
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

МИНЕРАЛЫ ГРУППЫ ОЛИВИНА В МЕЛИЛИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ ПАРАЛАВАХ ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МОНГОЛИИ

© 2023 г. В. Е. Глушкова^{1, *}, д. чл. И. С. Перетяжко^{1, 2}, Е. А. Савина¹, д. чл. Е. А. Хромова³

¹Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, ул. Фаворского, 1а, Иркутск, 664033 Россия

²Институт земной коры СО РАН, ул. Лермонтова, 128, Иркутск, 664033 Россия

³Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, ул. Сахьянова, 6а, Улан-Удэ, 670047 Россия

*e-mail: glushkova@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 16.10.2022 г.

Принята к публикации 17.10.2022 г.

Охарактеризованы минералы группы оливина из мелилит-нефелиновых паралав, которые формировались в результате термических изменений пород осадочных толщ, вызванных многостадийными современными и четвертичными природными угольными пожарами в пределах двух пирометаморфических комплексов Монголии. В паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид обнаружены продукты распада твердого раствора на кальцийсодержащий фаялит и кирштейнит, а в паралавах Нилгинского комплекса также минералы изоморфных рядов форстерит–фаялит, монтичеллит–кирштейнит и симплектитоподобные сростания кирштейнита с нефелином. Изученные минералы различаются по текстурным особенностям, магнезиальности и температурам кристаллизации, что является следствием локальных вариаций условий образования и состава недосыщенных кремнеземом, обогащенных Са мафических расплавов, исходных для паралав. Минералы монтичеллит–кирштейнитового ряда, содержащие до 86 мол. % минала кирштейнита, встречаются только в паралавах, содержащих ксенолиты термически измененных карбонатно-силикатных осадочных пород. Кристаллизация этих минералов совместно с геленитом происходила в процессе реакционного взаимодействия мафических паралав и ксенолитов мергелистых известняков с большими вариациями содержания примеси силикатного (глинисто-полевошпатового) вещества.

Ключевые слова: кирштейнит, монтичеллит, пирометаморфические комплексы Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид, Монголия

DOI: 10.31857/S0869605523010045, EDN: NFTNHJ

ВВЕДЕНИЕ

В паралавах недавно открытых пирометаморфических комплексах Монголии, Нилгинском (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018) и Хамарин-Хурал-Хид (Савина и др., 2020), обнаружены разные минералы группы оливина. Комплексы сложены пирогенными породами, возникшими в результате полного или частичного плавления пород осадочных толщ во время многостадийных современных и древних (четвертичных) природных угольных пожаров. Частичное плавление аргиллитов, алевролитов и песчаников привело к появлению клинкеров (Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020), а уникальные по минерально-фазовым ассоциациям мелилит-нефелиновые паралавы формировались из недосыщенных по кремнезему и обогащенных Са мафиче-

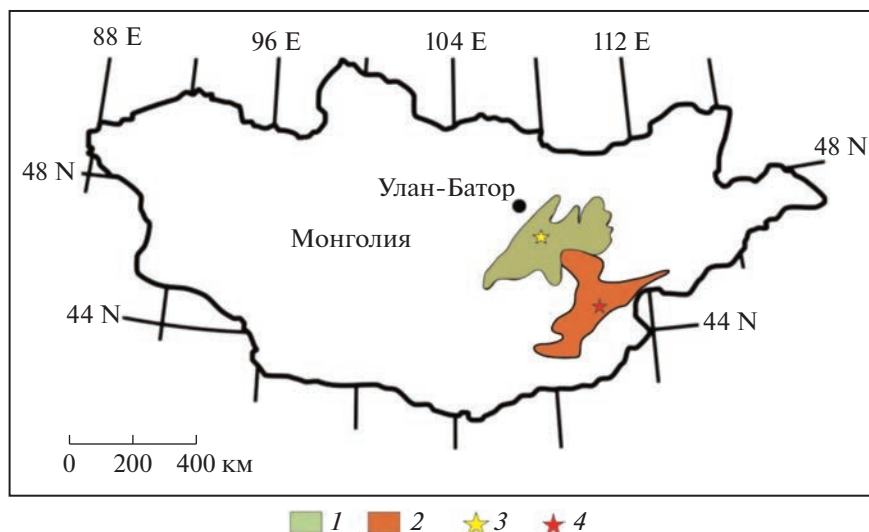


Рис. 1. Угленосные провинции Монголии: (1) Чоир-Нилгинская, (2) Восточно-Монгольская. Пирометаморфические комплексы: (3) Нилгинский, (4) Хамарин-Хурал-Хид.

Fig. 1. Coal-bearing provinces of Mongolia: (1) Choir-Nyalga, (2) Eastern Mongolian. Combustion metamorphic complexes: (3) the Nyalga complex, (4) the Khamaryn-Khural-Khiid complex.

ских расплавов в результате плавления карбонатно-силикатных пород — мергелистых известняков (Peretyazhko et al., 2021).

Минералы группы оливина (далее — оливины), обнаруженные в паралавах, представлены минералами изоморфного ряда форстерит—фаялит, продуктами распада твердого раствора кальцийсодержащего фаялита (Са-фаялита) и кирштейнита, а также промежуточными членами ряда монтичеллит—кирштейнит.

Изучение особенностей состава и условий кристаллизации кирштейнита вызывает особый интерес, поскольку этот редкий минерал найден в породах различного происхождения — метеоритах, магматических, вулканических, метаосадочных, пирометаморфических и техногенных породах. Монтичеллит встречается в кимберлитах, карбонатитах, ультраосновных, щелочных магматических и контактово-метаморфических породах.

В ранее опубликованных материалах, посвященных изучению минерально-фазовых ассоциаций пород пирометаморфических комплексов в Монголии, приводилась краткая характеристика оливинов, преимущественно, Са-фаялита и кирштейнита (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020). Настоящая работа посвящена детальному описанию оливинов Са—Fe—Mg состава из мелилит-нефелиновых паралав и сравнительному анализу текстурных особенностей этих минералов.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Пирометаморфические комплексы Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид находятся на расстоянии около 300 км друг от друга (рис. 1). Пирогенные породы формировались при подземном горении прослоев бурого угля в терригенно-карбонатных осадочных толщах раннемеловой дзунбаинской свиты.

Нилгинский комплекс расположен в пределах Чоир-Нилгинской угленосной провинции Центральной Монголии (Erdenetsogt et al., 2009). В ходе полевых работ 2014—

2015 гг. на площади этого комплекса были впервые обнаружены коренные выходы плавленных пород на трех останцах высотой до 40 м (Корона, Верблюд, Малыш), которые сохранились после эрозии осадочной толщи, вероятно, вблизи эпицентров (очагов горения) четвертичных природных угольных пожаров (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018). Останцы сложены термически измененными осадочными породами (обожженными аргиллитами и алевролитами), которые содержат прожилки и включения, в т. ч. крупные, стекловатого клинкера, образованного “in situ” на месте плавления глинистых пород. Иногда обожженные аргиллиты секутся тонкими жилами мелкозернистых раскристаллизованных мелилит-нефелиновых паралав. На останцах и эродированной поверхности вблизи них площадью около 20 км² встречаются глыбы таких же паралав. Клинкеры и паралавы часто содержат ксенолиты в разной степени пирогенно- измененных осадочных пород.

Комплекс Хамарин-Хурал-Хид расположен в Восточной Монголии. Ранее здесь добывали бурый уголь кустарным способом. В ходе природных угольных пожаров, которые наблюдались в этом районе с XVIII в. (Покровский и др., 1949), обрушений пород над выгоревшими пластами угля и разрушений осадочной толщи временными водотоками, сформировался характерный для современных пирометаморфических комплексов ландшафт “горельников” с протяженными грядами, оврагами и небольшими пещерами. Мощность разрезов пирогенных пород, представленных обожженными аргиллитами, алевролитами и песчаниками, а также стекловатыми клинкерами и мелилит-нефелиновыми паралавами, достигает 15 м.

В обоих комплексах паралавы сложены микрофенокритами плагиоклаза, Al-клинопироксена и мелилита, интерстиции между которыми заполнены нефелином с включениями минералов группы оливина, K-Ва полевых шпатов, шпинели, пирротина и других минералов. Подробные описания геологии пирометаморфических комплексов, пирогенных пород и слагающих их минералов приводятся в работах (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Валовый состав пирогенных пород определялся в ЦКП “Изотопно-геохимических исследований” ИГХ СО РАН (г. Иркутск) рентгенофлуоресцентным методом на многоканальном X-Ray спектрометре СРМ-25. Минералы из пиролав изучались методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной спектроскопии (СЭМ ЭДС) на электронном микроскопе Carl Zeiss LEO-1430VP (LEO Electron Microscopy Ltd.) с системой микроанализа INCA Energy 350 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd.) в Аналитическом центре ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ). Матричные эффекты учитывали по методу XPP, реализованному в программном обеспечении INCA Energy. Анализы минералов проводили в режиме сканирования участков площадью более 10 мкм² при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 0.5 нА и длительности накопления спектров 50 с.

Условия кристаллизации оливинов оценивались с учетом экспериментальных данных (Davidson, Mukhopadhyay, 1984). Кристаллохимические формулы оливина рассчитывались на 4 атома кислорода в программе CRYSTAL (Перетяжко, 1996). Содержания минералов – форстерита (Fo, Mg₂SiO₄), фаялита (Fa, Fe₂SiO₄), кальциооливина (Caol, Ca₂SiO₄), тефроита (Tph, Mn₂SiO₄), кирштейнита (Kir, CaFeSiO₄) и монтчеллита (Mtc, CaMgSiO₄) – в формуле оливина нельзя рассчитать одновременно, поскольку число минералов превышает число катионов (Mn, Fe, Mg, Ca). Поэтому использовались следующие наборы минералов: (1) Fo, Fa, Caol, Tph (при классификации оливинов по диаграмме Caol–Fa–Fo); (2) Fo, Fa, Tph, Kir (для продуктов распада твердого раствора на Са-фаялит и кирштейнит); (3) Fo, Tph, Kir, Mtc (для минералов ряда монтчеллит–

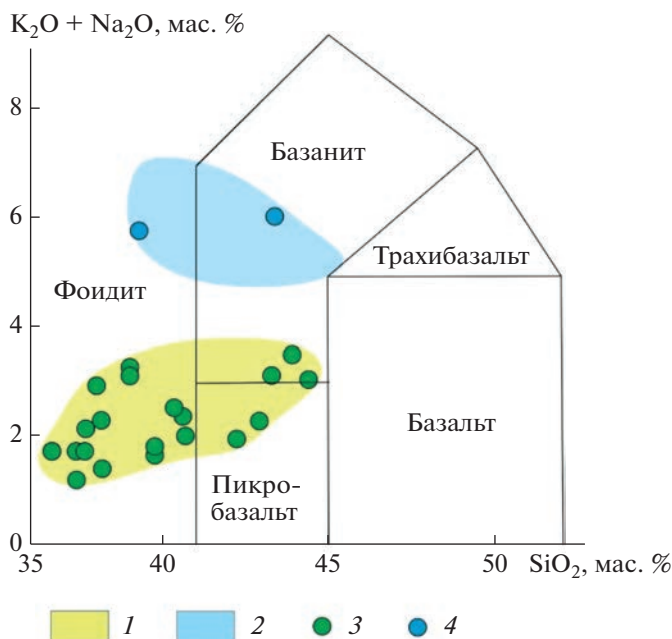


Рис. 2. Фрагмент TAS классификационной диаграммы мелилит-нефелиновых паралав комплексов Нилгинского и Хамарин-Хурал-Хид. Поля составов паралав: (1) Нилгинский комплекс, по (Перетяжко и др., 2018), (2) Хамарин-Хурал-Хид, по (Савина и др., 2020). Точки состава паралав, содержащих оливины: (3) Нилгинский комплекс, (4) Хамарин-Хурал-Хид.

Fig. 2 Fragment of the TAS diagram of melilitite–nepheline paralavas of Nyalga and Khamaryn–Khural–Khiid complexes. Composition fields of paralavas: (1) Nyalga complex, after (Peretyazhko et al., 2018), (2) Khamaryn–Khural–Khiid complex, after (Savina et al., 2020). Composition points of paralavas containing olivines: (3) Nyalga complex, (4) Khamaryn–Khural–Khiid complex.

кирштейнит). При расчетах минерального состава с участием Kgr и Mtc применялся масс-балансовый метод, реализованный в программе CRYSTAL (Перетяжко, 1996).

ВАЛОВЫЙ СОСТАВ ПАРАЛАВ

Ранее был определен химический состав мелилит-нефелиновых паралав, содержащих оливины, из пирометаморфических комплексов Монголии – Нилгинского и Хамарин-Хурал-Хид (Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020). Нормированные к 100% составы паралав без учета летучих компонентов (потери массы при прокаливании проб вследствие выделения H_2O и CO_2) показаны на TAS диаграмме вулканических пород (рис. 2).

Паралавы комплекса Хамарин-Хурал-Хид являются нефелин-содержащими недосыщенными SiO_2 (39–45 мас. %) породами, для которых характерно значительное преобладание Na_2O (4.5–6.5 мас. %) над K_2O (0.3–0.7 мас. %). На TAS диаграмме точки составов паралав находятся в полях базанита и фойдита. В отличие от этих вулканических пород паралавы имеют значительно более высокие концентрации CaO (17–24 мас. %) и Al_2O_3 (18–21 мас. %). Только в двух образцах паралав обнаружен оливин. Валовое содержание SiO_2 в них составляет 39 и 43 мас. % при сумме $Na_2O + K_2O$ 5.8 и

6.2 мас. %. На TAS диаграмме точки этих паралав находятся в полях фойдита (MN-1419) и базанита (MN-1425) (рис. 2).

Паралавы Нилгинского комплекса характеризуются содержаниями SiO_2 37–44 мас. %, CaO 20–26 мас. %, и суммой $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ от 0.8 до 2.3 мас. %. На TAS диаграмме точки их составов лежат в полях фойдита, пикробазальта и базанита. Оливины были обнаружены в 20 образцах паралав, точки состава которых показаны на рис. 2.

Более детальное описание геохимических особенностей и распределений примесных элементов в мелилит-нефелиновых паралавах Монголии приведено в работах (Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020).

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ ОЛИВИНА

В паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид оливины представлены фаялитом, промежуточными членами ряда форстерит–фаялит и продуктами распада твердого раствора на Са-фаялит и кирштейнит. В образце MN-1412 обнаружено единственное зерно форстерита (Fo_{89}). Фаялит (Fa_{74-86}) в образце MN-1368 имеет высокую концентрацию MnO (до 10 мас. %) и содержит до 13.8 мол. % Trh (табл. 1, ан. 1). Оливины (вероятно, продукты распада твердого раствора) образуют выделения размером до 100 мкм, в которых по объемному соотношению Са-фаялит преобладает над кирштейнитом (рис. 3, а, б). Минеральные составы оливинов имеют следующие особенности. Количество CaO изменяется от 7 до 13 мол. % в Са-фаялите и от 35 до 43.5 мол. % в кирштейните, а содержание Fa варьирует в пределах 58–86 и 47–59 мол. % соответственно. При этом в Са-фаялите количество Kig составляет 13.5–23 мол. %, а в кирштейните – 4–17 мол. % Fa (табл. 1, ан. 2–5). Магнезиальность $\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})$ в кирштейните изменяется от 0.07 до 0.22. Минералы содержат примеси MgO (1.8–9.2 мас. %) и MnO (1.6–5.2 мас. %, Trh 2–6 мол. %).

В Нилгинских паралавах оливины встречаются чаще, чем в паралавах Хамарин-Хурал-Хида. В шести образцах (MN-1133, MN-1179, MN-1179-1, MN-1180, MN-1185 и MN-1193) обнаружены микролиты Са-содержащего форстерита (Fo_{85-94}) размером до 200 мкм (табл. 1, ан. 6). Содержание CaO в таком форстерите составляет 2.5–3 мол. %, а в единичных зернах достигает 6.3%. Встречаются обособления зонального строения: наиболее магнезиальный оливин (Fo_{45-50}) слагает центральную часть, средняя зона имеет более железистый состав (Fo_{29-32}), а краевая зона сложена кирштейнитом (рис. 3, в; табл. 1, ан. 7–9). Отдельные зерна состава Fo_{34-39} , содержащие <1 мас. % CaO , обнаружены в образце MN-1177-2 (табл. 1, ан. 10). Встречаются также микролиты (зерна) форстерит-фаялита с концентрацией CaO до 3.7 мас. %.

В Нилгинских паралавах оливины обычно представлены продуктами распада твердого раствора на Са-фаялит и кирштейнит. Эти минералы образуют обособления размером до 200 мкм, в которых по объемному соотношению кирштейнит преобладает над Са-фаялитом (рис. 3, г). Содержания CaO и Fa изменяются в пределах 5–15, 43–86 мол. % в Са-фаялите и 37–45, 34–56 мол. % в кирштейните соответственно (табл. 1, ан. 11–14). Количество Kig в Са-фаялите составляет 6.5–33.5 мол. %, количество Fo в кирштейните – 0–25 мол. %. Иногда кирштейнит образует кайму вокруг Са-фаялита (рис. 3, д). В пределах одного образца паралавы магнезиальность $\text{Mg\#}$ для кирштейнита изменяется от 0.15 до 0.3 и только в единичных анализах достигает 0.55. Количество Trh в таких оливинах составляет 1.5–4 мол. %. Симплектитоподобные сростания кирштейнита, содержащего до 17 мол. % Fa , и нефелина размером до 400 мкм обнаружены в образцах MN-1234, MN-1193, MN-1177-1 и MN-1177-2 (табл. 1, ан. 15, 16, рис. 3, е).

Кальций-магнезиально-железистые оливины в Нилгинских паралавах (обр. MN-1133, MN-1179, MN-1180 и MN-1234-1) представлены монтчеллитом и промежуточными членами ряда монтчеллит–кирштейнит. Выделения таких оливинов неправильной,

Таблица 1. Составы (мас. %) минералов группы оливина из мелилит-нефелиновых паралав комплексов Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид**Table 1.** Compositions (wt %) of olivines from melilite-nepheline paralavas of Nyalga and Khamaryn–Khural–Khiid complexes

Образец	1368	1419		1425		1133	1234		
Анализ	1(28)	2(3)	3(1)	4(11)	5(16)	6(3)	7(2)	8(2)	9(4)
SiO ₂	29.67	30.74	32.41	30.00	30.93	36.50	34.08	32.42	32.33
FeO	60.01	52.24	36.28	57.98	41.32	19.54	38.92	46.67	34.27
MnO	8.60	5.25	3.16	2.74	2.02	0.46	3.71	4.56	3.32
MgO	2.43	7.89	3.02	3.94	1.97	40.68	21.28	12.72	4.57
CaO	—	5.30	25.62	5.78	24.04	3.42	2.86	4.50	25.47
Сумма	100.71	101.42	100.49	100.44	100.28	100.61	100.85	100.87	99.96

Коэффициенты в формулах

Mg	0.120	0.370	0.139	0.191	0.093	1.575	0.915	0.577	0.209
Fe ²⁺	1.667	1.375	0.935	1.578	1.090	0.424	0.939	1.187	0.880
Ca	—	0.179	0.846	0.202	0.812	0.095	0.088	0.147	0.838
Mn	0.242	0.140	0.083	0.076	0.054	0.010	0.091	0.118	0.086
Сумма катионов	2.029	2.065	2.002	2.047	2.049	2.104	2.033	2.028	2.014
Si	0.985	0.968	0.999	0.977	0.976	0.948	0.983	0.986	0.993
Mg#	0.07	0.21	0.13	0.11	0.08	0.79	0.49	0.33	0.19
Caol	0.00	8.66	42.25	9.85	39.65	4.52	4.35	7.23	41.62
Fo	5.93	17.94	6.93	9.34	4.52	74.83	45.01	28.44	10.39
Fa	82.14	66.62	46.70	77.12	53.19	20.16	46.18	58.54	43.71
Tph	11.92	6.78	4.12	3.69	2.64	0.48	4.46	5.79	4.29
Fo	5.53	17.71	6.91	8.98	4.02	77.17	45.35	28.49	10.28
Fa	82.86	59.83	4.46	68.84	13.88	16.46	42.54	52.03	2.11
Tph	11.61	6.19	4.10	3.19	2.09	<0.02	4.12	5.53	4.14
Kir	0.00	16.27	84.54	18.99	80.02	6.38	8.00	13.96	83.47

Таблица 1. Продолжение

Образец	1177-2	1193		1127		1234	1193
Анализ	10 (3)	11(19)	12(15)	13(14)	14(9)	15(2)	16(3)
SiO ₂	33.07	31.59	30.45	30.98	31.70	32.58	32.17
FeO	49.15	38.95	54.86	56.47	40.20	35.00	37.00
MnO	0.98	2.47	3.04	1.45	1.18	3.13	1.88
MgO	16.65	3.70	6.55	6.37	2.97	4.01	4.80
CaO	0.65	23.76	5.40	5.23	23.79	25.74	24.99
Сумма	100.49	100.47	100.29	100.49	99.84	100.44	100.87

Коэффициенты в формулах

Mg	0.743	0.171	0.313	0.303	0.138	0.183	0.219
Fe ²⁺	1.231	1.012	1.469	1.505	1.051	0.896	0.946
Ca	0.021	0.791	0.185	0.179	0.797	0.844	0.819
Mn	0.025	0.065	0.083	0.039	0.031	0.081	0.049
Сумма катионов	2.020	2.038	2.050	2.025	2.018	2.005	2.033
Si	0.990	0.981	0.975	0.987	0.991	0.998	0.984
Mg#	0.38	0.14	0.18	0.17	0.12	0.17	0.19
Caol	1.03	38.78	9.04	8.82	39.50	42.12	40.29
Fo	36.80	8.40	15.26	14.94	6.86	9.13	10.77
Fa	60.94	49.63	71.68	74.31	52.09	44.70	46.55
Tph	1.23	3.19	4.02	1.93	1.55	4.05	2.40
Fo	36.91	8.09	15.01	14.81	6.70	9.09	10.53
Fa	60.49	11.05	64.20	66.32	12.71	2.59	6.37
Tph	1.00	2.77	3.50	1.64	1.34	4.00	2.03
Kir	1.60	78.09	17.29	17.23	79.25	84.32	81.07

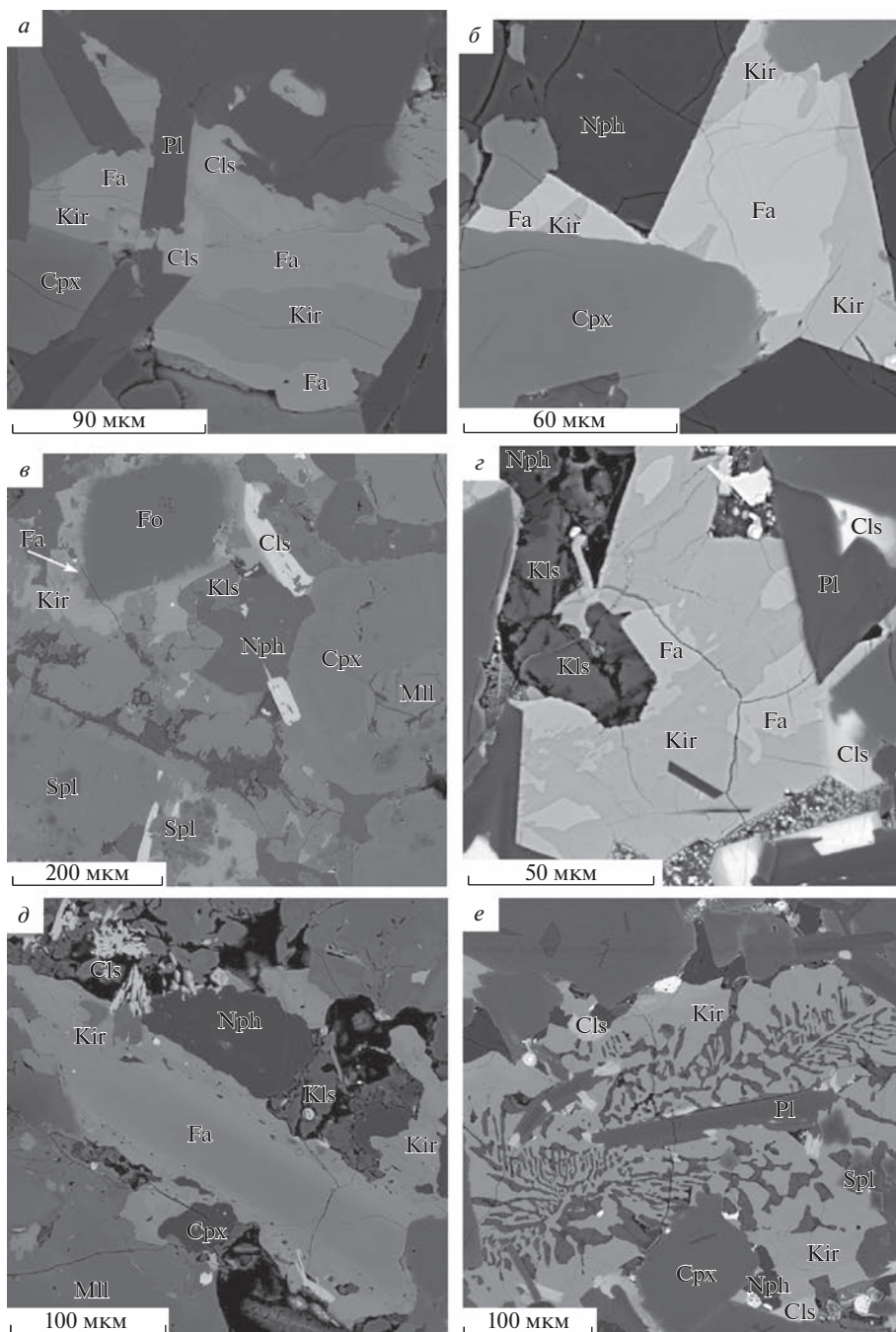
Таблица 1. Продолжение

Образец	1133	1180	1179	1234-1	
Анализ	17(6)	18(2)	19(2)	20(5)	21(6)
SiO ₂	36.66	36.51	35.58	36.28	32.55
FeO	3.78	15.67	11.46	12.13	31.84
MnO	0.49	0.83	0.85	2.38	4.22
MgO	22.56	15.71	17.07	16.40	5.51
CaO	35.57	32.68	35.62	34.28	26.30
Сумма	98.95	101.39	100.57	101.46	100.42
Коэффициенты в формулах					
Mg	0.905	0.645	0.702	0.670	0.250
Fe ²⁺	0.085	0.361	0.264	0.278	0.809
Ca	1.026	0.964	1.052	1.007	0.856
Mn	0.011	0.019	0.020	0.055	0.109
Сумма катионов	2.027	1.989	2.038	2.011	2.023
Si	0.987	1.005	0.981	0.995	0.989
Mg#	0.91	0.64	0.73	0.71	0.24
Caol	50.60	48.47	51.63	50.08	42.31
Fo	44.65	32.42	34.43	33.34	12.33
Fa	4.20	18.14	12.96	13.83	39.99
Trph	0.55	0.98	0.98	2.75	5.37
Fo	0.00	2.21	0.00	0.00	9.84
Trph	0.03	1.10	0.08	2.35	5.15
Kir	8.98	36.36	28.09	29.21	80.31
Mtc	90.99	60.33	71.83	68.43	4.71

Примечание. Номера образцов имеют префикс “MN-”. После порядкового номера в скобках – количество СЭМ ЭДС анализов. Прочерк – содержание ниже предела обнаружения СЭМ ЭДС анализа. Порядковые номера для средних составов оливинов: 1–5 паралавы Хамарин-Хурал-Хида, 6–22 Нилгинские паралавы. Кристаллохимические формулы рассчитаны на 4 атома кислорода. Mg# = Mg/(Mg + Fe). Fo – форстерит, Fa – фаялит, Caol – кальциооливин (Ca₂SiO₄), Trph – тефроит, Kir – кирштейнит, Mtc – монтichelлит.

Рис. 3. Фрагменты матрикса паралав комплексов Хамарин-Хурал-Хид (а, б) и Нилгинского (в–е). а, б – продукты распада твердого раствора оливина на Са-фаялит и кирштейнит, обр. MN-1425; в – зерно форстерита с каймой фаялит-кирштейнитового состава, обр. MN-1179; г – продукты распада твердого раствора оливина на Са-фаялит и кирштейнит, обр. MN-1193; д – микролит Са-фаялита с каймой кирштейнита, обр. MN-1234; е – симлектитоподобное срастание кирштейнита и нефелина, обр. MN-1234-1. Изображения в обратно-рассеянных электронах. Cls – цельзиан, Cpx – клинопироксен, Fa – Са-фаялит, Kir – кирштейнит, Kls – кальсилит, Mill – мелилит, Nph – нефелин, Pl – плагиоклаз, Spl – шпинель.

Fig. 3. Matrix fragments of paralavas from Khamaryn–Khural–Khiid (a, b) and Nyalga (v–e) complexes. a, b – decomposition products of olivine solid solution into Ca-bearing fayalite and kirschsteinite, sample MN-1425; v – forsterite grain with the rim of fayalite–kirschsteinite composition, sample MN-1179; g – decomposition products of the solid solution Ca-fayalite–kirschsteinite, sample MN-1193; d – Ca-fayalite microlith with the kirschsteinite rim, sample MN-1234; e – simplectite intergrowths of kirschsteinite and nepheline, sample MN-1234-1. BSE images. Cls, celsian, Cpx, clinopyroxene, Fa, Ca-fayalite, Kir, kirschsteinite, Kls, kalsilite, Mill, melilite, Nph, nephiline, Pl, plagioclase, Spl, spinel.



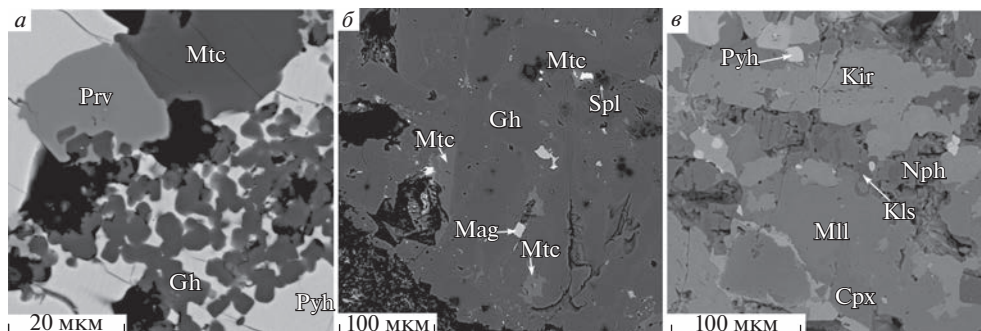


Рис. 4. Фрагменты реликтов ксенолитов термически измененной карбонатно-силикатной породы (мергелистого известняка) и матрикса паралав Нилгинского комплекса. *a* — зерно монтичеллита в ассоциации с перовскитом и геленитом. обр. MN-1176; *б* — включения монтичеллита и минералов ряда монтичеллит–кирштейнит в гелените, обр. MN-1234-1; *в* — выделения кирштейнита в ассоциации с нефелином, кальситом, мелилитом и Al-клинопироксеном. Изображения в обратно-рассеянных электронах. Gh — геленит, Mtc — минералы ряда монтичеллит–кирштейнит, Mag — магнетит, Prv — перовскит, Pyh — пирротин. Остальные условные обозначения см. на рис. 3.

Fig. 4. Fragments of thermally modified xenoliths of carbonate-silicate rocks (marly limestone) and matrix fragments of paralavas from Nyalga complex. *a* — monticellite grain in assemblage with perovskite and gehlenitic melilite, sample MN-1176; *б* — inclusions of monticellite and members of the monticellite–kirschsteinite series in gehlenitic melilite, sample MN-1234-1; *в* — inclusions of kirschsteinite in association with nepheline, calcite, melilite and Al-clinopyroxene. BSE images. Gh, gehlenitic melilite, Mct, members of the monticellite–kirschsteinite series, Mag, magnetite, Prv, perovskite, Pyh, pyrrhotite. Other symbols see on the Fig. 3.

реже изометричной формы размером до 100 мкм в ассоциации с геленитом (минерал содержит до 80 мол. % минала геленита $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$), перовскитом и пирротинном (рис. 4, *a*) обнаружены в реликтах ксенолитов термически измененных карбонатно-силикатных осадочных пород. По данным СЭМ ЭДС (табл. 1, ан. 17–19) содержания SiO_2 , CaO, MnO в монтичеллите изменяются незначительно и составляют 35–37, 32–36.5, 0–0.9 мас. % соответственно. Зональность в отдельных зернах оливинов ряда монтичеллит–кирштейнит не обнаружена. Однако, даже в пределах одного образца паралавы эти оливины в ксенолитах осадочных пород имеют очень большой диапазон магнезиальности (Mg# от 0.4 до 0.94) при концентрациях FeO 1.5–16 мас. %, MgO 15–24 мас. %. Содержание CaO в большинстве зерен монтичеллита и оливинах ряда монтичеллит–кирштейнит изменяется в диапазоне 48–53 мол. % при широких вариациях концентраций Kir (3–37 мол. %) и количестве Trp до 1.1 мол. %. Максимальное содержание Mtc для минералов ряда монтичеллит–кирштейнит составляет 96 мол. %.

Образец MN-1234-1 содержит крупный реликт измененного ксенолита осадочной породы, сложенный геленитом с включениями, имеющими промежуточный состав между монтичеллитом и кирштейнитом (табл. 1, ан. 20, рис. 4, *б*). Также в матриксе паралавы обнаружены выделения кирштейнита размером до 300 мкм в ассоциации с нефелином и кальситом (табл. 1, ан. 21, рис. 4, *в*). В оливинах ряда монтичеллит–кирштейнит содержание CaO и Fa изменяется в диапазоне 45–52.5 и 5–23 мол. %, а в кирштейните — 39.5–44 и 34–46 мол. % соответственно. Минералы ряда монтичеллит–кирштейнит в данном образце характеризуются большими вариациями содержания Kir (от 12 до 86 мол. %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Минералы группы оливина имеют разную распространенность в породах земного и внеземного происхождения.

Кишштейнит характерен для метеоритов: хондритов (MacPherson et al., 2017), ахондритов (Mikouchi et al., 1995; Jambon et al., 2008) и железных метеоритов (Folco, Melini, 1997). Этот минерал встречается в скарнах (Конев, Самойлов, 1974), ультраосновных вулканических (Melluso et al., 2010; Шарыгин, 2011; Chalapathi et al., 1996) и щелочных вулканических породах (Andersen et al., 2012), кимберлитах (Chalapathi et al., 1996) и габбро-долеритах (Олейников, 1995). Описаны также находки кишштейнита в техногенных породах, образованных при подземных ядерных взрывах (Kahn, Smith, 1966), и парабазах (железистых паралавах) Челябинского угольного бассейна (Sokol et al., 2002).

Монтichelлит встречается и может быть породообразующим минералом в скарнах (Синяков и др., 1961; Конев, Самойлов, 1974; Иванюк и др., 2002; Сокол и др., 2019). Найдки монтichelлита описаны в карбонатитах (Stoppa, Lupini, 1993; D'Orazio et al., 2007; Зайцев, Петров, 2008; Tappe et al., 2009), кимберлитах (Abersteiner et al., 2018, 2020; Dongre, Tappe, 2019; Korylova et al., 2021), камафугитах (Boari et al., 2007; Lustrino et al., 2020), дунитах (Nagata, 1982) и серпентинизированных перидотитах (Nozaka, 2020). Минералы промежуточного состава между монтichelлитом и кишштейнитом встречаются в пирогенных породах "пестрой зоны" бассейна Хатрурим (Burg et al., 1991), в терриконах на площади Челябинского угольного бассейна (Сокол, 2005) и в пирометаллургических шлаках (Warchulski et al., 2016).

Оливины в мелилит-нефелиновых паралавах Монголии имеют отличительные текстурные особенности, различные объемные соотношения (рис. 3, 4) и большие вариации состава (табл. 1, рис. 5, б). В паралавах Хамарин-Хурал-Хида чаще всего встречаются Са-фаялит и кишштейнит, а в Нилгинских паралавах кроме этих минералов — форстерит, монтichelлит и промежуточные члены ряда монтichelлит–кишштейнит.

Кишштейнит имеет различное содержание Mg: в Нилгинском комплексе этот минерал более магнезиальный ($Mg\#$ в среднем 0.25) по сравнению с таковым из комплекса Хамарин-Хурал-Хид ($Mg\#$ от 0.07 до 0.22). Ориентированные выделения Са-фаялита и кишштейнита (структуры распада твердого раствора), описанные в метеорите — ангрите (Mikouchi et al., 1995) и парабазах Челябинского угольного бассейна (Sokol et al., 2002), не обнаружены в мелилит-нефелиновых паралавах. Минеральные ассоциации оливинов в магматических породах также отличаются от таковых в паралавах. В мелилититовых лавах Италии (Melluso et al., 2010; Шарыгин, 2011) кишштейнит заполняет интерстиции между минералами матрикса и образует краевые зоны фенокристов форстерита (Fe_{85-80}), в котором содержание Ca_{ol} , как правило, не превышает 3 мол. % (рис. 5, б). В паралавах Монголии и парабазах Челябинского угольного бассейна кишштейнит и Са-фаялит, содержащий более 6 мол. % Ca_{ol} , образуют совместные сростания — вероятно, структуры распада твердого раствора.

Текстурные особенности и большие вариации состава оливинов из пирометаморфических, магматических и техногенных пород могут быть связаны со многими факторами: локальными вариациями физико-химических параметров (T , P , составами расплава и флюидной фазы), кинетикой кристаллизации (скорости охлаждения и др.) мафических расплавов, исходных для недосыщенных по кремнезему, обогащенных Са, магматических, техногенных пород и мелилит-нефелиновых паралав.

Са-фаялит и кишштейнит могли образоваться как при распаде твердого раствора, так и в результате кристаллизации оливинов разного состава из остаточных мафических расплавов в локальных участках матрикса паралав. По экспериментальным данным (Davidson, Mukhopadhyay, 1984) кристаллизация обогащенных Са и Fe оливинов наблюдается в низкотемпературных и высокотемпературных условиях из недосыщенного кремнеземом мафического расплава. В зависимости от отношения Са/Fe, в таком рас-

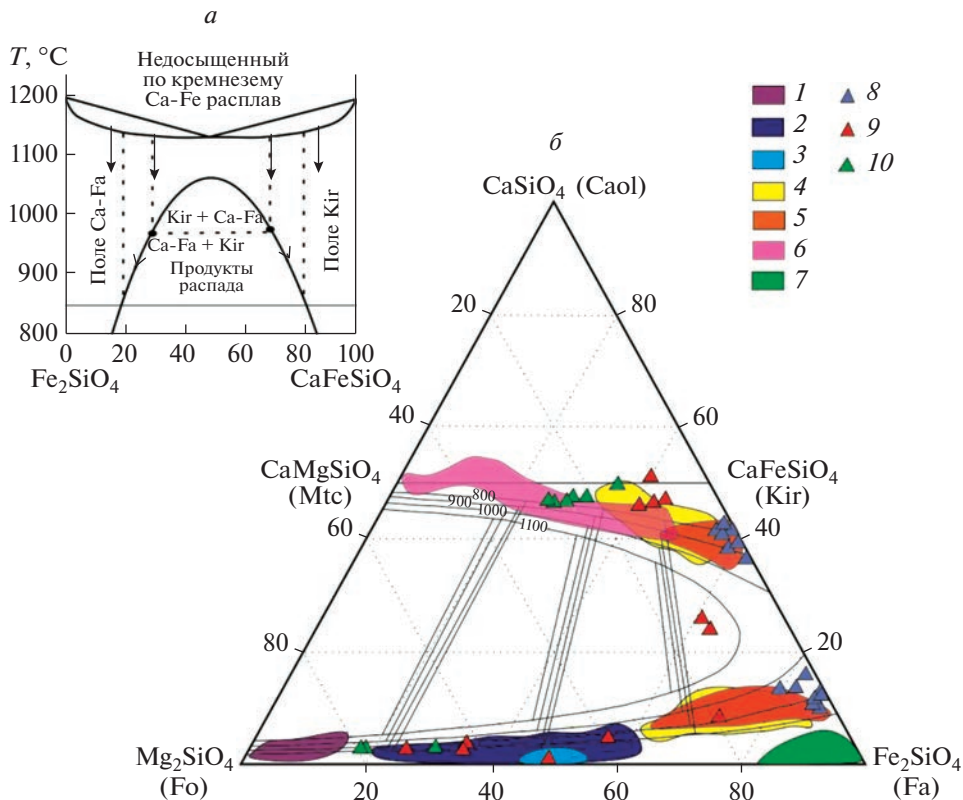


Рис. 5. Схема распада твердого раствора оливина (а, по: Sokol et al., 2002), поля и точки состава оливинов из вулканических пород и парабазалтов (б). Изотермы в области несмесимости твердого раствора оливина, составы сосуществующих фаз (тонкие линии между изотермами), по (Davidson, Mukhopadhyay, 1984). Поля состава оливинов из паралавов комплексов Нилгинский (1, 2, 4, 6) и Хамарин–Хурал–Хид (3, 5, 7): (1) форстерит, (2, 3) оливины ряда форстерит–фаялит, (4, 5) Са-фаялит и кирштейнит, (6) оливины ряда монтichelлит–кирштейнит, (7) фаялит. Точки состава оливинов из: (8) парабазалтов Челябинского угольного бассейна (по: Sokol et al., 2002), (9) мелилитолитов вулканического комплекса Capo di Bove (по: Melluso et al., 2010) и (10) вулкана Пьян ди Челле (по: Шарыгин, 2011).

Fig. 5. Scheme of decomposition of the olivine solid solution (a, after Sokol et al., 2002), composition fields and points of olivines from volcanic rocks and parabasalts (b). Isotherms of the miscibility gap of olivine solid solution and tie lines after Davidson and Mukhopadhyay, 1984. Composition fields of olivines from paralavas of Nyalga complex (1, 2, 4, 6) and the Khamaryn–Khiid complex (3, 5, 7): (1) forsterite, (2, 3) members of forsterite–fayalite series, (4, 5) Ca-fayalite and kirschsteinite, (6) members of monticellite–kirschsteinite series, (7) fayalite. Composition points of olivines from: (8) from parabasalts of the Chelyabinsk brown-coal basin (after Sokol et al., 2002), (9) melilitolites from the volcanic complex Capo di Bove (after Melluso et al., 2010) and (10) Pian di Celle volcano (after Sharygin, 2011).

плаве могут образоваться либо кирштейнит, либо Са-фаялит, либо оба этих минерала в различных объемных соотношениях при распаде твердого раствора (рис. 5, а). В мелилит-нефелиновых паралавах кирштейнит кристаллизовался на поздних стадиях формирования матрикса – в микролитах (зернах) между минералами фенокристовой ассоциации и, вероятно, при распаде твердого раствора. В паралавах Монголии оливины

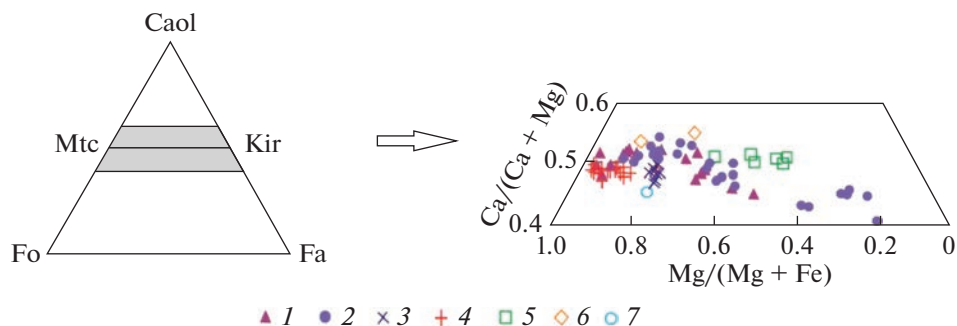


Рис. 6. Фрагмент диаграммы Caol–Fa–Fo с составами монтичеллита и промежуточных членов ряда монтичеллит–кирштейнит из минеральных ассоциаций, характерных для кимберлитов, карбонатитов, метаморфизованных известняков, магматических пород и шлаков, а также из реликтов ксенолитов термически измененных карбонатно-силикатных пород в Нилгинских паралавах. (1) паралавы Нилгинского комплекса, (2) обр. MN-1234-1, (3) карбонатиты (по: Stoppa, Lupini, 1993; D’Orazio et al., 2007), (4) кимберлиты (по: Abersteiner et al., 2017; Donge, 2019; Kopylova, 2021), (5) серпентиниты (по: Nozaka, 2020), (6) метаморфизованные мергелистые известняки из зоны контакта с базальтами траппов (по: Сокол и др., 2019), (7) пирометаллургические шлаки (по: Warchulski et al., 2016).

Fig. 6. Fragment of the Caol–Fa–Fo diagram with compositions of monticellite and members of the monticellite–kirschsteinite series from mineral assemblages in kimberlites, carbonatites, metamorphosed limestones, igneous rocks and slags, also from relict xenoliths of thermally modified carbonate-silicate rocks in Nyalga paralavas. (1) paralavas from Nyalga complex, (2) sample MN-1234-1, (3) carbonatites (after Stoppa, Lupini, 1993; D’Orazio et al., 2007), (4) kimberlites (after Abersteiner et al., 2017; Donge, 2019; Kopylova, 2021), (5) serpentinites (after Nozaka, 2020), (6) metamorphosed marly limestones from the contact zone with basalt traps (after Sokol et al., 2019); (7) pyrometallurgical slags (after Warchulski et al., 2016).

формировались, согласно экспериментально определенной поверхности сольвуса, в температурных интервалах 1050–800 и 1000–800°C соответственно, а в парабазальтах Челябинского угольного бассейна при 950–800°C (Sokol et al., 2002) (рис. 5, б).

В магматических и вулканических породах монтичеллит образует отдельные кристаллы (фенокристы, микролиты) и замещает ранние оливины ряда форстерит–фаялит. Кристаллизация монтичеллита в щелочных магматических породах может происходить при реакционном взаимодействии форстерита и карбонатного расплава (Abersteiner et al., 2018). Монтичеллит в кимберлитах и карбонатитах содержит не более 20 мол. % Kir (рис. 6). При низкотемпературных изменениях серпентинизированных перидотитов минералы ряда монтичеллит–кирштейнит (40–60 мол. % Kir) образуются в результате взаимодействия Ca-содержащего флюида и оливинов ряда форстерит–фаялит (Nozaka, 2020).

В Нилгинских паралавах встречаются монтичеллит и минералы ряда монтичеллит–кирштейнит, содержащие от первых процентов до 86 мол. % Kir (рис. 6). Такие оливины обнаружены в паралавах, содержащих реликты ксенолитов термически измененных карбонатно-силикатных пород. Для минеральных ассоциаций ксенолитов характерно присутствие геленита, который образуется, как было показано ранее (Peretyazhko et al., 2021), в процессе низкобарических и высокотемпературных изменений мергелистого известняка. Такой мелилит кристаллизуется также в высокотемпературных условиях мервинит–спурритовой фации метаморфизма, например, в переходной зоне между мергелистыми известняками и базальтами траппов (Сокол и др., 2019). Эти наблюдения позволяют сделать вывод, что в породах пирометаморфических комплексов Монголии минералы ряда монтичеллит–кирштейнит образовались в процессе реакцион-

ного взаимодействия недосыщенного по кремнезему и обогащенного Са мафического расплава, исходного для мелилит-нефелиновых паралав, с ксенолитами силикатно-карбонатных осадочных пород (мергелистых известняков), имеющих большие вариации концентрации примеси силикатного (глинисто-полевошпатового) вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мелилит-нефелиновые паралавы пирометаморфических комплексов Монголии содержат оливины с большими вариациями состава. В паралавах Хамарин-Хурал-Хид преобладают продукты распада твердого раствора на Са-фаялит и кирштейнит. Оливины Нилгинских паралав более разнообразны по составу и представлены минералами ряда форстерит–фаялит, продуктами распада твердого раствора, монтichelлитом и промежуточными членами ряда монтichelлит–кирштейнит. Оливины отличаются по текстурным особенностям, объемному соотношению Са-фаялита и кирштейнита, магнeзиальности Mg# и температуре кристаллизации. Оливины из матрикса мелилит-нефелиновых паралав Монголии образовались в более широком интервале температуры по сравнению с таковыми из парабазальтов Челябинского угольного бассейна (1050–800 и 950–800°C, соответственно).

В Нилгинских паралавах в пределах одного образца встречаются реликты ксенолитов термически измененных осадочных карбонатно-силикатных пород, которые содержат минеральные ассоциации с геленитом, монтichelлитом и минералами ряда монтichelлит–кирштейнит с максимальным количеством минала K_{1g}, достигающим 86 мол. %. Кальций-магнeзиально-железистые оливины кристаллизовались при реакционном взаимодействии недосыщенного кремнеземом и обогащенного Са мафического расплава паралав с ксенолитами мергелистых известняков.

Работа выполнена при поддержке программы ФНИ 0284-2021-0006 и гранта 075-15-2022-1100 Министерства Науки и Высшего Образования Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Зайцев А.Н., Петров С.В. Карбонатиты вулкана Олдоньи Ленгаи, Северная Танзания / Щелочной магматизм, его источники и плюмы. Иркутск: Неаполь, **2008**. С. 59–70.

Ковдор / Ред. Иванюк Г.Ю., Яковенчук В.Н., Пахомовский Я.А. Апатиты: Минералы Лапландии, **2002**. 320 с.

Конев А.А., Самойлов В.С. Контактный метаморфизм и метасоматоз в ореоле Тажеранской щелочной интрузии. Новосибирск: Наука, **1974**. 246 с.

Олейников Б.В. Кирштейнит – вероятный продукт симплектического распада раннемагматического кальцийсодержащего гиалосидерита // Доклады АН. **1995**. Т. 342. № 1. С. 80–81.

Пирогенный метаморфизм / Ред. Сокол Э.В., Максимова Н.В., Нигматулина Е.Н., Шарыгин В.В., Калугин В.М. Новосибирск: СО РАН, **2005**. 284 с.

Перетяжко И.С. CRYSTAL – прикладное программное обеспечение для минералогов, петрологов, геохимиков // ЗВМО. **1996**. № 3. С. 141–148.

Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А., Карманов Н.С., Иванов А.В. Уникальные клинкеры и паралавы нового Нилгинского пирометаморфического комплекса в Центральной Монголии: минералого-геохимические особенности, условия формирования // Петрология. **2018**. Т. 26. № 2. С. 178–210.

Покровский П.В. Нашатырь из месторождения бурых углей Хамарин-Хурал-Хид в Монгольской Народной Республике // ЗВМО. **1949**. № 3. С. 38–45.

Савина Е.А., Перетяжко И.С., Хромова Е.А., Глушкова В.Е. Плавленные породы (клинкеры и паралавы) пирометаморфического комплекса Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия: минералогия, геохимия, процессы образования // Петрология. **2020**. Т. 28. № 5. С. 482–510.

Синяков В.И., Синякова Н.М. Монтichelлитовые скарны Горной Шории // ЗВМО. **1961**. № 6. С. 720–727.

Сокол Э.В., Полянский О.П., Семенов А.Н., Ревердатто В.В., Кох С.Н., Девятярова А.С., Колотов В.Ю., Хворов П.В., Бабичев А.В. Контактный метаморфизм на р. Кочумдек (бассейн р. Подкаменная Тунгуска, Восточная Сибирь): свидетельства режима течения расплава // Геология и геофизика. **2019**. Т. 60. № 4. С. 456–471.

Шарыгин В.В. Магнeзиальный кирштейнит в мелилитолитах вулкана Пьян ди Челле, Умбрия, Италия http://alkaline2011.web.ru/2012/abstracts/SharyginV_rus.htm

Minerals of the Olivine Group from Melilite–Nepheline Paralavas of Combustion Metamorphic Complexes of Mongolia

V. E. Glushkova^{a, *}, I. S. Peretyazhko^{a, b}, E. A. Savina^a, and E. A. Khromova^c

^a Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia

^b Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia

^c Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch RAS, Ulan-Ude, Russia

*e-mail: glushkova@igc.irk.ru

Olivine group minerals were formed in melilite–nepheline paralavas in two combustion metamorphic (CM) complexes as result of thermal alterations of sedimentary rocks caused by multistage current and quaternary wild coal fires. Products of decomposition of the olivine solid solution into Ca-bearing fayalite and kirschsteinite have been found in paralavas of the Khamaryn–Khural–Khiid CM complex. And, besides these two minerals, forsterite–fayalite, monticellite–kirschsteinite and simplectite intergrowths of kirschsteinite with nepheline were detected in paralavas of the Nyalga PM complex. Olivines are differing by their textural features, index value $Mg\# = Mg/(Mg + Fe)$ and their crystallization temperature as a consequence of local variations of formation conditions and composition of silica-undersaturated Ca-rich mafic initial melts of melilite–nepheline paralavas. Olivines of the monticellite–kirschsteinite series containing up to 86 mol. % of kirschsteinite end-member occur only in paralavas containing xenoliths of thermally modified carbonate–silicate sedimentary rocks. Crystallization of these olivines together with gehlenitic melilite took place in the process of reactionary interaction between mafic paralava melts and xenoliths of marly limestones with large variations in contents of silicate (clay–feldspar) admixture.

Keywords: kirschsteinite, monticellite, Nyalga and Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complexes, Mongolia

REFERENCES

- Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Graham Pearson D., Kamenetsky M., Karsten G., Ehrig K., Rodemann T. Monticellite in group-I kimberlites: Implications for evolution of parental melts and post-emplacement CO₂ degassing. *Chem. Geol.* **2018**. Vol. 478. P. 76–88.
- Abersteiner A., Kamenetsky V.S., Goemann K., Kjarsgaard B.A., Fedortchouk Y., Ehrig K., Kamenetsky M. Evolution of kimberlite magmas in the crust: A case study of groundmass and mineral-hosted inclusions in the Mark kimberlite (Lac de Gras, Canada). *Lithos.* **2020**. Vol. 372–373. 105690.
- Andersen T., Elburg M., Erambert M. Petrology of combeite- and götzenite-bearing nephelinite at Nyiragongo, Virunga Volcanic Province in the East African Rift. *Lithos.* **2012**. Vol. 152. P. 105–121.
- Boari E., Conticelli S. Mineralogy and petrology of associated Mg-rich ultrapotassic, shoshonitic, and calc-alkaline rocks: the Middle Latin Valley monogenetic volcanoes, Roman Magmatic Province, southern Italy. *Canad. Miner.* **2007**. Vol. 45. P. 1443–1469.
- Burg A., Stravinsky A., Bartov Y., Kolodny Y. Geology of the Hatrurim formation (“Mottled Zone”) in the Hatrurim basin. *Isr. J. Earth Sci.* **1991**. Vol. 40. P. 107–124.
- Chalapathi Rao N.V., Reed S.J.B., Pyle D.M., Beattie P.D. Larnitic kirschsteinite from the Kotakonda kimberlite, Andhra Pradesh, India. *Miner. Mag.* **1996**. Vol. 60. P. 513–516.
- Combustion metamorphism. Ed. by Sokol E.V., Maksimova N.V., Nigmatulina E.N., Sharygin V.V., Kalugin V.M. Novosibirsk: SB RAS, **2005**. 284 p. (in Russian).
- Davidson P.M., Mukhopadhyay D.K. Ca–Fe–Mg olivines: phase relations and a solution model. *Contrib. Miner. Petrol.* **1984**. Vol. 86. P. 256–263.
- Dongre A., Tappe S. Kimberlite and carbonatite dykes within the Premier diatreme root (Cullinan Diamond Mine, South Africa): New insights to mineralogical-genetic classifications and magma CO₂ degassing. **2019**. *Lithos.* Vol. 338–339. P. 155–173.
- D’Orazio M., Innocenti F., Tonarini S., Doglioni C. Carbonatites in a subduction system: The Pleistocene alvikites from Mt. Vulture (southern Italy). *Lithos.* **2007**. Vol. 98. P. 313–334.
- Erdenetsogt B., Lee I., Bat-Erdene D., Jargal L. Mongolian coal-bearing basins: geological settings, coal characteristics, distribution, and resources. *Int. J. Coal. Geol.* **2009**. Vol. 80. P. 87–104.

- Folco L., Mellini M. Crystal chemistry of meteoritic kirschsteinite. *Eur. J. Miner.* **1997**. Vol. 9. P. 969–973.
- Jambon A., Boudouma O., Fonteilles M., Le Guillou C., Badia D., Barrat J.-A. Petrology and mineralogy of the angrite Northwest Africa 1670. *Meteorit. Planet. Sci.* **2008**. Vol. 43. N 11. P. 1783–1795.
- Kahn J.S., Smith D.K. Mineralogical investigations in the debris of the Gnome event near Carlsbad, New Mexico. *Amer. Miner.* **1966**. Vol. 51. P. 1192–1199.
- Konev A.A., Samoilov V.S. Contact metamorphism and metasomatism in the halo of the Tagheran alkaline intrusion. Novosibirsk: Nauka, **1974**. 246 p. (in Russian).
- Kopylova M.G., Ma F., Tso E. Constraining carbonation freezing and petrography of the carbonated cratonic mantle with natural samples. *Lithos.* **2021**. Vol. 388–389. 106045.
- Kovdor. Ed. by Ivanyuk G.U., Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Ya.A. Miner-chem. company “EuroChem” [and others]. Apatites: Minerals of Lapland, **2002**. 320 p. (in Russian).
- Lustrino M., Ronca S., Caracausic A., Bordenca C.V., Agostinie S., Faraone D.B. Strongly SiO₂-undersaturated, CaO-rich kamafugitic Pleistocene magmatism in Central Italy (San Venanzo volcanic complex) and the role of shallow depth limestone assimilation. *Earth Sci. Rev.* **2020**. Vol. 208. 103256.
- MacPherson G.J., Nagashima K., Krot A.N., Doyle P.M., Ivanova M.A. Mn-Cr chronology of Ca-Fe silicates in CV3 chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **2017**. Vol. 201. P. 260–274.
- Melluso L., Conticelli S., de’ Gennaro R. Kirschsteinite in the Capo di Bove melilite leucite lava (cecilite), Alban Hills, Italy. *Miner. Mag.* **2010**. Vol. 74. P. 887–902.
- Mikouchi T., Takeda H., Miyamoto M., Ohsumi K., McKay G.A. Exsolution lamellae of kirschsteinite in magnesium-iron olivine from an angrite meteorite. *Amer. Miner.* **1995**. Vol. 80. P. 585–592.
- Nagata J. Magnesioferrite-olivine rock and monticellite-bearing dunite from the Iwanai-dake alpine-type peridotite mass in the Kamuikotan structural belt, Hokkaido, Japan. *J. Japan Assoc. Miner. Petrol. Econ. Geol.* **1982**. Vol. 77. P. 23–31.
- Nozaka T. Fe-monticellite in serpentinites from the Haplo ultramafic complex. *Lithos.* **2020**. Vol. 374–375. 105686.
- Oleinikov B.V. Kirschsteinite is a probable product of symplectic decay of early magmatic calcium-containing hyalosiderite. *Doklady Earth Sci.* **1995**. Vol. 342. N 1. P. 80–81 (in Russian).
- Peretyazhko I.S. CRYSTAL—applied software for mineralogist, petrologist, and geochemists. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1996**. N 3. P. 141–148 (in Russian).
- Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex of Choir-Nyalga Basin (Central Mongolia): chemistry, mineral assemblages, and formation conditions. *Miner. Mag.* **2017**. Vol. 81. N 4. P. 949–974.
- Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A., Karmanov N.S., Ivanov A.V. Unique clinkers and paralavas from a new Nyalga combustion metamorphic complex in central Mongolia: mineralogy, geochemistry, and genesis. *Petrology.* **2018**. Vol. 26. N 2. P. 181–211 (in Russian).
- Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Low-pressure (>4 MPa) and high-temperature (>1250°C) incongruent melting of marl limestone: formation of carbonate melt and melilite–nepheline paralava in the Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complex, East Mongolia. *Contrib. Miner. Petrol.* **2021**. Vol. 176:38.
- Pokrovskii P.V. Ammonium chloride from the Khamaryn–Khyral–Khiid brown coal field in Mongolia. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1949**. N 3. P. 38–45 (in Russian).
- Sahama Th.G., Hytönen K. Kirschsteinite, a natural analogue of synthetic iron monticellite, from the Belgian Congo. *Miner. Mag.* **1957**. Vol. 31. P. 698–699.
- Savina E.A., Peretyazhko I.S., Khromova E.A., Glushkova V.E. Melted rocks (clinkers and paralavas) of Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complex in Eastern Mongolia: mineralogy, geochemistry and genesis. *Petrology.* **2020**. Vol. 28. N 5. P. 482–510 (in Russian, English translation: *Petrology.* **2020**. Vol. 28. N 5. P. 431–457).
- Sharygin V.V. Magnesian kirschsteinite in the melilites of the volcano Pian di Celle, Umbria, Italy http://alkaline2011.web.ru/2012/abstracts/SharyginV_rus.htm (in Russian).
- Sinyakov V.I., Sinyakova N.M. Monticellite scars of the Mountain Shoria. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1961**. N 6. P. 720–727 (in Russian).
- Sokol E., Sharygin V., Kalugin V. et al. Fayalite and kirschsteinite solid solutions in melts from burned spoil-heaps, South Urals, Russia. *Eur. J. Miner.* **2002**. Vol. 14. P. 795–807.
- Sokol E.V., Polyansky O.P., Semenov A.N., Reverdatto V.V., Kokh S.N., Devyatnyarova A.S., Kolobov V.Yu., Khvorov P.V., Babichev A.V. High-grade contact metamorphism in the Kochumdek river valley (Pod-

kamennaya Tunguska basin, East Siberia): evidence for magma flow. *Russian Geol. Geophys.* **2019**. Vol. 60. N 4. P. 456–471 (*in Russian*).

Stoppa F., Lupini L. Mineralogy and petrology of the Polino monticellite calicocarbonatite (Cental Italy). *Miner. Petrol.* **1993**. Vol. 49. P. 213–231.

Tappe S., Steenfelt A., Heaman L.M., Simonetti A. The newly discovered Jurassic Tikiussaq carbonate-aillikite occurrence, West Greenland, and some remarks on carbonatite-kimberlite relationships. *Lithos.* **2009**. Vol. 112S. P. 385–399.

Warchulski R., Gawęda A., Janeczek J., Kądziołka-Gaweł M. Mineralogy and origin of coarse-grained segregations in the pyrometallurgical Zn-Pb slags from Katowice-Wełnowiec (Poland). *Miner. Petrol.* **2016**. Vol. 110 P. 681–692.

Zaitsev A.N., Petrov S.V. Carbonatites of the Oldonyi Lengai volcano, Northern Tanzania. In: *Alkaline magmatism, its sources and plumes*. Irkutsk: Naples, **2008**. P. 59–70 (*in Russian*).