
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

**ГЛАВНЫЕ ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ ПАРАЛАВ
ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ МОНГОЛИИ**© 2023 г. В. Е. Глушкова¹, *, И. С. Перетяжко¹, Е. А. Савина¹, Е. А. Хромова²¹*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, ул. Фаворского, 1а, Иркутск, 664033 Россия*²*Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН,
ул. Сахьяновой, 6а, Улан-Удэ, 670047 Россия***e-mail: glushkova@igc.irk.ru*

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 01.06.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Приведена характеристика состава породообразующих минералов (плагиоклазов, клинопироксенов, мелилитов) паралав пирометаморфических комплексов Монголии, которые образовались в процессе высокотемпературных трансформаций карбонатно-терригенных пород осадочных толщ во время полистадийных природных угольных пожаров. Мелилит-нефелиновые паралавы содержат фенокристи железистого акерманита-алюмоакерманита, диоксида-геденбергита, содержащего до 49 мол. % минала кушироита CaAlAlSiO_6 , и основного плагиоклаза. Энстатит-ферросилит является породообразующим минералом плагиоклаз–пироксен \pm индиалитовых паралав. В паралавах часто находятся ксенолиты термически измененных осадочных пород. Минеральные ассоциации в реликтах ксенолитов мергелистого известняка, сложенные геленитом, монтичеллитом-кирштейнитом, перовскитом, обогащенным Al клинопироксеном, шпинелью и другими минералами, формировались на стадии высокотемпературного метаморфизма осадочного протолита, предшествовавшей плавлению карбонатно-силикатных пород, и в результате реакционного взаимодействия ксенолитов с пирогенными силикатными расплавами разного состава.

Ключевые слова: клинопироксен, мелилит, плагиоклаз, паралава, пирометаморфические комплексы, Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид, Монголия

DOI: 10.31857/S0869605523040056, **EDN:** WSSJXM

На территории Центральной и Восточной Монголии в период 2016–2018 гг. были изучены и впервые описаны породы пирометаморфических комплексов – Нилгинского и Хамарин-Хурал-Хид (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020). Комплексы содержат пирогенные породы, которые сформировались во время многостадийных природных пожаров прослоев бурого угля в осадочных толщах. В результате частичного или полного плавления терригенных пород (аргиллитов, алевролитов и песчаников) образовались клинкеры, а из карбонатно-силикатных осадочных пород – паралавы с различными минеральными ассоциациями и значительными вариациями валового состава.

В наиболее распространенных паралавах мелилиты, клинопироксены и плагиоклазы являются породообразующими минералами. Ранее было дано описание минералов группы оливина из этих пород – Ca-содержащего фаялита и кирштейнита (продуктов распада твердого раствора Ca-Fe оливина), промежуточных членов ряда фаялит–форстерит и монтичеллита (Глушкова и др., 2023). В настоящей работе приводятся данные

о составах плагиоклазов, минералов групп мелилита и клинопироксена из мелилит-нефелиновых паралав, ненасыщенных по кремнезему и обогащенных Са, а также плагиоклазов и ортопироксенов (энстатита-ферросилита) из плагиоклаз-пироксен ± индиалитовых паралав, имеющих валовые составы близкие к базальтам и андезибазальтам. Обсуждаются особенности состава минералов групп мелилита и пироксена из пород пирометаморфических комплексов Монголии в сравнении с таковыми из различных природных и техногенных объектов.

Изучение особенностей минерального состава пирогенных пород и содержащихся в них ксенолитов дает новую информацию о процессах термических преобразований и локального плавления осадочных протолитов пирометаморфических комплексов в условиях высокой температуры и близкого к атмосферному давления.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Пирометаморфические комплексы Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид, расположенные на удалении около 300 км друг от друга, сформировались при подземном горении прослоев бурого угля в терригенно-карбонатных осадочных толщах раннемеловой дзунбаинской свиты (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020).

Нилгинский комплекс относится к Чоир-Нилгинской угленосной провинции Центральной Монголии (Erdenetsogt et al., 2009). На площади комплекса обнаружены три останца высотой до 40 м (Корона, Верблюд и Малыш), сложенные в разной степени плавленными пирогенными породами, которые сохранились после эрозии меловой осадочной толщи (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018). Породы представлены термически измененными аргиллитами-алевролитами и продуктами их частичного плавления – стекловатым клинкером разного состава. Обожженные аргиллиты-алевролиты и клинкер на останце Верблюд часто пронизаны сетью тонких прожилков паралавы. На останцах и эродированной поверхности вблизи них площадью ~20 км² встречаются развалы и единичные глыбы мелилит-нефелиновых паралав. Клинкеры и паралавы часто содержат ксенолиты размером от долей мм до нескольких см термически измененных (обоженных) осадочных пород. В 4–5 км к юго-востоку от останцов расположен буроугольный карьер Тугруг, на стенках которого вскрыта осадочная толща, участками измененная пирогенными процессами. Вблизи карьера обнаружены единичные глыбы массивных раскристаллизованных плагиоклаз-пироксеновых и плагиоклаз-пироксен-индиалитовых паралав без мелилита и нефелина, которые отличаются по геохимическим характеристикам от мелилит-нефелиновых паралав на останцах.

Комплекс Хамарин-Хурал-Хид расположен в Восточной Монголии. Пирогенные породы здесь образуют характерный для современных пирометаморфических комплексов ландшафт “горельников” с протяженными грядами, многочисленными оврагами и небольшими пещерами (Савина и др., 2020). С учетом того, что вскрытые эрозией пирогенные породы на площади последнего угольного пожара 1932–1947 гг. (Покровский и др., 1949) в настоящее время имеют повышенную температуру, процесс подземного медленного горения (тления) угольных пластов продолжается. На отдельных участках комплекса были опробованы разрезы пирогенных пород мощностью до 15 м, основание которых сложено термически измененными аргиллитами, алевролитами и песчаниками с реликтами прослоев сгоревшего угля. В верхней части некоторых разрезов вскрыт брекчированный слой мощностью до 3–5 м, состоящий из спекшихся обломков обоженных аргиллитов-алевролитов, стекловатого клинкера и мелилит-нефелиновой паралавы разных размеров и форм (Савина и др., 2020).

В обоих комплексах среди паралав преобладают раскристаллизованные мелилит-нефелиновые разновидности, сложенные фенокритами плагиоклазов, клинопирок-

сенов и мелилитов, интерстиции между которыми заполнены нефелином и кислым, обогащенным калием, алюмосиликатным стеклом с включениями минералов групп оливина, К-Ва полевых шпатов (цельзиана, гиалофана, Ва-содержащего ортоклаза), шпинели, ренита—куратита, пирротина и других более редких минералов. Реже встречаются паралавы плагиоклаз-пироксенового \pm индиалитового и силикатно-железистого составов, а также частично плавленые породы осадочной толщи, содержащие алюмосиликатное стекло, реликтовые зерна кварца, полевых шпатов, Fe-Ti оксидов (Ti-магнетита, ильменита, рутила), циркона, ксенотима, а также вкрапленники новообразованных и вторичных (гипергенных) минералов: группы кордиерита, полиморфов кремнезема (кристобалита, тридимита), муллита, энстатита-ферросилита, цельзиана, плагиоклазов, группы шпинели, фаялита, фторapatита, гётита, гематита, барита-целестина, сульфатов, каолинита, карбонатов и др.

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 анализировали 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 ХРР, реализованному в программном обеспечении INCA Energy. Анализы минералов проводили в режиме сканирования участков площадью от 1 до 10 мкм² при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 0.5 нА и длительности накопления спектров 50 с. Кристаллохимические формулы и миалы минералов рассчитывали в программном комплексе CRYSTAL (Перетьяжко, 1996).

ВАЛОВЫЙ СОСТАВ ПАРАЛАВ

Определены составы мелилит-нефелиновых паралав пирометаморфических комплексов, а также плагиоклаз-пироксен \pm индиалитовых паралав вблизи буроугольного карьера Тугруг (Нилгинский комплекс). Детальная геохимическая характеристика этих пирогенных пород была дана ранее (Peretyazhko et al., 2017; Перетьяжко и др., 2018; Савина и др., 2020).

Мелилит-нефелиновые паралавы Хамарин-Хурал-Хида имеют недосыщенный по кремнезему состав (SiO₂ 39.7–45.4 мас. %) и значительное преобладание Na₂O (4.5–6.5 мас. %) над K₂O (0.3–0.7 мас. %). На TAS диаграмме точки составов паралав попадают в поля фойдита и базанита (рис. 1). Для паралав характерны близкие концентрации Al₂O₃ (17.5–21.1 мас. %), CaO (17.5–23.5 мас. %), FeO (2.2–4.1 мас. %) и MgO (3.5–5.3 мас. %). В виде примесей постоянно присутствуют (мас. %): TiO₂ 0.7–0.9, MnO 0.2–0.3, P₂O₅ 0.2–1.3, S_{общ} до 0.4. Содержание H₂O⁺ варьирует от 0.2 до 0.6 мас. %, H₂O⁻ не превышает 0.3 мас. %.

Нилгинские мелилит-нефелиновые паралавы содержат SiO₂ 36.7–44.4 мас. %, и большинство точек их состава находятся в поле фойдита при вариациях суммы Na₂O и K₂O от 0.8 до 2.3 мас. %. Содержание оксидов породообразующих элементов в паралавах равно (мас. %): Al₂O₃ 13.7–16.0, FeO 7.0–10.0, MgO 7.0–8.9, CaO 22.6–23.9. Содержания примесей TiO₂ и Fe₂O₃ не превышают 1.9 мас. %, MnO – 0.5 мас. %, P₂O₅ – 0.1 мас. %. Во всех пробах паралав обнаружена сера (S_{общ} < 0.25 мас. %). Содержание H₂O⁺ составляет 0.3–0.8 мас. %, а H₂O⁻ – менее 0.5 мас. %.

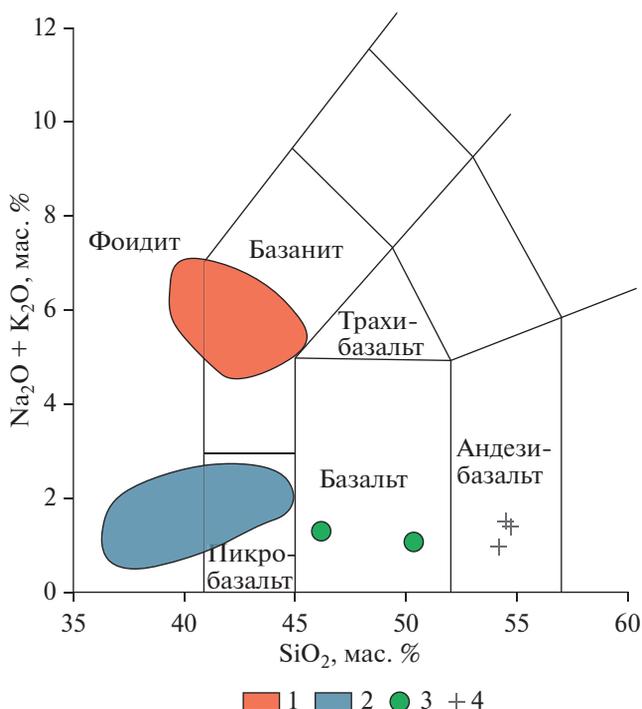


Рис. 1. Фрагмент TAS-диаграммы для паралав пирометаморфических комплексов Монголии. 1 – мелилит-нефелиновые паралавы комплекса Хамарин-Хурал-Хид; 2 – мелилит-нефелиновые паралавы Нилгинского комплекса; 3 – плагиоклаз-пироксеновые паралавы вблизи карьера Тугруг, 4 – плагиоклаз-пироксен-индиалитовые паралавы вблизи карьера Тугруг.

Fig. 1. Fragment of TAS-diagram for paralavas of Mongolian combustion metamorphic complexes. 1 – melilite-nepheline paralavas, Khamaryn-Khural-Khiid; 2 – melilite-nepheline paralavas, Nyalga complex; 3 – plagioclase-pyroxene paralavas near the Tugrug quarry; 4 – plagioclase-pyroxene-indialite paralavas near the Tugrug quarry.

Вблизи карьера Тугруг были отобраны два образца плагиоклаз-пироксеновой паралавы (MN-1310 и MN-1317), точки состава которых на TAS диаграмме находятся в поле базальта. Содержания кремнезема и суммы щелочных компонентов в них составляют (мас. %): SiO_2 46.1–50.4, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 1.2–1.4 (рис. 1). Паралава отличается высоким содержанием глинозема (Al_2O_3 21.4–23.1 мас. %) и следующими вариациями содержаний оксидов (мас. %): CaO 11.9–15.3, FeO 5.2–5.8, Fe_2O_3 0.2–2.2, MgO 4.8–5.3. Содержания примесей TiO_2 , MnO, P_2O_5 не превышают 1 мас. %, а потери при прокаливании – 1.5 мас. %. Точки состава плагиоклаз-пироксен-индиалитовой паралавы (обр. MN-1275, MN-1276 и MN-1277), отобранной вблизи карьера Тугруг, попадают на TAS диаграмме в поле базальтового андезита (SiO_2 54–55 мас. %, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 0.9–1.7 мас. %). Эта порода отличается от плагиоклаз-пироксеновой паралавы более высокой концентрацией Al_2O_3 (до 26 мас. %) и низкой – CaO (<6.3 мас. %). Паралава также содержит (мас. %): FeO 6.1–7.9, Fe_2O_3 0.2–3.8, MgO 2.8–3.1, TiO_2 < 1.0, MnO < 0.1, P_2O_5 < 0.2, H_2O^+ 0.7–0.9, H_2O^- 0.2–0.3. Плагиоклаз-пироксен ± индиалитовые паралавы имеют промежуточные составы между мелилит-нефелиновыми паралавами и клинкерами.

Для плагиоклаз-пироксеновой паралавы Хамарин-Хурал-Хида (обр. MN-1406) и прожилковых плагиоклаз-пироксеновых (обр. MN-1129, MN-1177, MN-1310) и обогащенных пироксеном (обр. MN-1136, MN-1137) паралав Нилгинского комплекса был определен только минеральный состав.

ПОРОДООБРАЗУЮЩИЕ МИНЕРАЛЫ ПИРОГЕННЫХ ПОРОД

Минеральная ассоциация мелилит-нефелиновых паралав представлена минералами групп плагиоклаза, клинопироксена и мелилита. Интерстиции между фенокристаллами этих минералов заполняет нефелин (Нилгинский комплекс) или Са-содержащий минерал группы нефелина – давидсмитит (Хамарин-Хурал-Хид) с включениями других минералов ± алюмосиликатное стекло (Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020). Кроме мелилит-нефелиновых паралав, встречаются также плагиоклаз-пироксеновые разновидности, в которых между фенокристаллами плагиоклаза и энстатита-ферросилита (диагностика по данным рамановской спектроскопии) находится алюмосиликатное стекло (обр. MN-1406, Хамарин-Хурал-Хид) а в обр. MN-1310 (Нилгинский комплекс) интерстиции между плагиоклазом и клинопироксеном заполнены силикатно-железистой обогащенной водой фазой переменного состава. Прожилки паралав в образцах Нилгинских клинкеров (MN-1129, MN-1177, MN-1136 и MN-1137) сложены алюмосиликатным стеклом, энстатитом-ферросилитом ± ± плагиоклазами. Паралавы вблизи карьера Тугруг (обр. MN-1275, MN-1276 и MN-1277), кроме плагиоклазов и энстатита-ферросилита, содержат минералы ряда индиалит–ферроиндиалит в микролитах и сростаниях зерен разной морфологии (Перетяжко и др., 2018).

Плагиоклазы образуют игольчатые микролиты и редкие фенокристы размером до 0.5 мм в матриксе паралав (рис. 2, а). Редкие включения плагиоклазов встречаются также в фенокристаллах клинопироксена и мелилита. В мелилит-нефелиновых паралавах Хамарин-Хурал-Хида преобладают лабрадор и битовнит, содержащие (мас. %): $K_2O < 1.8$, $FeO < 3$, $BaO < 2.8$, $SrO < 3.4$ (табл. 1, ан. 1). Для фенокристов плагиоклазов характерно зональное строение: центральная их часть сложена битовнитом-анортитом An_{70-100} , краевая – андезином-лабрадором An_{48-70} (табл. 1, ан. 2, 3). Плагиоклаз-пироксеновая паралава (обр. MN-1406) содержит плагиоклаз с большими вариациями состава An_{40-95} (табл. 1, ан. 4, 5).

Плагиоклазы мелилит-нефелиновых паралав Нилгинского комплекса соответствуют анортиту и анортиту-битовниту с содержанием примесей Na_2O и FeO до 2.5 мас. % (табл. 1, ан. 6, рис. 3). Количество ортоклазового минала в них, как правило, не превышает 5 мол. %. Некоторые фенокристы содержат в сумме до 6 мас. % BaO и SrO . Зональность в пределах фенокристов не обнаружена. Плагиоклаз-пироксеновые прожилки в клинкере (обр. MN-1136 и MN-1137) сложены андезином An_{30-43} , а паралавы вблизи карьера Тугруг (обр. MN-1310, MN-1275, MN-1276 и MN-1277) – битовнитом-анортитом An_{73-100} (табл. 1, ан. 7–9).

Пироксены встречаются во всех разновидностях паралав в виде идиоморфных фенокристов и микролитов размером до 0.5 мм, реже – в виде удлинённых дендритовых кристаллов и зерен разной морфологии. Для фенокристов клинопироксенов из мелилит-нефелиновых паралав и плагиоклаз-пироксеной паралавы (обр. MN-1310) характерно зональное строение: от центра к краю снижается содержание Al, Mg и возрастает Fe. Центральные зоны обогащены магнием ($Mg\# = Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$ 0.5–0.8) и Al^{VI} (до 0.25 к. ф.), что приводит к расположению точек составов на классификационной диаграмме пироксенов Wo – En – Fs выше полей диопсида и геденбергита (рис. 4, а). Поэтому для дальнейшего описания состава клинопироксенов рассчитывалось коли-

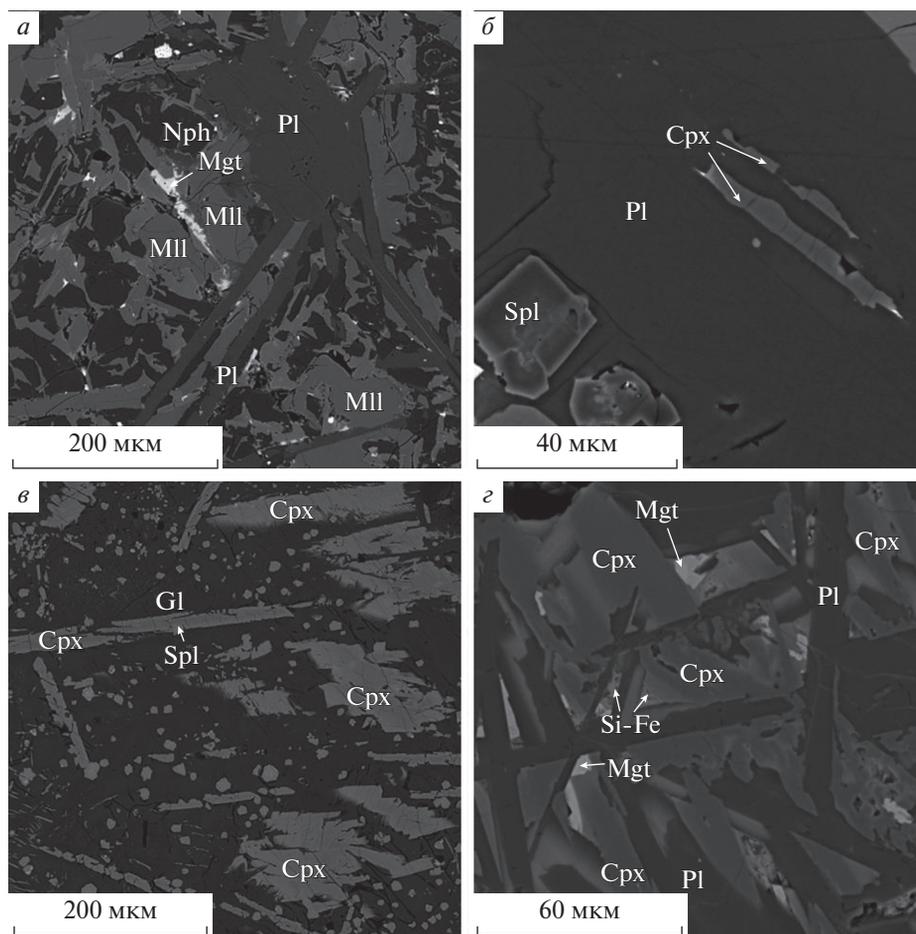


Рис. 2. Фрагменты матрикса паралав. *a* – фенокрист плагиоклаза в ассоциации с мелилитом, давидсмититом и магнетитом, обр. MN-1412 (Хамарин-Хурал-Хийд); *б* – микролиты обогащенного Al клинопироксена в плагиоклазе, обр. MN-1127 (Нилгинский комплекс); *в* – фенокристы Mn-содержащего энстатита-ферросилита в стекле прожилка паралавы в клинкере, обр. MN-1136 (Нилгинский комплекс); *з* – фенокристы клинопироксена и плагиоклаза, интерстиции между которыми заполнены силикатно-железистой фазой и магнетитом, обр. MN-1310 (вблизи карьера Тугруг, Нилгинский комплекс). Изображения в обратно-рассеянных электронах. Cpx – обогащенный Al клинопироксен, En-Fs – энстатит-ферросилит, Gl – стекло, Nph – нефелин (давидсмитит), Mgt – магнетит, Spl – минералы группы шпинели, Pl – плагиоклаз, Si-Fe – силикатно-железистая фаза.

Fig. 2. Matrix fragments of paralavas. *a* – plagioclase phenocryst in association with melilite, davidsmithite and magnetite, sample MN-1412 (Khamaryn-Khural-Khiid); *b* – Al-rich clinopyroxene microliths in plagioclase, sample MN-1127 (Nyalga complex); *v* – mn-containing enstatite-ferrosilite phenocrysts in glass vein of paralava in clinker, sample MN-1136 (Nyalga complex); *z* – Al-rich clinopyroxene and plagioclase phenocrysts interstitials between which are filled in silicate-ferruginous phase and magnetite, sample MN-1310 (near the Tugrug quarry, Nyalga complex). BSE images. Cpx – Al-rich clinopyroxene, En-Fs – enstatite-ferrosilite, Gl – glass, Nph – nepheline (david-smithite), Mgt – magnetite, Spl – minerals of the spinel group, Pl – plagioclase, Si-Fe – silicate-ferruginous phase.

Таблица 1. Составы минералов группы плагиоклаза (мас. %)
Table 1. Composition of plagioclase group minerals (wt %)

	Комплекс Хамарин-Хурал-Хид					Нилгинский комплекс			
	1420	1410		1406		1193	1136	1310	1275
	1 (8)	2 (4)	3 (2)	4 (14)	5 (6)	6 (14)	7 (5)	8 (20)	9 (17)
SiO ₂	46.52	48.91	52.68	48.27	54.87	43.35	62.93	45.69	47.32
Al ₂ O ₃	32.01	31.06	27.68	31.4	26.73	34.72	22.19	33.4	34.32
Fe ₂ O ₃	0.23	0.14	0.19	0.37	0.40	0.46	0.60	0.37	0.87
CaO	17.25	15.75	12.95	16.26	10.54	19.22	5.98	17.79	17.02
Na ₂ O	1.91	2.85	4.27	2.46	5.18	0.43	5.93	1.42	1.02
K ₂ O	—	—	0.17	—	0.24	0.02	1.38	0.22	0.15
BaO	—	—	—	—	—	0.48	—	—	—
SrO	1.19	—	—	—	—	0.50	—	—	—
Сумма	99.11	98.71	97.94	98.76	97.96	99.17	99.01	98.89	100.70
Коэффициенты в формулах (O = 8)									
Ca	0.87	0.78	0.64	0.81	0.52	0.97	0.29	0.89	0.83
Na	0.17	0.26	0.38	0.22	0.46	0.04	0.51	0.13	0.09
K			0.01		0.01		0.08	0.01	0.01
Ba						0.01			
Sr	0.03					0.01			
Fe ³⁺	0.01		0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.03
Сумма	1.08	1.04	1.04	1.04	1.01	1.05	0.90	1.04	0.96
Si	2.19	2.27	2.44	2.24	2.52	2.04	2.82	2.13	2.16
Al ^{IV}	1.78	1.70	1.51	1.72	1.45	1.92	1.17	1.84	1.84
Сумма	5.05	5.01	5.00	5.00	4.98	5.01	4.89	5.01	4.96
An	83.41	75.33	62.02	78.51	52.18	96.03	32.58	86.27	89.37
Ab	16.59	24.67	37.01	21.49	46.40	3.86	58.46	12.46	9.69
Or	0.00	0.00	0.97	0.00	1.42	0.11	8.96	1.27	0.94

Примечание. Здесь и далее номера образцов имеют префикс "MN-". После порядкового номера в скобках – количество СЭМ ЭДС анализов, по которым рассчитаны средние значения. Содержания минералов даны в мол. %. Прочерк – содержание компонента ниже предела обнаружения. 1, 7, 8 – битовнит; 2, 3 – зональные кристаллы с ядром битовнита и краевой зоной лабрадора; 4, 6 – андезин; 5 – анортит.

чество минала кушироита CaAlAlSiO₆ (Ks) и учитывалось положение точек составов на диаграмме (Si + Ti)⁴⁺ – Al³⁺ (рис. 4, в).

Клинопироксены в мелилит-нефелиновых паралавах Хамарин-Хурал-Хида соответствуют обогащенным Al диопсиду-геденбергиту с примесью минала кушироита до 42 мол. % при следующих вариациях минералов (мол. %): Wo 22–45, En 3–38, Fs 3–33, Ks 9–42 (рис. 4). В клинопироксенах содержание TiO₂ меньше 6 мас. %; только в обр. MN-1420 количество этого компонента достигает 12 мас. % (табл. 2, ан. 1). Концентрация Na₂O в клинопироксенах из всех разновидностей паралав меньше 2.8 мас. %. В обр. MN-1367 встречаются единичные зерна авгита CaNa(R²⁺Al)(SiAl)₂O₆ и пижонита CaR²⁺Si₂O₆, где R = Mg²⁺, Fe²⁺ (табл. 2, ан. 2). В краевой зоне фенокритов возрастает содержание FeO (до 20 мас. %), MnO (до 1.6 мас. %), снижается – MgO (Mg# от 0.47–0.81 до 0.13–0.4) и Al₂O₃ (табл. 2, ан. 3, 4). При этом точки составов клинопироксенов находятся преимущественно в поле геденбергита (рис. 4, а), а на диаграмме (Si + Ti)⁴⁺ – Al³⁺ располагаются в области (Si + Ti)⁴⁺ > 1.7 к. ф. (рис. 4, в). В энстатите-ферросилите (En_{42–61}) из плагиоклаз-пироксеновой паралавы (обр. MN-1406) количество минералов Wo и Ks не превышает 8 мол. % (табл. 2, ан. 5, рис. 4).

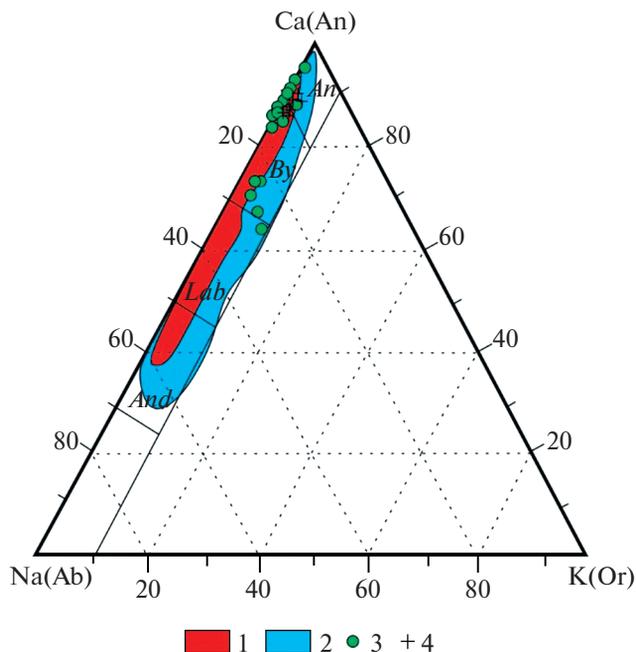


Рис. 3. Ca–K–Na диаграмма состава плагиоклаза. 1 – паралавы Хамарин-Хурал-Хида; 2 – паралавы Нилгинского комплекса; 3 – плагиоклаз-пироксеновая (обр. MN-1310) паралава вблизи карьера Тугруг; 4 – плагиоклаз-пироксен-индиалитовые (обр. MN-1275, MN-1276, MN-1277) паралавы вблизи карьера Тугруг. An – анортит, By – битовнит, Lab – лабрадор, And – андезин.

Fig. 3. Ca–K–Na diagram of plagioclase composition. 1 – paralavas of the Khamaryn-Khural-Khiid complex; 2 – paralavas of the Nyalga complex; 3 – plagioclase-pyroxene (sample MN-1310) paralava near the Tugrug quarry; 4 – plagioclase-pyroxene-indialite (samples MN-1275, MN-1276, MN-1277) paralavas near the Tugrug quarry. An – anortite, By – bytownite, Lab – labrador, And – andesine.

Клинопироксены в паралавах Нилгинского комплекса встречаются в виде фенокристов размером до 0.5 мм и микролитов (рис. 2, б). Большинство составов клинопироксенов из мелилит-нефелиновых паралав соответствует обогащенным Al диоспиду-геденбергиту при следующих вариациях миналов (мол. %): Wo 23–41, En 0–49, Fs 0–55, Ks 4–49 (рис. 4, а). Содержание TiO_2 редко превышает 2–3 мас. %. Для фенокристов клинопироксенов характерно зональное строение: их центральные части обогащены магнием (Mg# 0.7–0.75) и глиноземом (Al_2O_3 до 15–17 мас. %), краевые – обеднены магнием (Mg# 0.19–0.5) и глиноземом (7–13 мас. % Al_2O_3 , табл. 2, ан. 6, 7). Точки состава зональных фенокристов клинопироксена на диаграмме Wo–En–Fs так же, как и для комплекса Хамарин-Хурал-Хид, образуют тренд от диоспида с высоким содержанием минала Ks до геденбергита (рис. 4). Клинопироксен из паралав Нилгинского комплекса содержит 1.4 – 2 к. ф. $(Si + Ti)^{4+}$ и 0.8 – 0.03 к. ф. Al (рис. 4, в).

Пироксены из плагиоклаз-пироксеновых прожилков в клинкере (обр. MN-1129 и MN-1177) характеризуются большими вариациями состава. Матрикс прожилков содержит зональные фенокристы обогащенного Al диоспида-геденбергита, единичные зерна пижонита и авгита, а вблизи обособлений кислого алюмосиликатного стекла с реликтами оплавленных зерен детритового кварца и микролитов новообразованного индиалита встречаются тонкоигольчатые кристаллы энстатита-ферросилита, содер-

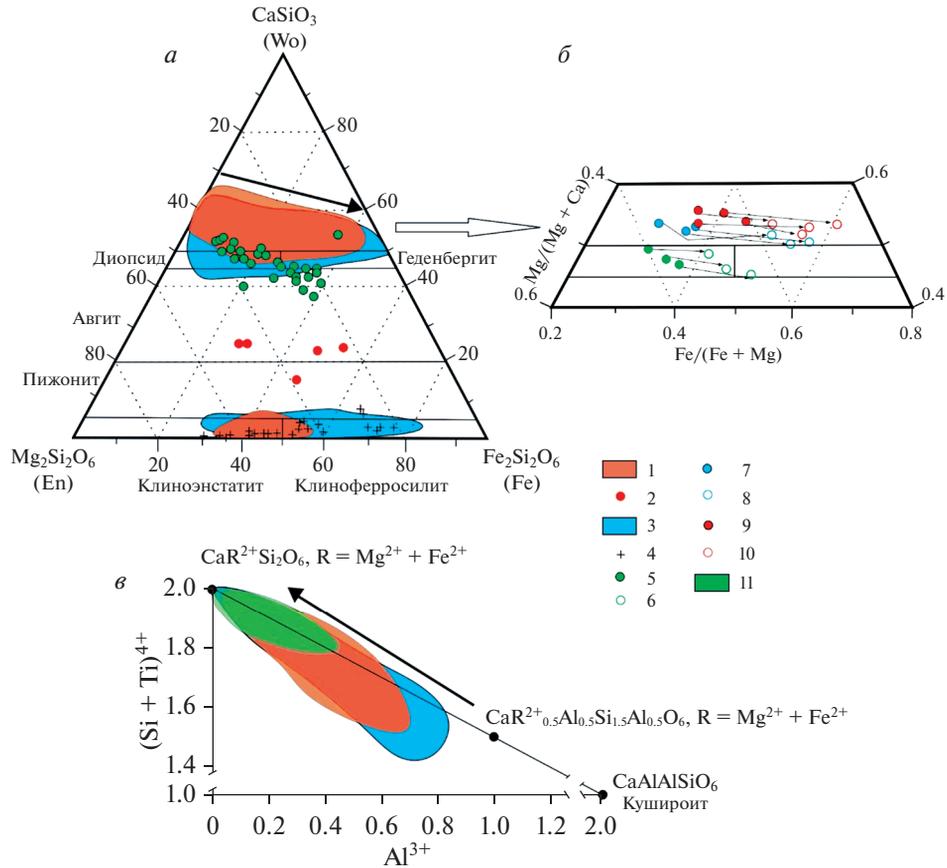


Рис. 4. Эволюция состава клинопироксена: (а) классификационная диаграмма Wo–En–Fs, (б) вариации состава зональных фенокристов обогащенного Al клинопироксена в паралавах, (в) эволюция состава клинопироксена на диаграмме $(\text{Si} + \text{Ti})^{4+} - \text{Al}^{3+}$. 1, 2 – паралавы Хамарин-Хурал-Хида; 3 – паралавы Нилгинского комплекса; 4, 5, 6, 11 – плагиоклаз-пироксен-индиалитовая и плагиоклаз-пироксеновая паралавы вблизи карьера Тугруг; 7, 8 – Нилгинский комплекс; 9, 10 – Хамарин-Хурал-Хид. Стрелками на диаграммах показано изменение состава от центральной к краевой зонам фенокристов.

Fig. 4. Composition evolution of clinopyroxene: (a) classification diagram Wo–En–Fs, (b) composition variations of Al-rich clinopyroxene zonal phenocrysts in paralavas, (c) clinopyroxene composition fields on the diagram $(\text{Si} + \text{Ti})^{4+} - \text{Al}^{3+}$. 1, 2 – paralavas of the Khamaryn-Khural-Khiid; 3 – paralavas of the Nyalga complex; 4, 5, 6, 11 – plagioclase-pyroxene-indialite paralavas near the Tugrug quarry; 7, 8 – the Nyalga complex; 9, 10 – the Khamaryn-Khural-Khiid. Arrows show evolution from central to external phenocryst zones.

жащих до 3.2 мас. % CaO (табл. 2, ан. 8). Энстатит-ферросилит в прожилках обогащенной пироксеном паралавы (обр. MN-1136, MN-1137) характеризуется высокой концентрацией MnO (4.5–24 мас. %, табл. 2, ан. 9, рис. 2, в).

В плагиоклаз-пироксеновой паралаве (обр. MN-1310) клинопироксены образуют зерна неправильной формы размером до 100 мкм и представлены Al-содержащими диопсидом-геденбергитом со следующими вариациями миналов (мол. %): Wo 31–43, En 8.5–38, Fs 7–49, Ks 3.5–20. Хорошо проявлена зональность от центра к краю зерен:

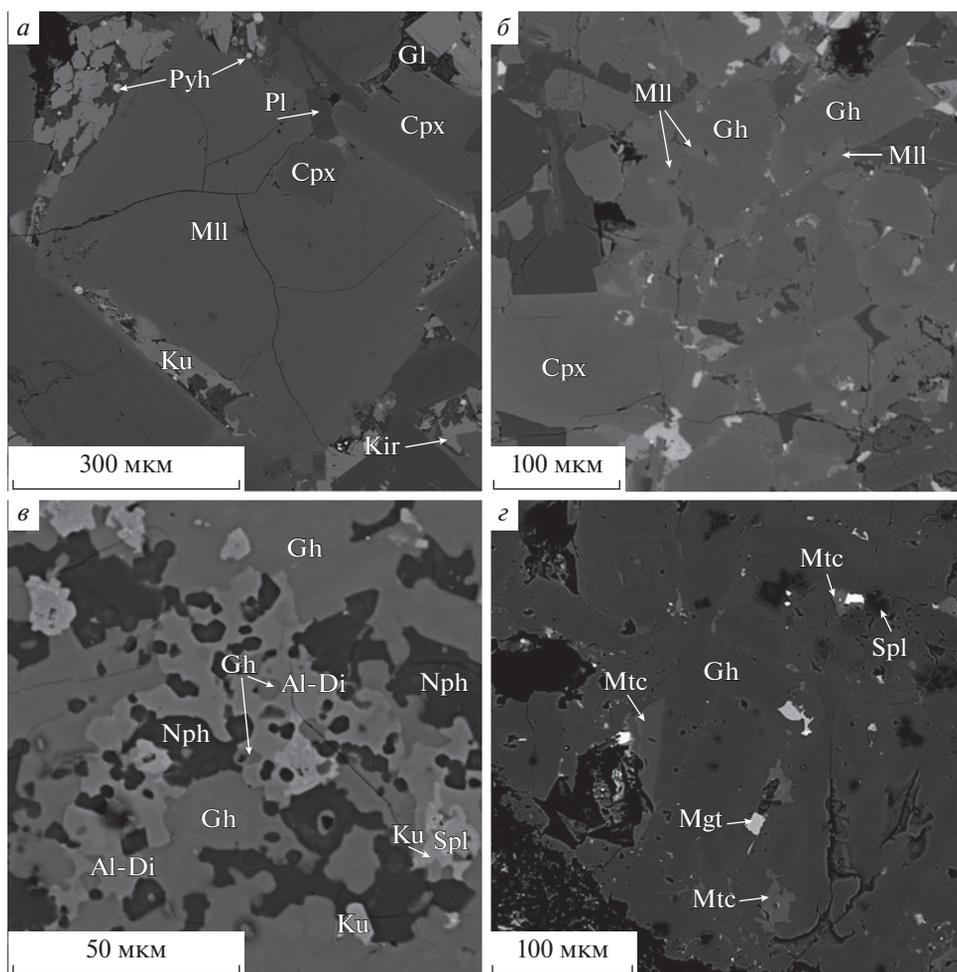
содержание FeO увеличивается от 5–11 до 22 мас. % на фоне уменьшения содержаний Al_2O_3 и MgO (табл. 2, ан. 10, 11, рис. 4, б). Энстатит-ферросилит в плагиоклаз-пироксен-индиалитовой паралаве (обр. MN-1275, MN-1276 и MN-1277) образуют тонкоигольчатые кристаллы следующего состава (мол. %): Wo < 1, En 13–55, Fs 24–71, Ks 9–19 (рис. 4, а). Клинопироксены содержат примеси (мас. %): K_2O < 1.1, Cr_2O_3 < 0.3, V_2O_3 < 0.4, P_2O_5 < 0.8, SO_3 < 0.7 (табл. 2, ан. 12), а на диаграмме $(Si + Ti)^{4+} - Al^{3+}$ точки их составов при сумме $(Si + Ti)^{4+} > 1.8$ к. ф. находятся вблизи минала $CaR^{2+}Si_2O_6$.

Минералы группы мелилита образуют фенокристы размером до 0.5 мм (рис. 5, а). В паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид они характеризуются значительными вариациями состава (мас. %): SiO_2 21–44, CaO 22–43, Na_2O < 5.7, TiO_2 < 1.8, MnO < 1.2. В программном комплексе CRYSTAL (Перетяжко, 1996) масс-балансовым методом с минимальными невязками по формульным коэффициентам были рассчитаны составы мелилита на пять миналов: акерманит $Ca_2MgSi_2O_7$ (Ak), алюмоакерманит $CaNaAlSi_2O_7$ (Aåk), геленит $Ca_2AlAlSiO_7$ (Gh), $Ca_2Fe^{2+}Si_2O_7$ (Fe2-Ak) и $CaNaFe^{3+}Si_2O_7$ (Fe3-Ak) (табл. 3). Диапазон концентраций миналов в изученных минералах следующей (мол. %): Gh 4–92, Ak 13–58, Aåk 0–54, Fe2-Ak 0–34, Fe3-Ak 0–21 (рис. 6, а, 7). Преобладают миналы Ak, Aåk и Gh, сумма которых в большинстве анализов превышает 90 мол. % (табл. 3, ан. 1) при магнезиальности Mg# 0.3–1.0 (в среднем 0.7–0.8).

В образцах паралав MN-1367, MN-1411, MN-1419 и MN-1425 фенокристы минералов группы мелилита от центра к краю становятся более железистыми, менее глиноземистыми (рис. 6, б; 7, б) и содержат (мол. %): в центральной зоне 19–40 Gh и 4–9 Fe2-Ak, в краевой – 9–15 Gh и 17–29 Fe2-Ak (табл. 3, ан. 2, 3). В образцах мелилит-нефелиновой паралавы MN-1410, MN-1411, MN-1420 и MN-1425, наряду с породообразующими железистыми акерманитом и алюмоакерманитом, в реликтах ксенолитов мергелистого известняка находятся геленит (Gh 43–92 мол. %, табл. 3, ан. 4), промежуточные члены ряда монтичеллит–кирштейнит, перовскит, обогащенная Al шпинель (обр.

Рис. 5. Фрагменты матрикса мелилит-нефелиновых паралав и реликтов ксенолитов мергелистого известняка. а – фенокристы мелилита, клинопироксена и плагиоклаза, интерстиции между которыми заполнены стеклом с включениями куратита, кирштейнита, пирротина, обр. MN-1127 (Нилгинский комплекс); б – фенокристы с геленитом в центральной зоне и каймой железистого акерманита-алюмоакерманита, обр. MN-1425 (Хамарин-Хурал-Хид); в – фрагмент реликта ксенолита осадочной породы, сложенного геленитом и обогащенным Al диопсидом, обр. MN-1411 (Хамарин-Хурал-Хид); г – фрагмент реликта ксенолита мергелистого известняка, сложенного геленитом с включениями монтичеллита-кирштейнита, магнетита и шпинели, обр. MN-1133 (Нилгинский комплекс). Al-Di – обогащенный Al диопсид, Gh – геленит, Gl – стекло, Mll – железистый акерманит-алюмоакерманит, Kir – кирштейнит, Mtc – минералы ряда монтичеллит–кирштейнит, Ku – куратит, Pyh – пирротин. Остальные обозначения см. на рис. 3. Изображения в обратно-рассеянных электронах.

Fig. 5. Matrix fragments of melilite-nepheline paralavas and remnant xenoliths of marly limestone. а – phenocrysts of melilite, clinopyroxene and plagioclase interstitials between which are filled by glass with inclusions of kuratite, kirschsteinite, pyrrhotite, sample MN-1127 (Nyalga complex); б – phenocrysts with gehlenite in the central zone and Fe-rich akermanite-alumoakermanite in the rim, sample MN-1425 (Khamaryn-Khural-Khiid); в – fragment of remnant xenolith of marly limestone consisting of gehlenite and Al-rich diopside, sample MN-1411 (Khamaryn-Khural-Khiid); г – fragment of remnant of marly limestone containing of gehlenite with inclusions of minerals of the monticellite–kirschsteinite series, magnetite and spinel, sample MN-1133 (Nyalga complex). Al-Di – Al-rich diopside, Gh – gehlenite, Gl – glass, Mll – Fe-rich akermanite-alumoakermanite, Kir – kirschsteinite, Mtc – minerals of the monticellite–kirschsteinite series, Ku – kuratite, Pyh – pyrrhotite. Other designations see on the Fig. 3. BSE images.



MN-1410, MN-1420 и MN-1425), диопсид (обр. MN-1411, рис. 5, в), содержащий до 42 мол. % Ks.

Минералы группы мелилита Нилгинских паралав имеют следующие вариации состава (мол. %): Gh 0–80, Ak 10–83, Aak 0–45, Fe2-Ak 0–44, Fe3-Ak 0–23 (табл. 3, ан. 5; рис. 6, а, 7). Преобладают магниальные разновидности (Mg# 0.7–0.8). В качестве примесей иногда отмечаются MnO (до 3.1 мас. %) и K₂O (до 1.4 мас. %). В обр. MN-1133 встречаются фенокристы мелилитов, содержащие до 1.4 мас. % BaO и до 1.4 мас. % SrO (табл. 3, ан. 6). Зональные фенокристы мелилитов, в которых от центра к краю повышается содержание Fe и снижается – Al, встречаются во всех паралавах Нилгинского комплекса (рис. 6, б). Такие мелилиты содержат (мол. %): Fe2-Ak 4–20, Gh 15–47 в центральной и Fe2-Ak 24–36, Gh 8–11 в краевой зонах (табл. 3, ан. 7, 8). В образцах паралав MN-1133, MN-1176, MN-1193, MN-1279, MN-1234 и MN-1185 также встречаются реликты ксенолитов мергелистого известняка, сложенные геленитом, содержащим до 80 мол. % Gh (табл. 3, ан. 9), перовскитом, шпинелью, промежуточными членами ряда монтчеллит–кирштейнит и кальцитом (рис. 5, з).

Таблица 2. Составы минералов группы пироксена (мас. %)
Table 2. Compositions of pyroxene group minerals (wt %)

	Комплекс Хамарин-Хурал-Хид					Нилгинский комплекс						
	1420	1367	1425		1406	1128		1177	1136	1310		1275
	1 (5)	2(3)	3(4)	4(4)	5(43)	6(16)	7(19)	8(6)	9(35)	10 (8)	11 (4)	12(24)
SiO ₂	42.23	49.05	42.49	43.64	50.05	42.34	42.42	50.10	45.33	48.99	48.46	47.80
TiO ₂	9.66	0.84	2.64	2.40	1.20	1.78	1.64	1.31	0.05	1.69	1.64	1.69
Al ₂ O ₃	9.89	3.41	10.34	6.90	2.08	13.27	12.37	2.50	4.78	5.30	3.56	7.03
FeO	0.00	19.81	2.31	10.86	25.28	4.72	8.33	25.89	24.73	8.57	15.40	25.24
Fe ₂ O ₃	1.84	2.61	9.61	10.01	3.11	3.91	4.09	1.42	3.44	0.30	0.65	0.00
MnO	0.99	0.54	0.20	0.58	0.62	0.00	0.27	0.47	13.98	0.24	0.66	0.56
MgO	10.72	13.37	7.96	3.67	17.37	9.19	7.21	17.61	8.10	12.31	9.55	16.03
CaO	22.76	11.88	23.62	22.93	1.19	24.20	23.85	1.86	0.54	22.65	20.50	0.84
K ₂ O												0.30
Cr ₂ O ₃												0.13
V ₂ O ₃												0.21
Сумма	98.09	101.50	99.15	100.99	100.90	99.41	100.16	101.14	100.95	100.05	100.41	99.84
Формульные коэффициенты (O = 6)												
Ca	0.92	0.48	0.97	0.96	0.05	0.98	0.97	0.08	0.02	0.91	0.84	0.03
Fe ²⁺	0.00	0.63	0.07	0.35	0.80	0.15	0.27	0.82	0.84	0.27	0.50	0.80
Fe ³⁺	0.05	0.07	0.28	0.29	0.09	0.11	0.12	0.04	0.10	0.01	0.02	0.00
Mn	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.48	0.01	0.02	0.02
Mg	0.60	0.76	0.45	0.21	0.98	0.52	0.41	0.99	0.49	0.69	0.55	0.91
Al _{VI}	0.02	0.02	0.09	0.02		0.19	0.17	0.01	0.06	0.07	0.02	0.14
Ti	0.27	0.02	0.08	0.07	0.03	0.05	0.05	0.04	0.00	0.05	0.05	0.05
K												0.014
Cr												0.004
V												0.007
Сумма	1.90	2.00	1.93	1.92	1.98	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	2.00	1.98
Si	1.59	1.86	1.62	1.70	1.90	1.60	1.62	1.90	1.83	1.83	1.86	1.82
Al _{IV}	0.41	0.14	0.38	0.30	0.09	0.40	0.38	0.10	0.17	0.17	0.14	0.18
Сумма	3.90	4.02	3.93	3.92	3.97	4.00	4.00	3.99	4.00	4.00	4.00	3.98
Wo	35.08	19.34	34.81	38.47	0.00	32.24	32.97	0.57	0.22	39.11	37.66	0.00
En	32.73	37.33	22.18	10.59	49.43	24.73	19.46	49.79	31.02	34.38	27.40	45.58
Fs	5.32	34.68	17.01	32.29	44.85	11.86	18.11	43.08	53.69	13.85	25.74	40.28
Ks	26.88	8.65	26.00	18.64	5.72	31.17	29.46	6.55	15.07	12.66	9.20	14.14
Mg#	0.92	0.52	0.56	0.25	0.52	0.67	0.52	0.54	0.34	0.71	0.52	0.53

Примечание. 1 – обогащенный титаном диопсид; 2 – авгит; 3, 4, 6, 7, 10, 11 – зональные зерна с ядром диопсида и краевой зоной геденбергита; 5, 8, 9, 12 – энстатит-ферросилит.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Клинопироксены и основные плагиоклазы являются наиболее распространенными породообразующими минералами паралав во многих пирометаморфических комплексах. Например, наряду с фаялитом и Ti-магнетитом, они слагают минеральные

Таблица 3. Составы минералов группы мелилита (мас. %)
Table 3. Compositions of melilite group minerals (wt %)

	Комплекс Хамарин-Хурал-Хид				Нилгинский комплекс				
	1410	1419		1410	1193	1133	1127		1234
	1 (7)	2 (12)	3 (9)	4 (10)	5 (9)	6 (2)	7 (8)	8 (4)	9 (4)
SiO ₂	42.81	39.17	41.78	25.75	40.84	41.41	39.76	40.94	30.84
Al ₂ O ₃	8.59	14.41	9.60	27.61	6.66	3.24	9.09	7.62	20.64
FeO	1.92	1.28	5.12	1.13	2.87	1.32	4.37	8.31	0.85
Fe ₂ O ₃	0.71	1.48	2.16	1.83	0.26	1.53	0.41	0.26	2.20
MnO	0.06	—	0.35	0.17	—	—	—	—	0.13
MgO	6.98	5.33	4.25	2.40	9.22	11.00	7.16	5.26	5.31
CaO	34.90	35.97	33.80	38.06	39.15	37.37	36.56	35.02	40.37
Na ₂ O	3.94	3.61	4.30	0.46	1.22	1.03	2.00	2.49	0.39
BaO	—	—	—	—	—	1.31	—	—	—
SrO	—	—	—	—	—	1.25	—	—	—
Сумма	99.82	101.11	101.17	97.42	100.07	99.44	99.31	99.86	100.49

Формульные коэффициенты (O = 7)

Ca	1.69	1.72	1.64	1.92	1.92	1.87	1.81	1.75	1.98
Na	0.35	0.31	0.38	0.04	0.11	0.09	0.18	0.23	0.03
Fe ²⁺	0.07	0.05	0.19	0.05	0.11	0.05	0.17	0.32	0.03
Fe ³⁺	0.02	0.05	0.07	0.07	0.01	0.05	0.01	0.01	0.08
Mn			0.01	0.01					0.01
Mg	0.47	0.36	0.29	0.17	0.63	0.77	0.49	0.37	0.36
Al _{VI}	0.39	0.51	0.41	0.75	0.23	0.11	0.33	0.32	0.52
Ba						0.02			
Sr						0.03			
Сумма	2.99	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.99	3.01
Si	1.94	1.75	1.90	1.22	1.87	1.93	1.84	1.91	1.41
Al _{IV}	0.06	0.25	0.10	0.79	0.13	0.07	0.16	0.09	0.59
Сумма	4.99	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.99	4.99	5.01
Ak	49.20	37.37	30.41	14.63	64.09	76.89	48.93	35.65	36.13
Aāk	30.73	24.78	29.49	0.00	8.72	5.46	17.00	23.06	0.00
Gh	7.75	25.81	11.16	71.70	13.76	6.37	16.17	9.21	56.29
Fe2-Ak	9.44	6.62	21.09	6.78	12.21	5.54	16.53	31.50	3.21
Fe3-Ak	2.89	5.42	7.85	6.89	1.22	5.74	1.30	0.58	4.36
Mg#	0.83	0.78	0.52	0.61	0.84	0.88	0.73	0.52	0.77

Примечание. 1, 5, 6 – акерманит; 2, 3, 7, 8 – зональные зерна акерманита с ядром существенно глиноземистого состава (2, 7) и краевой более железистой зоной (3, 8); 4, 9 – геленит.

ассоциации парабазальтов (железистых паралав) Челябинского угольного бассейна (Пирогенный..., 2005), паралав угольной провинции Шанхи (Shanxi) в Китае (Grapes, 2009) и Кендерлыкской впадины в Казахстане (Калугин и др., 1991).

Паралавы монгольских пирометаморфических комплексов схожи по минеральному составу и особенностям эволюции состава породообразующих минералов. Согласно

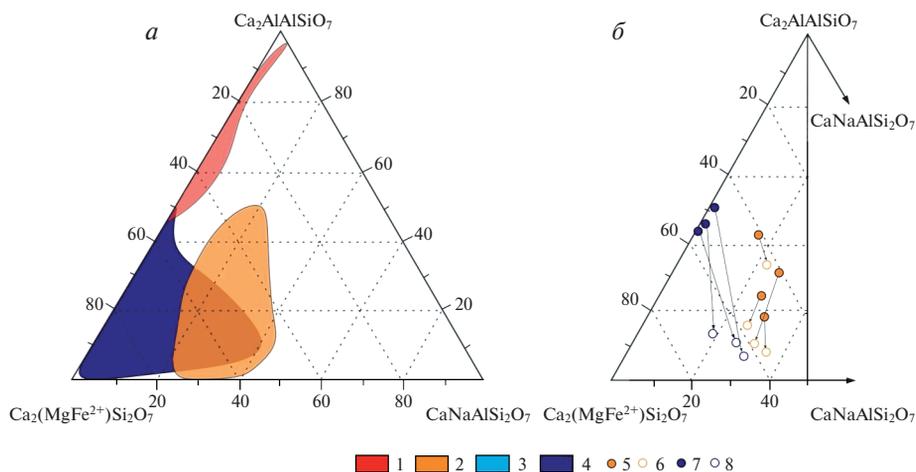


Рис. 6. Вариации состава минералов группы мелилита: *a* – мелилит из паралав и реликтов ксенолитов осадочных карбонатно-силикатных пород; *б* – вариации состава зональных фенокристов. 1, 2 – Хамарин-Хурал-Хид; 3, 4 – Нилгинский комплекс; 5, 6 – Хамарин-Хурал-Хид; 7, 8 – Нилгинский комплекс. Стрелками на диаграмме (*б*) показано изменение состава от центральной к краевой зонам фенокристов.

Fig. 6. Composition variations of melilite group minerals: *a* – melilite from paralava matrix and remnant xenoliths of carbonate-silicate sedimentary rocks; *b* – composition variations of zonal phenocrysts. 1, 2 – Khamaryn-Khural-Khiid; 3, 4 – Nyalga complex; 5, 6 – Khamaryn-Khural-Khiid; 7, 8 – Nyalga complex. Arrows on the diagram (*b*) show evolution from the central to the external phenocryst zones.

по петрографическим наблюдениям и данным СЭМ ЭДС, первыми при формировании мелилит-нефелиновых паралав кристаллизовались зерна (микролиты) минералов группы шпинели с большими вариациями содержаний Fe, Al и Mg (Нилгинский комплекс, Перетяжко и др., 2018), а также фосфиды Fe (Хамарин-Хурал-Хид, Савина и др., 2020). После этого образовалась ассоциация фенокристов основных плагиоклазов, минералов группы мелилита и обогащенных Al клинопироксенов (диопсида-геденбергита). Кроме преобладающих мелилит-нефелиновых паралав, встречаются плагиоклаз-пироксен ± индиалитовые паралавы с породообразующим ортопироксеном (энстатитом-ферросилитом), промежуточные по валовому составу между мелилит-нефелиновыми паралавами и клинкерами. Разнообразие минеральных ассоциаций пирогенных пород, сформированных в результате высокотемпературных и низкотемпературных преобразований карбонатно-силикатных осадочных протолитов, является следствием больших вариаций состава осадочных толщ, а также локальных различий условий плавления и кристаллизации пирогенных силикатных расплавов (Peretyazhko et al., 2021).

Плагиоклазы мелилит-нефелиновых паралав представлены, в основном, анортитом и лабрадором. Редкие обособления андезина обнаружены только в ксенолитах клинкера, захваченных расплавом паралав.

Клинопироксены по составу отвечают промежуточным членам ряда диопсид–геденбергит со значительной примесью минала кушироита. Большинство их фенокристов имеет зональное строение: центральные зоны более магниезильные и глиноземистые по сравнению с краевыми, обогащенными Fe и Mn. Ранее клинопироксен близкого состава с общей формулой $(Ca,Na)(Mg,Fe^{2+},Al,Fe^{3+},Ti)(Si,Al)_2O_6$ назывался фассаитом. Этот минерал дискредитирован IMA (Morimoto, 1989) и теперь должен называться Al-содержащим (обогащенным Al) диопсидом или авгитом. Такой клинопи-

роксен часто встречается в метеоритах (Blander, Fuchs, 1975; Hazen, Finger, 1977), зонах контактового метаморфизма (Owen, 2000; Пушкарев и др., 2004; Pascal et al., 2005), в ксенолитах пироксенитов (Калашникова и др., 2015) и эклогитов из кимберлитов (Agashev et al., 2018), в карбонатитах (Cundari, 1982) и пирогенных породах. К редким, богатым алюминием разновидностям кальциевого клинопироксена, имеющим статус самостоятельного минерала или минала, относятся эссениит $\text{CaFe}^{3+}\text{AlSiO}_6$ (Cosca, Peacor, 1987), гроссманиит $\text{CaTi}^{3+}\text{AlSiO}_6$ (Ma, Rossman, 2009) и кушироит CaAlAlSiO_6 . Первая и пока единственная находка кушироита, содержащего 40–42 мас. % Al_2O_3 , была описана в хондрите ALH 85085 CH (Kimura et al., 2009). Обогащенный Al клинопироксен в мелилит-нефелиновых паралавах близок по составу к таковому в парабазальтах (Пирогенный..., 2005), битуминозных (Kruszewski et al., 2018) и пирометаллургических шлаках (Warchulski et al., 2016), но имеет отличительную особенность для пирогенных пород – в среднем более высокую глиноземистость при содержании минала кушироита до 49 мол. % ($\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 20$ мас. %).

Энстатит-ферросилит слагает матрикс плагиоклаз-пироксеновой (Хамарин-Хурал-Хид) и плагиоклаз-пироксен-индиалитовой (Нилгинский комплекс) паралав, а также является главным минералом обогащенной пироксеном паралавы (обр. MN-1136, MN-1137) в прожилках из клинкеров Нилгинского комплекса. Содержание MnO в энстатите-ферросилите из такой паралавы достигает 24 мас. % (обр. MN-1136, табл. 2, ан. 9). Марганцевые пироксены встречаются крайне редко. Единственная находка ромбического донпикорита $(\text{MnMg})\text{MgSi}_2\text{O}_6$ описана в мраморах (Petersen et al., 1984), а моноклинный каноит $\text{Mn}(\text{MgMn})\text{Si}_2\text{O}_6$ обнаружен только в метаморфических породах (Kobayashi, 1977; Gnos et al., 1996; Saldgo et al., 2019).

Минералы группы мелилита разнообразны по составу. Минералы ряда геленит–акерманит кристаллизуются в мелитолитах (Storpa, Sharygin, 2009), но более всего характерны для карбонатно-силикатных осадочных пород, метаморфизованных в условиях спуррит-мервинитовой фации, например, в зоне контакта мергелистых известняков и траппов базальтов (Сокол и др., 2019; Десятярова, 2022). Акерманит и железистый акерманит являются породообразующими в ультраосновных вулканических породах (Melluso et al., 2010; Николаева, 2014; Lustrino et al., 2020) и в пирометаллургических шлаках (Warchulski et al., 2016). Аллюмоакерманит обнаружен в мелилит-нефелиновых туфах вулкана Олдоиньо Ленгаи (Wiedenmann et al., 2009). Минерал группы мелилита, содержащий более 40 мас. % Fe_2O_3 , встречается в породах пирометаморфического комплекса Баффало (Foit et al., 1987), а бариевый мелилит – беннешерит $\text{Ba}_2\text{Fe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_7$ недавно открыт в пирогенных породах комплекса Хатрурим (Krzatała et al., 2022).

Минералы группы мелилита из монгольских паралав близки по составу и особенностям эволюции. Паралавы содержат железистый акерманит-аллюмоакерманит с небольшой примесью минала геленита ($\text{Si} > 1.5\text{--}1.6$ к. ф., Gh 3–18 мол. %, рис. 7). Иногда встречаются зональные фенокристы, в центральном (реликтовом) ядре которых содержится до 40–47 мол. % Gh. Геленит (Gh > 70 мол. %) в ассоциации с обогащенным Al диопсидом, промежуточными членами ряда монтичеллит–кирштейнит, перовскитом, кальцитом и другими минералами обнаружен только в реликтах ксенолитов мергелистого известняка. Большое разнообразие состава минералов группы мелилита пирометаморфического и контактово-метаморфического генезиса отличает их от таковых в магматических и техногенных породах. Мелилиты из вулканических пород и пирометаллургических шлаков обычно содержат Si в количестве ~2 к. ф. и точки их составов на диаграмме $\text{Si}^{4+}\text{--Al}^{3+}$ располагаются между миналами $(\text{CaNa})\text{RSi}_2\text{O}_7$ и аллюмоакерманита (рис. 7). Для мелилитов пирометаморфических и контактово-метаморфических пород характерна эволюция состава от геленита до железистого акерманита-аллюмоакерманита (рис. 7). Только в образце паралавы MN-1133 (Нилгинский

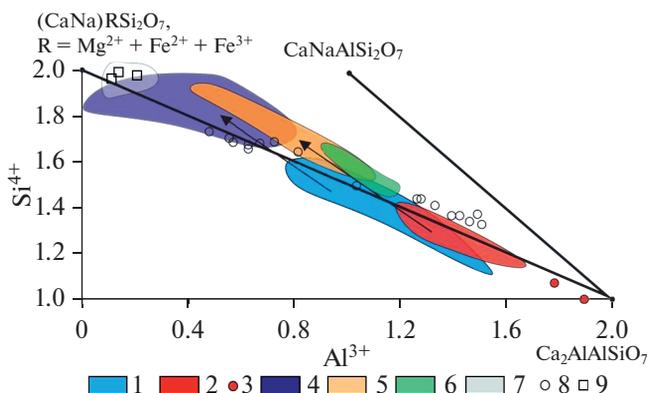


Рис. 7. Эволюция состава мелилита на диаграмме $\text{Si}^{4+}-\text{Al}^{3+}$. 1, 2 – геленит из центральной зоны фенокристов в паралавах Нилгинского комплекса (1) и Хамарин-Хурал-Хида (2); 3 – геленит, содержащий 88–92 мол. % Gh, из реликта ксенолита мергелистого известняка, обр. MN-1410 (Хамарин-Хурал-Хид); 4, 5 – фенокристы мелилита из паралав Нилгинского комплекса (4) и Хамарин-Хурал-Хида (5); 6 – мелилит из вулканических пород (по: Николаева, 2014; Lustrino et al., 2020); 7 – мелилит из мелитолитов (по: Stoppa, Sharygin, 2009); 8 – мелилит из мраморизованных мергелистых известняков в зоне контакта с базальтами (по: Девятиярова, 2022); 9 – мелилит из пирометаллургических шлаков (по: Warchulski et al., 2016). $(\text{CaNa})\text{RSi}_2\text{O}_7$ – сумма миналов $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_7$ и $\text{CaNaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_7$.

Fig. 7. Evolution of melilite composition on the diagram $\text{Si}^{4+}-\text{Al}^{3+}$. 1, 2 – gehlenite from central zone of phenocrysts in paralavas of the Nyalga complex (1) and Khamaryn-Khural-Khiid (2); 3 – gehlenite containing 88–92 mol. % of Gh end-member from the remnant xenolith of marly limestone, sample MN-1410 (Khamaryn-Khural-Khiid); 4, 5 – melilite phenocrysts from paralavas of the Nyalga complex (4) and Khamaryn-Khural-Khiid (5); 6 – melilite from volcanic rocks (after Nikolaeva, 2014; Lustrino et al., 2020); 7 – melilite from melitolites (after Stoppa, Sharygin, 2009); 8 – melilite from marbled marl limestones in the contact zone with basalts (after Deviatyayrova, 2022); 9 – melilite from pyrometallurgical slags (after Warchulski et al., 2016). $(\text{CaNa})\text{RSi}_2\text{O}_7$ – sum of end-members $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$, $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_7$, and $\text{CaNaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_7$.

комплeкс) встречаются фенокристы мелилита с примесью Ba и Sr (табл. 3, ан. 6), состав которых относится, вероятно, к изоморфному ряду между железистым акерманитом и Sr-содержащим беннешеритом.

Хорошо проявленные тренды изменения составов мелилитов и клинопироксенов ряда диопсид–геденбергита, содержащих до 49 мол. % Ks, направленные от центра к краевым зонам фенокристов при значительном снижении их глиноземистости (рис. 4, б, 6, б, 7), а также наличие реликтов ксенолитов мергелистого известняка с геленитом, содержащим до 92 мол. % Gh, отличают породообразующие минеральные ассоциации монгольских паралав от таковых из других пирометаморфических комплексов.

Большое разнообразие паралав и плавленых пород связаны с литологией (составом) осадочных протолитов и локальными условиями полистадийных процессов формирования пирометаморфических комплексов Монголии. Минеральная ассоциация геленита и обогащенных Al диопсида-геденбергита в мергелистых известняках образовалась на стадии высокотемпературного и низкобарического метаморфизма осадочного протолита (Савина и др., 2020; Peretyazhko et al., 2021). Повышение температуры осадочной толщи, вызванное подземными угольными пожарами, происходило при относительно высоком парциальном давлении CO_2 в P - T условиях, препятствующих разложению кальцита. Предполагается, что в результате инконгруэнтного плавления

термически метаморфизованного мергелистого известняка при $T > 1100$ °С плавился К-На полевой шпат, а при $T > 1250$ °С – кальцит, минералы групп мелилита и клинопироксена, другие тугоплавкие минералы, что привело к образованию несмесимых расплавов – карбонатного ($\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$) и нескольких силикатных с большими вариациями состава (Peretyazhko et al., 2021). После слияния (коалесценции) силикатных расплавов образовался недосыщенный по кремнезему и обогащенный Са расплав, из которого формировались мелилит-нефелиновые паралавы. В локальных областях таких пород сохранились зерна геленита, которые обрастали железистым акерманитом-алюмоакерманитом, формируя зональные фенокристы (рис. 5, б), а также реликты ксенолитов мергелистого известняка, содержащие геленит (рис. 5, в, 5, г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пирометаморфических комплексах Монголии среди паралав преобладают разновидности, сложенные основными плагиоклазами, клинопироксенами ряда диопсид–геденбергит, содержащими до 49 мол. % Ks, железистым акерманитом-алюмоакерманитом, нефелином. Реже встречаются плагиоклаз–пироксеновая и плагиоклаз–пироксен–индиалитовая паралавы с породообразующими энстатитом–ферросилитом. Большое разнообразие пирогенных пород и слагающих их минеральных ассоциаций является следствием значительных вариаций состава протолитов пирометаморфических комплексов Монголии, локальных условий термических трансформаций и частично-го плавления осадочных пород, а также кинетики кристаллизации пирогенных силикатных расплавов. Минеральные ассоциации в реликтах ксенолитов мергелистого известняка, сложенные геленитом, обогащенным Al диопсидом–геденбергитом, минералами ряда монтичеллит–кирштейнит, перовскитом, шпинелью и другими более редкими минералами, формировались в результате высокотемпературного метаморфизма карбонатно–силикатных пород осадочных толщ и последующего реакционного взаимодействия ксенолитов с пирогенными силикатными расплавами разного состава.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 23-27-00031.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Глушкова В.Е., Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Минералы группы оливина в мелилит-нефелиновых паралавах пирометаморфических комплексов Монголии // ЗРМО. **2023**. № 1. С. 61–77.
- Девятярова А.С. Кочумдекский контактовый ореол спуррит-мервинитового метаморфизма: минералогия, геохимические особенности, история становления. Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. Новосибирск, **2022**. 22 с.
- Калашникова Т.В., Соловьева Л.В., Костровицкий С.И. Сравнительная характеристика состава минералов из ксенолитов кимберлитовых трубок “Обнаженная” и “Удачная” // Изв. СО Секции наук о Земле РАЕН. Геол., поиски и разведка рудн. месторождений. **2015**. Т. 53. № 4. С. 7–20.
- Калугин И.А., Третьяков Г.А., Бобров В.А. Железорудные базальты в горелых породах Восточного Казахстана. Новосибирск: Наука, **1991**. 80 с.
- Николаева А.Т. Петрология мелилитсодержащих пород вулканов Купаэлло и Колле Фаббри (Центральная Италия). Автореф. дис. ... канд. г.-м. н. Новосибирск, **2014**. 23 с.
- Перетяжко И.С. CRYSTAL – прикладное программное обеспечение для минералогов, петрологов, геохимиков // ЗРМО. **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.
- Пирогенный метаморфизм / Ред. Э.В. Сокол, Н.В. Максимова, Е.Н. Нигматулина, В.В. Шарыгин, В.М. Калугин. Новосибирск: СО РАН, **2005**. 284 с.
- Покровский П.В. Нашатырь из месторождения бурых углей Хамарин-Хурал-Хид в Монгольской Народной Республике // ЗВМО. **1949**. № 3. С. 38–45.
- Пушкарёв Е.В., Бирюзова А.П., Гуляева Т.Я. Фассаит из метаморфических пород Хабаровинского габбро-ультрамафитового массива на Южном Урале // Вестник Уральского отделения РМО. **2004**. № 3. С. 89–97.

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

Сокол Э.В., Полянский О.П., Семенов А.Н., Ревердатто В.В., Кох С.Н., Девятиyarova 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.

Major Rock-Forming Minerals of Paralava in Mongolian Combustion Metamorphic Complexes

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

^aVinogradov Institute of Geochemistry Siberian Branch RAS, Irkutsk, Russia

^bDobretsov Geological Institute, Siberian Branch RAS, Ulan-Ude, Russia

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

Paralavas of combustion metamorphic complexes in Mongolia were formed in high-temperature conditions from carbonate-terrigenous rocks of sedimentary formations due to multistage spontaneous underground coal fires. Melilite-nepheline paralavas contain phenocrysts of Fe-rich åkermanite-alumoåkermanite, clinopyroxene of the diopside–hedenbergite series containing up to 49 mol. % of kushiorite end-member, and basic plagioclase. Enstatite-ferrosilite is the rock-forming mineral in paralavas of the plagioclase-pyroxene ± ± indialite composition. Paralavas often contain xenoliths of thermally altered sedimentary rocks. Mineral associations in remnant xenoliths of marly limestone are composed of gehlenite, minerals of the monticellite–kirschsteinite series, perovskite, Al-rich clinopyroxene, spinel, and other minerals. They were formed both at the stage of the high-temperature metamorphism of sedimentary protolite, preceding the melting of carbonate-silicate rocks, and as a result of the reactionary interaction between xenoliths and pyrogenic silicate melts of different composition.

Keywords: plagioclase, clinopyroxene, melilite, paralava, Nyalga and Khamaryn-Khural-Khiid combustion metamorphic complexes, Mongolia

REFERENCES

- Agashev A.M., Pokhilenko L.N., Pokhilenko N.P., Shchukina E.V. Geochemistry of eclogite xenoliths from the Udachnaya Kimberlite Pipe. *Lithos*. 2018. Vol. 314–315. P. 187–200.
- Blander M., Fuchs I. Calcium–aluminium-rich inclusions in the Allende meteorite: evidence for a liquid origin. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1975. Vol. 39. P. 1605–1619.
- Cundari A. Petrology of clinopyroxenite ejecta from Somma–Vesuvius and their genetic implications. *Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt.* 1982. Vol. 30. P. 17–35.
- Combustion metamorphism. Ed. by Sokol E.V., Maksimova N.V., Nigmatulina E.N., Sharygin V.V., Kalugin V.M. Novosibirsk: Siberian Branch RAS. 2005. 284 p. (in Russian).
- Deviatiyarova A.S. Kochumdek contact halo of spurrite-merwinite metamorphism: mineralogy, geochemical features, history of formation. Ph. D. thesis syn. Novosibirsk: IGM SB RAS, 2022. 22 p. (in Russian).
- Cosca M.A., Peacor D.R. Chemistry and structure of esseneite (CaFeAlSiO₆), a new pyroxene produced by pyrometamorphism. *Amer. Miner.* 1987. Vol. 72. P. 148–156.
- Erdeneisogt 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.
- Foit F.F., Hooper R.L., Rosenberg P.E. An unusual pyroxene, melilite, and iron oxide mineral assemblage in a coal-fire buchite from Buffalo, Wyoming. *Amer. Miner.* 1987. Vol. 72. P. 137–147.
- Glushkova V.E., Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Minerals of olivine group from melilite–nepheline paralavas of combustion metamorphic complexes of Mongolia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. 2023. Vol. 152. N 1. P. 61–77 (in Russian).
- Gnos E., Armbruster T., Nyfeler D. Kanoite, donpeacorite and tirodite: Mn–Mg-silicates from a manganese quartzite in the United Arab Emirates. *Eur. J. Miner.* 1996. Vol. 8. P. 251–262.
- Grapes R., Zhang K., Peng Z. Paralava and clinker products of coal combustion, Yellow River, Shanxi Province, China. *Lithos*. 2009. Vol. 113. P. 831–843.
- Hazen R., Finger I. Crystal structure and compositional variation of Angra Dos Reis fassaite. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1977. Vol. 35. P. 357–362.
- Kalugin I.A., Tretyakov G.A., Bobrov V.A. Iron ore basalts in burned rocks of Eastern Kazakhstan. Novosibirsk: Nauka, 1991. 80 p. (in Russian).

Kimura M., Mikouchi T., Suzuki A., Miyahara M., Ohtani E., El Goresy A. Kushiroite, CaAlAlSiO_6 : A new mineral of the pyroxene group from the ALH 85085 CH chondrite, and its genetic significance in refractory inclusions. *Amer. Miner.* **2009**. Vol. 94. P. 1479–1482.

Kobayashi H. Kanoite, $(\text{Mn}^{2+}, \text{Mg})_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, a new clinopyroxene in the metamorphic rock from Tatehira, Oshima Peninsula, Hokkaido, Japan. *J. Geol. Japan.* **1977**. Vol. 83. N 8. P. 537–542.

Kalashnikova T.V., Solovyova L.V., Kostrovitsky S.I. Comparative characteristics of mineral composition from xenoliths of kimberlite pipes “Obnazhennaya” and “Udachnaya”. *News SB Earth Sci. Section RANS. Geol., searches and explor. ore deposits.* **2015**. Vol. 53. N 4. P. 7–20 (in Russian).

Kruszewski L., Gatel P., Thiéry V., Moszumańska I., Kusy D. Crystallochemical behavior of slag minerals and the occurrence of potentially new mineral species from Lapanouse-de-Séverac, France. In: *Coal and Peat Fires. A Global Perspective*. Amsterdam: Elsevier, **2018**. Vol. 5. P. 241–300.

Krzatka A., Krüger B., Galuskina I., Vapnik E., Galuskin E. Bennesherite, $\text{Ba}_2\text{Fe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_7$: A new melilite group mineral from the Hatrurim Basin, Negev Desert, Israel. *Amer. Miner.* **2022**. Vol. 107. N 3. P. 138–146.

Lustrino M., Ronca S., Caracausic A., Bordenca C.V., Agostinie S., Faraone D.B. Strongly SiO_2 -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.

Ma C., Rossman R. Grossmanite, $\text{CaTi}^{3+}\text{AlSiO}_6$, a new pyroxene from the Allende meteorite. *Amer. Miner.* **2009**. Vol. 94. P. 1491–1494.

Melluso L., Conticelli S., D'Antonio M.P., Mirco N., Saccani E. Petrology and mineralogy of wollastonite- and melilite-bearing paralavas from the Central Apennines, Italy. *Amer. Miner.* **2003**. Vol. 88. P. 1287–1299.

Melluso L., Conticelli S., de'Gennaro R. Kirschsteinite in the Capo di Bove melilite leucitite lava (cecilite), Alban Hills, Italy. *Miner. Mag.* **2010**. Vol. 74. P. 887–902.

Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes. *Canad. Miner.* **1989**. Vol. 27. P. 143–156.

Nikolaeva A.T. Petrology of melilite containing rocks of volcanoes Cupaello and Colle Fabbri (Central Italy). Ph. D. thesis syn. Novosibirsk: IGM SB RAS, **2014**. 23 p. (in Russian).

Owens B. High-temperature contact metamorphism of calc-silicate xenoliths in the Kiglapait Intrusion, Labrador. *Amer. Miner.* **2000**. Vol. 85. P. 1595–1605.

Pascal M.-L., Katona I., Fonteilles M., Verkaeren J. Relics of high-temperature clinopyroxene on the join $\text{Di}-\text{CaTs}$ with up to 72 mol % $\text{Ca}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})\text{AlSiO}_6$ in the skarns of Ciclova and Magureaua Văței, Carpathians, Romania. *Canad. Miner.* **2005**. Vol. 43. P. 857–881.

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. P. 38.

Petersen E.U., Anovitz L.M., Essene E.J. Donpeacorite, $(\text{Mn}, \text{Mg})\text{MgSi}_2\text{O}_6$, a new orthopyroxene and its proposed phase relations in the system $\text{MnSiO}_3-\text{MgSiO}_3-\text{FeSiO}_3$. *Amer. Miner.* **1984**. Vol. 69. P. 472–480.

Pokrovskii P.V. Ammonium chloride from the Khamaryn-Khyral-Khiid brown coal field in Mongolia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1949**. N 3. P. 38–45 (in Russian).

Pushkarev E.V., Biryuzova A.P., Gulyaeva T.Ya. Fassaite from metamorphic rocks of the Khabarnsky gabbro-ultramafic massif. *Bull. Ural Branch Russian Miner. Soc.* **2004**. N 3. P. 89–97 (in Russian).

Salgado S.S., Caxito F.A., Queiroga G.N., Castro M.P. Stratigraphy, petrography and tectonics of the manganese-bearing Buritirama Formation, Northern Carajás Domain, Amazon Craton. *Brazil. J. Geol.* **2019**. Vol. 49. N 1. P. 1–15.

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. 431–457.

Sokol E.V., Polyansky O.P., Semenov A.N., Reverdatto V.V., Kokh S.N., Deviatyayrova A.S., Kolobov V.Yu., Khvorov P.V., Babichev A.V. High-grade contact metamorphism in the Kochumdek river valley (Podkamennaya Tunguska basin, East Siberia): evidence for magma flow. *Russian Geol. Geophys.* **2019**. Vol. 60. N 4. P. 456–471 (in Russian).

Stoppa F., Sharygin V.V. Melilitolite intrusion and pelite digestion by high temperature kamafugitic magma at Colle Fabbri, Spoleto, Italy. *Lithos.* **2009**. Vol. 112. P. 306–320.

Warchulski R., Gawęda A., Janeczek J., Kądziołka-Gawęł 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.

Wiedenmann D., Zaitsev A.N., Britvin S.N., Krivovichev S.V., Keller J. Alumoåkermanite, $(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+})(\text{Si}_2\text{O}_7)$, a new mineral from the active carbonatite-nepheline-phonolite volcano Oldoinyo Lengai, northern Tanzania. *Miner. Mag.* **2009**. Vol. 73. N 3. P. 373–384.