдинов, Савельев, 2024] и образование по ультрамафитам высокотемпературного серпентина, вплоть до полного замещения породообразующих минералов антигоритом [Шмелёв, 1991; Гурская и др., 2004].

Отмеченные различия в составе амфиболов массивов, относимых к единому («лерцолитовому») типу, также коррелируют с данными по составам сосуществующих клино- и ортопироксенов из тех же перидотитов, и с оцененными по их составам

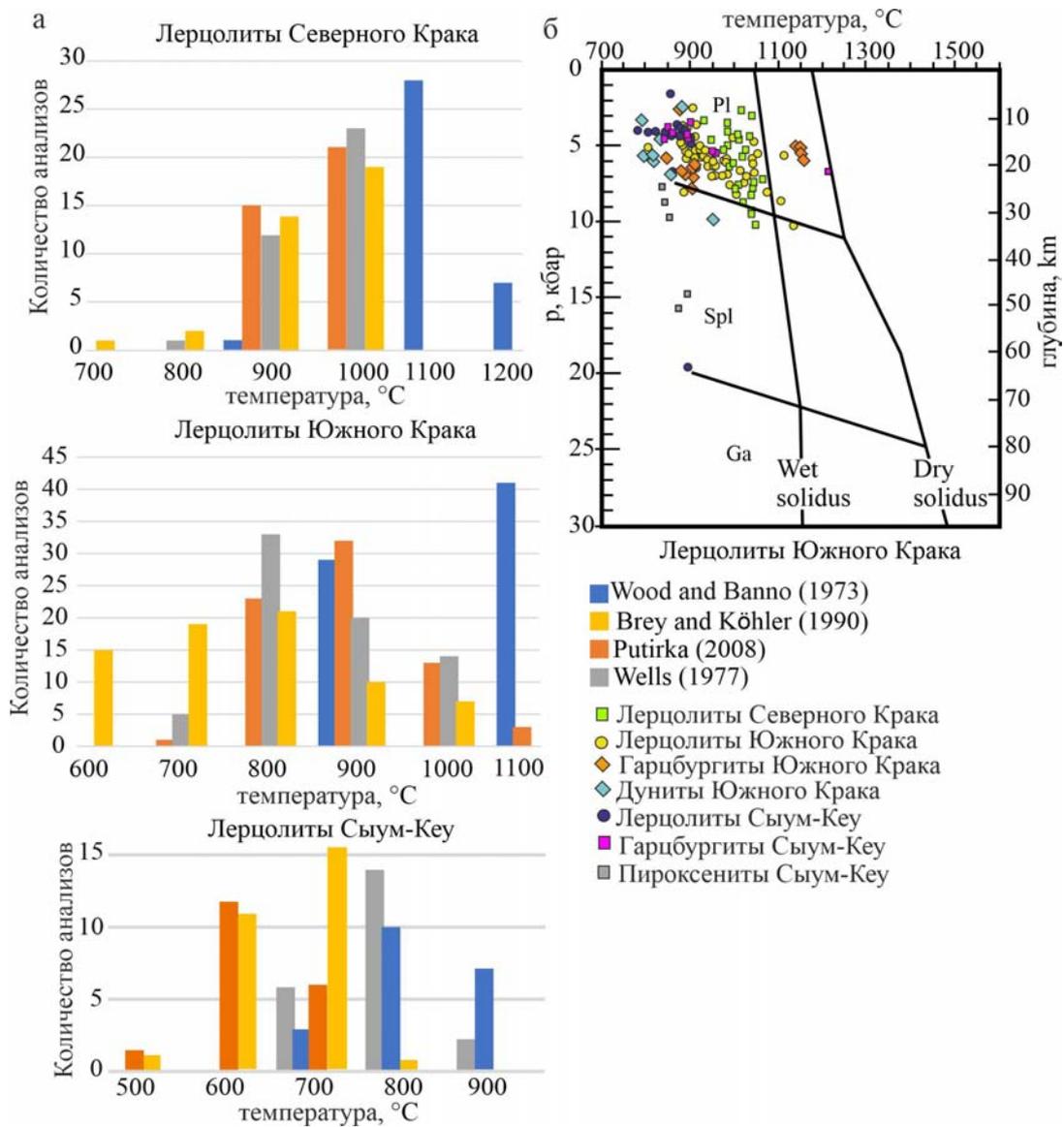


Рис. 6. Сравнение P — T условий формирования ультрамафитов изученных массивов Урала

Условные обозначения: а — двухпироксеновые геотермометры по [Wood, Banno, 1973; Wells, 1977; Brey, Köhler, 1990; Putirka, 2008]; б — P-T диаграмма для мантийных перидотитов, поля проведены по данным работ [Pulliam, 1999; Putirka, 2008]

Fig. 6. Comparison of P — T formation conditions for studied ultramafic rocks of Uralian massifs

Legend: а — histogram for Opx-Cpx geothermometers according to [Wood, Banno, 1973; Wells, 1977; Brey, Köhler, 1990; Putirka, 2008]; б — P-T diagram for upper mantle peridotites, fields after [Pulliam, 1999; Putirka, 2008]

величинами равновесных температур и давлений (см. рис. 6), которые рассчитывались по различным версиям геотермометров и геобарометров [Wells, 1977; Wood, Banno, 1973; Brey, Kohler, 1990; Putirka, 2008]. Фигуративные точки, характеризующие РТ-условия образования лерцолитов массивов Крака, образуют компактный рой внутри поля плагиоклазовой фации, в непосредственной близости к границе ее со шпинелевой фацией перидотитов верхней мантии, в области давлений 3–10 кбар и температур 870–1100 °С. В область более низких температур отклоняются точки дунитов и гарцбургитов, часть точек гарцбургитов также отклоняется в область более высоких температур. В отличие от пироксеновых пар перидотитов Крака, таковые из Сыум-Кеу демонстрируют значения более низких температур (730–900 °С) и давлений (3–5 кбар), исключение составляют единичные анализы пироксенитов, демонстрирующих высокое давление (до 10 кбар).

Таким образом, проведенные исследования показали, что амфиболы в лерцолитовых массивах Крака и Сыум-Кеу отличаются по химическому составу и генезису. Это отражено на дискриминантных и классификационных диаграммах. Амфиболы из Сыум-Кеу вероятно образовались в ходе корового метаморфизма в процессе становления массива. Для массивов Крака значения на дискриминантных диаграммах попадают в поле «магматических» амфиболов и «мантийного источника». Это, по-видимому, свидетельствует об их образовании на уровне верхней мантии в процессах, связанных с деформационным распадом пироксенов и последующим частичным плавлением.

Список литературы

- Гурская Л.И., Смелова Л.В., Колбанцев Л.Р., Ляхницкая В.Д., Ляхницкий Ю.С., Шахов С.Н. Платиноиды хромитоносных массивов Полярного Урала. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2004. 306 с.
- Макеев А.Б., Брянчанинова Н.И. Топоминералогия ультрабазитов Полярного Урала. С.Пб.: Наука, 1999. 252 с.
- Перевозчиков Б.В., Плотников А.В., Макиев Т.Т. Природа вариаций состава рудной и аксессуарной хромшпинели ультрабазитового массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 4. С. 32–39.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Савельев Д.Е., Сначев В.И., Савельева Е.Н., Бажин Е.А. Геология, петрогеохимия и хромитоносность габбро-гипербазитовых массивов Южного Урала. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2008. 320 с.
- Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Сергеев С.Н., Мусабиров И.И. О деформационно-индуцированном распаде энстатита в мантийных перидотитах и его значении для процессов частичного плавления и хромитообразования // Доклады академии наук. 2017. Т. 476. № 2. С. 1–5.
- Савельева Г.Н. Габбро-ультрабазитовые комплексы офиолитов Урала и их аналоги в современной океанической коре. М.: Наука, 1987. 246 с.
- Сначев В.И., Савельев Д.Е., Рыкус М.В. Петрогеохимические особенности пород и руд габбро-гипербазитовых массивов Крака. Уфа, 2001. 212 с.
- Шабутдинов Т.Д., Савельев Д.Е. Минералогическо-геохимические особенности и условия формирования ультрамафитов массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2024. № 2. С. 20–31. DOI: 10.24412/1728-5283-2024-2-20-31
- Шмелев В.Р. Гипербазиты массива Сыум-Кеу (Полярный Урал): структура, петрология, динамометаморфизм. Препринт. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 80 с.
- Anderson J.L. Status of thermobarometry in granitic batholiths // Transactions of Royal Society of Edinburgh Earth Sciences. 1996. V. 87. P. 125–38.
- Brey G.P., Köhler T. Geothermobarometry in 4-phase lherzolites: 2. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers // Journal of Petrology. 1990. V. 31. P. 1353–1378.
- Browne B.L., Gardner J.E. The influence of magma ascent path on the texture, mineralogy and formation of hornblende reaction rims // Earth Planetary Science Letters. 2006. V. 246. P.161–176.
- Changyi J., Sanyuan A. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance // Journal of Mineralogy and Petrology. 1984. V. 3. P. 1–9.
- Czamanske G.K., Wones D.R. Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarks Complex, Oslo Area, Norway: Part 2, the mafic silicate // Journal of Petrology. 1973. V. 14 (3). P. 349–380.
- Erdmann S., Martel C., Pichavant M., Kushnir A. Amphibole as an archivist of magmatic crystallization conditions: problems, potential, and implications for inferring magma storage prior to the paroxysmal 2010 eruption of Mount Merapi, Indonesia // Contribution to Mineralogy and Petrology. 2014. V. 167. P. 1016.
- Ernst W.G., Liu J. Experimental Phase-Equilibrium Study of Al- and Ti-contents of Calcic Amphibole in MORB — A Semiquantitative Thermobarometer // American Mineralogist. 1998. V. 83. P. 952–969.
- Pulliam, J. The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution, Eos Trans // AGU, 1999, V. 80 (11), 566 p.
- Kamali A.A., Moayyed M., Amel N., Mohammad F., Brenna M., Saumur B.M., Santos J.F. Mineralogy, mineral chemistry and thermobarometry of postmineralization dykes of the Sungun Cu — Mo porphyry deposit (Northwest Iran) // Open Geoscience. 2020. V. 12 (1). P. 764–790.

Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne W. C., Kato A., Kisch K. J., Krivovichev V. G., Lithout K., Laird J., Mandarino J. A., Maresch W. V., Nickel E. A., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Youzhi G. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association commission on new minerals and mineral names // *Canadian Mineralogist*. 1997. V. 35. P. 219–246.

Nicolas A., Bouchez J. L., Boudier F., Mercier J. C. Textures, structures and fabrics due to solid state flow in some European lherzolites // *Tectonophysics*. 1971. V. 12. P. 55–86.

Putirka K. D. Thermometers and barometers for volcanic systems // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008. V. 69. P. 61–120.

Wells P. R. A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1977. V. 62. P. 129–139.

Wood B. J., Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems // *Contr. Mineral. Petrol.* 1973. V. 42. P. 109–124.

References

Gurskaya L. I., Smelova L. V., Kolbantsev L. R., Lyakhnitskaya V. D., Lyakhnitsky Yu. S., Shakhov S. N. (2004) *Platinoidy khromitonosnykh massivov Polyarnogo Urala* [Platinum group metals of chromite-bearing massifs of the Polar Urals]. St. Petersburg: Publishing house of the St. Petersburg map factory VSEGEI. 306 p. (In Russian).

Makeyev A. B., Bryanchaninova N. I. (1999) *Topomineralogiya ul'trabazitov Polyarnogo Urala* [Topomineralogy of ultramafic rocks of the Polar Urals]. SPb: Nauka, 252 p. (In Russian).

Perevozchikov B. V., Plotnikov A. V., Makiyev T. T. (2007) The nature of variations in the composition of ore and accessory chrome spinel of the ultramafic massif SyumKeu (Polar Urals). *Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka*. №4. P. 32–39. (In Russian).

Puchkov V. N. (2010) *Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nyye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii)* [Geology of the Urals and the Pre-Urals (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: DesignPoligrafService. 280 p. (In Russian).

Saveliev D. E., Snachev V. I., Savelieva E. N., Bazhin E. A. (2008) *Geologiya, petrogeohimiya i hromitonosnost' gabbro-giperbazitovykh massivov Yuzhnogo Urala* [Geology, petrogeochemistry and chromitosity of gabbro-hyperbasite massifs of the Southern Urals]. Ufa: DesignPoligrafService. 320 p. (in Russian)

Saveliev D. E., Puchkov V. N., Sergeev S. N., Musabirov I. I. (2017) Deformation-induced decomposition of enstatite in mantle peridotite and its role in partial melting and chromite ore formation. *Doklady Earth Sciences*. 476 (2), 200–204. (In Russian).

Savelieva G. N. (1987) *Gabbro-ul'trabazitovyye komplekсы ofiolitov Urala i ikh analogi v sovremennoy okeanicheskoy kore* [Gabbro-ultramafic complexes of Ural ophiolites

and their analogues in the modern oceanic crust]. Moscow: Nauka. 246 p. (In Russian).

Snachev V. I., Saveliev D. E., Rykus M. V. (2001) *Petrogeohimicheskie osobennosti porod i rud gabbro-giperbazitovykh massivov Kraka* [Petrogeochemical features of rocks and ores of gabbro-hyperbasite massifs of Kraka]. Ufa. 212 p. (in Russian).

Shabutdinov T. D., Saveliev D. E. (2024) Mineralogical and geochemical features and conditions for the formation of ultramafic rocks of the Syum-Keu massif (Polar Urals). *Herald of the Academy of Sciences of the Republic of Bashkortostan*. 51 (2), 20–31. DOI: 10.24412/1728-5283-2024-2-20-31 (in Russian).

Shmelev V. R. (1991) *Giperbazity massiva Syum-Keu (Polyarnyy Ural): struktura, petrologiya, dinamometamorfizm* [Ultrabasites of the Syum-Keu massif (Polar Urals): structure, petrology, dynamometamorphism]. Preprint. Sverdlovsk: Ural Branch of the USSR Academy of Sciences. 80 p. (In Russian).

Anderson J. L. (1996) Status of thermobarometry in granitic batholiths. *Transactions of Royal Society of Edinburgh Earth Sciences*. 87, 125–38.

Brey G. P., Köhler T. (1990) Geothermobarometry in 4-phase lherzolites: 2. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*. 31, 1353–1378.

Browne B. L., Gardner J. E. (2006) The influence of magma ascent path on the texture, mineralogy and formation of hornblende reaction rims. *Earth Planetary Science Letters*. 246, 161–176.

Changyi J., Sanyuan A. (1984) On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significance. *Journal of Mineralogy and Petrology*. 3, 1–9.

Czamanske G. K., Wones D. R. (1973) Oxidation during magmatic differentiation, Finnmarks Complex, Oslo Area, Norway: Part 2, the mafic silicate. *Journal of Petrology*. 14 (3), 349–380.

Erdmann S., Martel C., Pichavant M., Kushnir A. (2014) Amphibole as an archivist of magmatic crystallization conditions: problems, potential, and implications for inferring magma storage prior to the paroxysmal 2010 eruption of Mount Merapi, Indonesia. *Contribution Mineralogy and Petrology*. 167, 1016.

Ernst W. G., Liu J. (1998) Experimental Phase-Equilibrium Study of Al- and Ti-contents of Calcic Amphibole in MORB — A Semiquantitative Thermobarometer. *American Mineralogist*. 83, 952–969.

Pulliam, J. (1999) The Earth's Mantle: Composition, Structure, and Evolution, *Eos Trans.* 80 (11). AGU. 566 p.

Kamali A. A., Moayyed M., Amel N., Mohammad F., Brenna M., Saumur B. M., Santos J. F. (2020) Mineralogy, mineral chemistry and thermobarometry of postmineralization dykes of the Sungun Cu — Mo porphyry deposit (Northwest Iran). *Open Geoscience*. 12 (1), 764–790.

Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne W. C., Kato A., Kisch K. J., Krivovichev V. G., Lithout K., Laird J., Mandarino J. A., Maresch W. V., Nickel E. A., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Youzhi G. (1997) Nomenclature of amphiboles; report of the

subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association commission on new minerals and mineral names. *Canadian Mineralogist*. 35, 219–246.

Nicolas A, Bouchez JL, Boudier F, Mercier JC (1971) Textures, structures and fabrics due to solid state flow in some European lherzolites. *Tectonophysics*. 12, 55–86.

Putirka K. D. (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 69, 61–120.

Wells P. R. A. (1977) Pyroxene thermometry in simple and complex systems. *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 62, 129–139.

Wood B. J., Banno S. (1973) Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contr. Mineral. Petrol.* 42, 109–124.

Сведения об авторах:

Шабутдинов Тимур Денисович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. timurgeolog11@gmail.com

Савельев Дмитрий Евгеньевич, доктор геол.-мин. наук. Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. savl71@mail.ru.

Самигуллин Айдар Альфридович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. samigullinaidar85@gmail.com.

Гатауллин Руслан Азатович, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. ruscgatln97@gmail.com.

About the authors:

Shabutdinov Timur Denisovich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS). timurgeolog11@gmail.com

Saveliev Dmitry Evgenievich, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS). savl71@mail.ru

Samigullin Aidar Alfridovich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS). samigullinaidar85@gmail.com

Gataullin Ruslan Azatovich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS). ruscgatln97@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.08.2024; одобрена после рецензирования 03.09.2024; принята к публикации 01.10.2024

The article was submitted 30.08.2024; approved after reviewing 03.09.2024; accepted for publication 01.10.2024