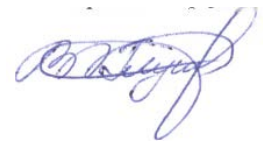


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт геохимии им. А. П. Виноградова
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



ГЛУШКОВА Вероника Евгеньевна

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ ПОРОД ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ
МОНГОЛИИ**

1.6.4. – «Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические методы
поисков месторождений полезных ископаемых»

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель
Доктор геолого-минералогических наук
Перетяжко Игорь Сергеевич

ИРКУТСК 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПОРОДЫ ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	11
ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	15
2.1. Геологическое строение Нилгинского комплекса.....	15
2.2. Геологическое строение комплекса Хамарин-Хурал-Хид	17
ГЛАВА 3. ТИПЫ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	22
3.1. Геохимическая характеристика пород Хамарин-Хурал-Хида	23
3.2. Геохимическая характеристика пород Нилгинского комплекса.....	27
ГЛАВА 4. МИНЕРАЛЬНО-ФАЗОВЫЕ СОСТАВЫ ПИРОГЕННЫХ ПОРОД	30
4.1. Минерально-фазовые ассоциации пород.....	30
4.2. Клинкеры.....	32
4.3. Железистые паралавы и пирогенные породы комплекса Хамарин-Хурал- Хид	41
4.4. Мелилит-нефелиновая и плагиоклаз-пироксен ± индиалитовая паралавы ...	50
ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ ПИРОГЕННЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ.....	82
5.1. Особенности геологического строения пирометаморфических комплексов	82
5.2. Осадочные протолиты пирогенных пород	83
5.3. Условия кристаллизации минералов пирогенных пород.....	88
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	98

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А	113

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследований

Пирометаморфизм, вызванный горением органического вещества в осадочных толщах или горных отвалах, относится к высокотемпературному (< 3000 °C) и низкobarическому (< 170 бар) метаморфизму [Пирогенный ..., 2005]. Пирометаморфические комплексы детально изучаются на протяжении последних 40-50 лет [Bentor et al., 1963; 1981; Bentor, 1984; Cosca et al., 1989; Калугин и др., 1991; Burg et al., 1999; Melluso et al., 2003; Heffern et al., 2007; Нигматулина, Нигматулина, 2009; Шарыгин и др., 2009; Grapes, 2011; Сокол и др., 2014; Novikova et al., 2016; Карпенко и др., 2021].

В Монголии известно много угленосных бассейнов [Erdenetsogt et al., 2009], некоторые из которых могут рассматриваться как потенциальные области развития процессов пирометаморфизма. Первые детальные минералогическо-геохимические работы по изучению природных процессов угольного горения в осадочных толщах стали проводиться здесь с 2014 г. [Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018; Савина и др., 2020; Peretyazhko et al., 2021; Савина, Перетяжко, 2023; Peretyazhko, Savina, 2023]. Многие породы пирометаморфических комплексов Монголии имеют уникальный минерально-фазовый состав, который ранее не был описан либо детально не изучался.

Объекты исследования

Пирогенные породы комплексов Нилгинского и Хамарин-Хурал-Хид в Монголии, минерально-фазовые ассоциации термически изменённых осадочных пород, клинкеров и паралав.

Цель исследования

Характеристика геологии пирометаморфических комплексов, минерально-фазового состава и геохимических особенностей пирогенных пород для реконструкции условий их образования при термическом метаморфизме и

частичном плавлении осадочных толщ, вызванных природными подземными угольными пожарами.

Задачи исследования:

1. Изучение геологического строения пирометаморфических комплексов;
2. Определение макро- и микроэлементного состава пород (осадочных, пирогенно изменённых и плавленых), анализ геохимии пород;
3. Изучение состава и зональности породообразующих, второстепенных и акцессорных минералов;
4. Диагностика и определение свойств редких и потенциально новых минералов;
5. Изучение минералогии ксенолитов осадочных пород в клинкерах и паралавах;
6. Реконструкция стадийности термических преобразований и плавления осадочных пород, условий образования клинкеров и паралав;
7. Согласование низкобарической области фазовой диаграммы кальцита по экспериментальным данным и результатам термодинамических расчётов для последующего моделирования процессов пирогенных изменений и плавления карбонатно-силикатных осадочных пород

Фактический материал и методы исследований

Образцы для исследований были взяты из коллекции каменного материала, отобранного на пирометаморфических комплексах Монголии в 2014-2018 гг. Перетяжко И.С. и Савиной Е.А. Используются также материалы полевых работ на комплексах Нилгинском и Хамарин-Хурал-Хид, полученные в 2023 г. с участием автора. Детально изучено 53 образца пород: 11 осадочных и термически изменённых, 8 клинкеров, 32 паралавы, 2 железистых пирогенных породы.

Аналитические исследования проводили на оборудовании Центров Коллективного Пользования (ЦКП) Института Геохимии им. А.П. Виноградова

СО РАН (ИГХ СО РАН, г. Иркутск), Института геологии им. Н.Л. Добрецова СО РАН (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ) и Института Земной Коры (ИЗК СО РАН).

Определение валового состава пород проводили в ИГХ СО РАН по разным аналитическим методикам: рентгенофлуоресцентным методом (РФА) на флуоресцентном спектрометре Bruker AXS S4 Pioneer и многоканальном X-Ray спектрометре СРМ-25 (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , K_2O , Na_2O и P_2O_5), титрованием (FeO , CO_2), гравиметрическим методом (H_2O^+ , H_2O^- , $S_{\text{общ}}$). Для определения содержания фтора использовали атомно-эмиссионную спектрометрию с фотоэлектрической регистрацией спектра.

Анализ примесных элементов проводили методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ICP-MS) на масс-спектрометре NexION 300D (AgilentTechnologies Inc). При подготовке к ICP-MS анализам применяли методику открытого кислотного разложения растёрных проб пород в платиновых или стеклоуглеродных тиглях. Качество аналитических результатов контролировали по UGS-стандартам и другим аттестованным стандартным образцам. Аналитические методики и данные по стандартам представлены на сайте <http://www.igc.irk.ru/ru/uslugi/eksperimentalnye-obraztsy>.

Петрографические описания шлифов пород пирометаморфических комплексов Монголии проводили на оптическом поляризационном микроскопе Olympus BX-51 в ИГХ СО РАН.

Состав минералов и фаз определяли методом сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектрометрии (СЭМ ЭДС) на электронных микроскопах Carl Zeiss LEO-1430VP с системами ЭДС микроанализа INCA Energy 350 (ГИН СО РАН) и TESCAN MIRA 3 LMU с системой ЭДС микроанализа ULTIM MAX 40 Oxford Instruments (ИГХ СО РАН). Качество анализов контролировали на эталонных образцах кварца, альбита, калиевого полевого шпата, волластонита, металлов и синтетических соединений MgO , Al_2O_3 , CaF_2 , NaCl из стандартных наборов для микроанализа (№ 6316 и № 7682, Micro-Analysis Consultants Ltd). Матричные эффекты учитывали по стандартному методу XPP, реализованному в программном обеспечении INCA

Energy. Стекла и минералы анализировали в режиме сканирования прямоугольных участков площадью более 10 мкм^2 , что позволило уменьшить до минимума потерю щелочных элементов. Анализы минералов и стекол выполняли при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 0.5 нА и длительности накопления спектров 50 с. Для данных условий нижняя граница определяемых концентраций элементов составила 0.2 – 0.3 мас.%, а средняя случайная погрешность по основным (> 10 мас.%), второстепенным (1–10 мас.%) и примесным (0.3–1 мас.%) элементам – 0.9, 3.0 и 13 отн.% соответственно [Лаврентьев и др., 2015]. Методом СЭМ ЭДС выполнено около 10000 анализов минералов и фаз.

Растертые пробы пород анализировали на дифрактометре D8 ADVANCE Bruker, оснащённом детектором VANTEC-1 PSD (ИГХ СО РАН) в диапазоне углов 2θ от 5° до 70° , используя $\text{CuK}\alpha$ источник излучения при следующих параметрах: 40 кВ, 40 мА, время экспозиции 1 с, размер шага $0.02^\circ 2\theta$. Для рентгеновской диагностики минералов использовали базу данных PDP-2 (ICDD) и программное обеспечение Bruker EVA.

Методом порошковой дифрактометрии невозможно идентифицировать акцессорные минералы из-за их небольшого количества в породах, а также наложения пиков некоторых фаз на дифрактограммах. Поэтому, кроме рентгенофазового метода для диагностики минералов использовали конфокальную спектроскопию комбинационного рассеяния света (КР-спектры) и результаты СЭМ ЭДС анализов.

КР-спектры минералов и силикатных стёкол получали на конфокальном микро-Рамановском спектрометре WITec alpha 300R (WITec GmbH), оснащённом лазером 532 нм Nd:YAG при мощности лазера 1 – 22 мВ в ИЗК СО РАН (г. Иркутск). Фокусировку лазера диаметром $\sim 1 \text{ мкм}$ на образец производили через объектив Zeiss 100x. Спектры снимали в диапазоне $100 - 4000 \text{ см}^{-1}$ за время накопления 10 – 50 сек в течение 3 – 50 циклов в зависимости от интенсивности пиков на решетках с оптическим разрешением 1800 gr/mm , (G3) и 600 gr/mm (G2).

Калибровку спектров проводили по линии 520.7 см^{-1} кристаллического Si, а для идентификации минералов использовали базу данных RRUFF (<http://rruff.info/>).

Формулы минералов рассчитывали в программе CRYSTAL [Перетяжко, 1996].

Личный вклад

Подготовка образцов пород пирометаморфических комплексов для аналитических исследований. Описание шлифов, изучение геологии комплекса Хамарин-Хурал-Хид, геохимии и минерально-фазового состава пирогенных пород. Использовался метод физико-химического моделирования в программном комплексе «Селектор», с помощью которого уточнены термодинамические свойства кальцита и кальцитового расплава, воспроизведена низкобарическая область экспериментальных данных фазовой диаграммы кальцита.

Научная новизна

Приведена обобщенная минералого-геохимическая характеристика пород пирометаморфических комплексов Монголии, где особое внимание уделяется характеристике паралав, образовавшихся в результате полистадийных преобразований осадочного карбонатно-силикатного протолита. Представлено детальное описание породообразующих, второстепенных, акцессорных и редких минералов пирогенных пород и их сравнение с таковыми из пород иного генезиса (метеориты, магматические и техногенные образования). Впервые по результатам полевых наблюдений составлены схематическая геологическая карта и разрез северо-восточной части комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

Практическая значимость

Полученные в результате исследования данные о минерально-фазовом составе и геохимии паралав и клинкеров расширяют представления о процессах термических преобразований и частичного плавления пород осадочных толщ, вызванного подземными угольными пожарами. Данные по минеральному составу

редких и потенциально новых минералов могут быть использованы в качестве теоретического материала в образовательном процессе высших учебных учреждений для студентов-геологов.

Защищаемые положения

1. Пирогенные породы сохранились в останцах частично плавленной осадочной толщи (эпицентрах природных угольных пожаров) и находятся в депрессиях, образованных после выгорания линз бурого угля мощностью до 30 – 40 м и последующих обрушений термически изменённых осадочных пород в синклиналиальных складках.

2. Большое разнообразие пирогенных пород обусловлено вариациями состава осадочных толщ, локальными условиями их термических изменений и частичного плавления. Протолитом для клинкеров, плагиоклаз-пироксен ± индиалитовой и железистых паралав (секанинаит-тридимитовой, кристобалит-фаялитовой) были обогащенные железом пелиты, а для мелилит-нефелиновых паралав – мергелистые известняки.

3. Температура частичного плавления пелитов превышала 1050 °С и локально достигала 1300 – 1400 °С. Железистые паралавы кристаллизовались из силикатно-железистых расплавов при больших вариациях фугитивности кислорода. В P-T условиях стабильности кальцита и карбонатного расплава мергелистые известняки плавилась инконгруэнтно с образованием недосыщенных по кремнезему и обогащённых Са расплавов, исходных для мелилит-нефелиновых паралав.

Апробация работы

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК (Петрология, Записки РМО). Одна статья находится на рецензировании в журнале Materialia индексируемом WoS и Scopus. Результаты работ докладывались на следующих конференциях: V Всероссийская молодёжная конференция по геологии и геофизике (Улан-Удэ, 2019), XIII Всероссийское

петрографическое совещание (с участием зарубежных ученых) (Иркутск, 2021), X Международная конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2022), Всероссийская конференция «Современные направления развития геохимии» (Иркутск, 2022), Всероссийская конференция молодых ученых «Современные проблемы геохимии – 2023» (Иркутск, 2023), VI Всероссийская конференция с международным участием «Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит» (Владивосток, 2023), XX Всероссийская научная конференция «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса: от океана к континенту» (Иркутск, 2023).

Структура работы

Диссертация общим объёмом 133 страницы состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы (115 публикаций), включает 18 таблиц, 37 рисунков и 1 приложение.

Благодарности

Работа выполнена в лаборатории генетической минералогии и физико-химической петрологии ИГХ СО РАН под руководством д.г.-м.н. И.С. Перетяжко, которому автор выражает глубокую благодарность за предложенную тематику, полевые и аналитические материалы, терпение и помощь в изучении процессов пирогенного метаморфизма. Благодарю к.г.-м.н. Е.А. Савину за практические советы по подготовке образцов к аналитическим исследованиям и обработке полученных данных, а также к.г.-м.н. Е.А. Хромову, к.г.-м.н. Е.В. Каневу, А.Г. Чуешову, к.г.-м.н. Н.С. Карманова, Л.С. Таусон, к.г.-м.н. А.Н. Сапожникова и к.г.-м.н. Ю.Д. Щербакова за помощь в проведении аналитических работ. Выражаю признательность к.г.-м.н. В.А. Бычинскому и д.ф.-м.н. А.А. Тупицыну за освоение программного комплекса «Селектор» и консультации по проблемам физико-химического моделирования многокомпонентных систем.

Работа выполнена при поддержке программы 0284-2021-0007 фундаментальных научных исследований (ФНИ), грантов Минобрнауки Российской Федерации 075-152022-1100 и РНФ 23-27-00031.

ГЛАВА 1. ПОРОДЫ ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Понятие «пирогенный метаморфизм» (от греч. «pyro» – огонь) было введено Брауном в 1912 г. для обозначения высокотемпературных изменений пород, возникающих на месте контакта магмы основного состава и вмещающих осадочных пород. Классическим примером проявления пирометаморфизма является вулканическая провинция Эйфель (Германия), сложенная базальтами, в которых содержится большое количество ксенолитов термически измененных осадочных пород. В дальнейшем понятие пирогенный метаморфизм расширилось и стало включать в себя также высокотемпературные процессы в осадочных толщах, вызванные ударами молний (lightning metamorphism) и горением каустобиолитов (burning or combustion metamorphism) – углей, газов, битумов [Grapes, 2011]. Среди последних наибольшее количество исследований посвящено пирометаморфическим комплексам, возникшим в результате угольных пожаров в осадочных толщах, техногенным пожарам на разрабатываемых угольных месторождениях, а также отходам пирометаллургии.

Первые упоминания о пирометаморфических образованиях (комплексах) известны с древних времен, например, в сочинениях Плиния Старшего в первом веке нашей эры, описывающих Раватский угольный пожар на территории современного Таджикистана [Пирогенный..., 2005]. Несмотря на то, что научные описания пирометаморфических комплексов появились в конце XIX века, степень изученности процессов природных термических преобразований осадочных пород в результате пожаров горючих ископаемых невелика. На сегодняшний день известны более 40 пирометаморфических комплексов, среди которых наиболее детальные изотопно-геохимические и минералогические исследования проведены в термически преобразованных осадочных породах свиты Хатрурим в Израиле [Bentor et al., 1963; Burg et al., 1999], в метапелитах нефтеносной толщи Монтерей [Bentor et al., 1981; Bentor, 1984] и бассейна Повдер Ривер [Cosca et al., 1989] в США, а также в горельниках Кендерлыкской впадины в Казахстане [Калугин и др., 1991]. На территории бывшего СССР пирометаморфические комплексы

изучались на угольных месторождениях Таджикистана [Шарыгин и др., 2009; Карпенко и др., 2021], Кузбасса [Нигматулина, Нигматулина, 2009; Сокол и др., 2014], Челябинского угольного бассейна [Пирогенный ..., 2005], на Итатском месторождении угля (Красноярский край) [Поздняков, 1968], а также на территории Гусиноозерского угольного бассейна в Бурятии [Novikova et al., 2016].

Причинами угольных возгораний могут быть внешние факторы (например, лесные пожары) либо процессы самовозгорания, вызванные окислением сульфидной серы (содержащегося в углях пирита). Обычно пожары в угленосных толщах происходят полистадийно, иногда со значительными перерывами в несколько тысяч лет и могут распространяться со скоростью до 17 м/год. В результате пирогенных процессов как природного, так и техногенного происхождения, образуются своеобразные формы рельефа – т.н. “горельники”, которые после прекращения фазы активного горения угольных пластов быстро эродируются и разрушаются [Пирогенный ..., 2005].

Площади пирометаморфических комплексов могут достигать десятки сотен квадратных километров [Ventor et al., 1981]. В новообразованных толщах пирогенных пород, имеющих часто брекчированный вид с протяженными субвертикальными трещинами, на месте выгоревшего угля появляются полости в виде пещер и тоннелей. При этом пирогенным трансформациям подвергаются только перекрывающие угленосный пласт породы, а подстилающие остаются неизменными. Развитию и распространению пожаров в осадочных толщах согласно исследованиям [Пирогенный..., 2005; Neffern et al., 2007] благоприятствуют следующие факторы: расчлененный рельеф, высокая угленосность толщи, значительные мощности и крутое падение пластов, повышенная трещиноватость угля и вмещающих пород, благоприятный петрографический состав углей, теплые и сухие климатические обстановки, глубокое расположение уровня грунтовых вод.

При горении углей вмещающие породы осадочных толщ претерпевают изменения, и в зависимости от P - T условий процесса породы осадочных протолитов подвергаются высокотемпературным твердофазным преобразованиям

с возможным последующим частичным или полным плавлением. В пирометаморфических комплексах выделяют обожжённые (прокалённые и/или частично плавленые) осадочные породы, а также их производные – клинкеры и паралавы.

До настоящего времени нет общепринятой классификации пирогенных пород. Термин *клинкер* обычно используют для обозначения частично плавленных метапелитов, содержащих кислое силикатное стекло [Cosca et al., 1989; Grapes, 2011; Coal and Peat Fires..., 2015]. Процесс пирогенной трансформации пелитовых пород начинается с этапа дегидратации и дегидроксилации слоистых силикатов при 600 – 700 °С и последующего локального плавления и появления эвтектических жидкостей при 870 – 1200 °С, при этом окислительно-восстановительные условия изменяются от буфера ССО до QFM и МН. Минеральная ассоциация клинкеров в основном включает в себя кварц и его полиморфы (тридимит, кристобалит), минералы группы кордиерита, муллит, основной плагиоклаз, магнетит и гематит. Как правило, клинкеры сохраняют текстурные особенности пород протолита, формируя тела неправильной формы, которые бронируют нижележащие осадочные породы [Пирогенный ..., 2005].

К *паралавам* относят продукты полного либо частичного плавления карбонатно-силикатных осадочных пород [Cosca, Peacor, 1987; Cosca et al., 1989; Пирогенный ..., 2005; Grapes, 2011; Coal and Peat Fires ..., 2015]. Для техногенных продуктов спонтанного возгорания угольных отвалов применяется термин *парабазальты* [Пирогенный ..., 2005]. Химический состав паралав близок к таковому базальтоидов и отличается от магматических пород повышенными содержаниями Al, Fe, часто Ca. Пирогенное преобразование карбонатно-силикатных осадочных пород во многих комплексах горельников сопровождается декарбонизацией протолита, в результате чего возникают минеральные ассоциации мервинит-спурритовой фации [Gross, 1977; Burg et al., 1991, 1999; Пирогенный ..., 2005].

В целом, фазовый состав плавленных пород определяется сочетанием нескольких факторов: особенностями состава осадков угленосной толщи,

локальными вариациями окислительно-восстановительных условий в очаге горения, температурой и температурными градиентами в зоне пожара, скоростью охлаждения/закалки расплавов и другими параметрами. Пирометаморфические комплексы могут быть сложены несколькими разностями паралав, а в пределах одного образца размер более или менее однородного участка породы часто измеряется несколькими сотнями микрон.

Пирометаморфические комплексы представляют особый интерес с точки зрения минералогии и по Ф. Фойту, «являются плодородным полем для минералогических изысканий» [Foit et al., 1987]. Например, в горящих отвалах Челябинского угольного бассейна было установлено свыше 60 новых минеральных видов, в т.ч. органических [Чесноков и др., 2008]. Новые минералы открывают в пирогенных породах очень часто [Sokol et al., 2015; Britvin et al., 2019a; Krz̄ała et al., 2022]. Некоторые редкие минералы (например, фосфиды и др.), известные ранее только в метеоритах, были найдены в пирогенных породах [Britvin et al., 2023].

Изучение пирометаморфических комплексов позволяет реконструировать неотектонические, палеогеографические и палеоклиматические обстановки [Сокол и др., 2014; Yuan et al., 2023], а знания особенностей пирогенного метаморфизма применимы для моделирования механизма распространения подземных угольных пожаров и в горных выработках [Wolf, Bruining, 2007]. Комплексы пирогенных пород также могут представлять и практический интерес как источники нашатыря, квасцов, железных и урановых руд [Калугин и др., 1991; Пирогенный ..., 2005; Shi et al., 2020].

ГЛАВА 2. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Пирометаморфические комплексы Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид находятся на расстоянии около 300 км друг от друга (Рис. 2.1). Пирогенные породы формировались при подземном горении прослоев бурого угля в терригенно-карбонатных осадочных толщах раннемеловой дзунбаинской свиты.

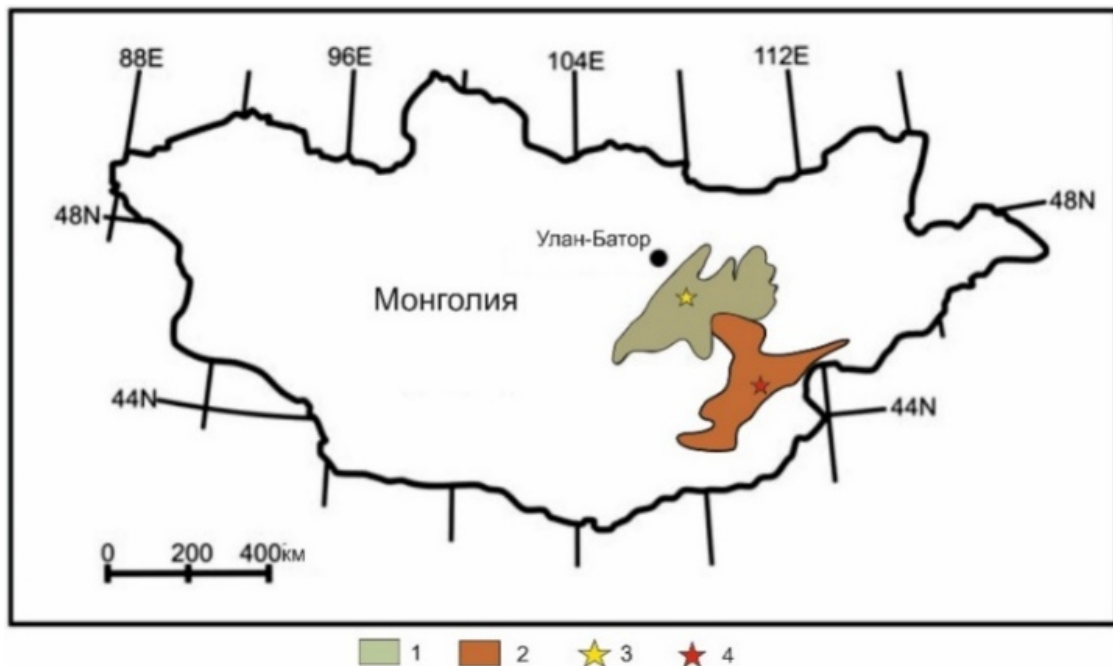


Рисунок 2.1. Угленосные бассейны: (1) Чоир-Нилгинский, (2) Восточно-Гобийский. Пирометаморфические комплексы: (3) Нилгинский, (4) Хамарин-Хурал-Хид. Границы угленосных бассейнов, по [Endenetsogt et al., 2009].

2.1. Геологическое строение Нилгинского комплекса

Нилгинский комплекс расположен в пределах Чоир-Нилгинского угленосного бассейна, в северо-восточной части Нилгинской депрессии [Erdenetsogt et al., 2009]. В ходе полевых работ 2014 – 2015 гг. на площади этого комплекса были впервые обнаружены коренные выходы плавленых пород на трех останцах высотой до 40 м (Корона, Верблюды, Малыш) и в стенках буроугольного карьера Тугруг (Рис. 2.2). Останцы сохранились после эрозии осадочной толщи, вероятно, вблизи эпицентров четвертичных природных угольных пожаров [Peretyazhko et al., 2017] (Рис. 2.3, а).

В 2023 г. при участии автора на останцах Корона и Верблюд проводилось дополнительное опробование пород. Склоны конусообразного останца Корона сложены осадочными пелитовыми породами (глиной, алевропесчаником), перекрытыми слоем 2-3 м по мощности термически изменённых пелитов с фрагментами клинкера и массивных паралав со следами течения расплава на поверхности образцов (Рис. 2.3, б). В привершенной части останца вскрыт также линзовидный прослой аргиллита с многочисленными включениями угля мощностью около 0.5 м, выше которого залегают желтовато-белые пирогенно изменённые карбонатно-силикатные породы (Рис. 2.3, в).

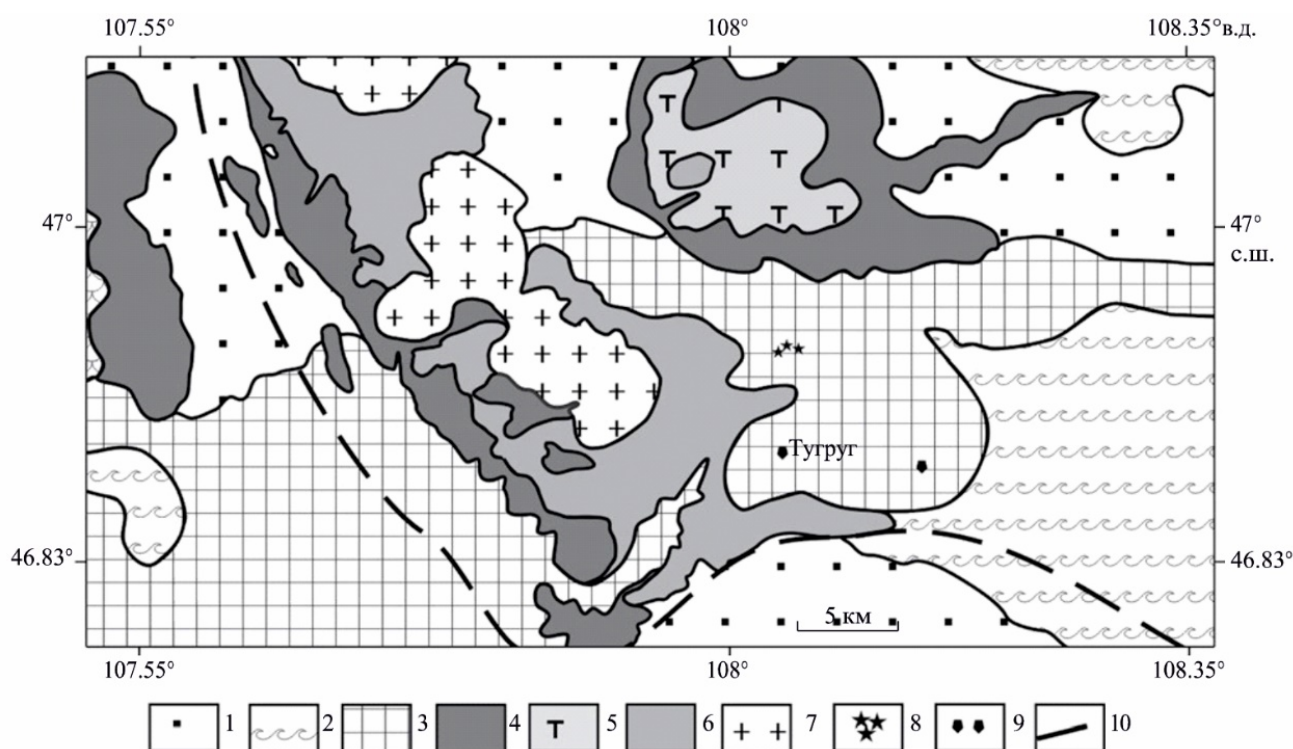


Рисунок 2.2. Схематическая геологическая карта северо-восточной части Нилгинской депрессии, по [Перетяжко и др., 2018].

1– нерасчленённые меловые отложения, 2– терригенно-осадочные породы сайншандской свиты (K_1), 3– терригенно-осадочные породы дзунбаинской свиты (K_1), 4– трахибазальты, базальтовые трахиандезиты и их туфы (K_1), 5– трахиты (K_1), 6 – трахириолиты (K_1), 7 – верхнеюрские (киммерийские) граниты, 8 – останцы осадочной толщи Корона, Верблюд и Малыш, Нилгинский комплекс, 9 – угольные карьеры Тугруг (с пирогенными породами) и Ховил, 10 – тектонические нарушения.

Останец Верблюд имеет форму пологой гряды длиной около 450 м. На склонах останца встречаются обломки пирогенных пород, конкреции желтых крупнозернистых песчаников и барита размером до нескольких см. Вершина гряды сложена черным стекловатым клинкером, который иногда сечётся тонкими прожилками паралав. Мощность пирогенных пород на останце достигает 10-15 м.

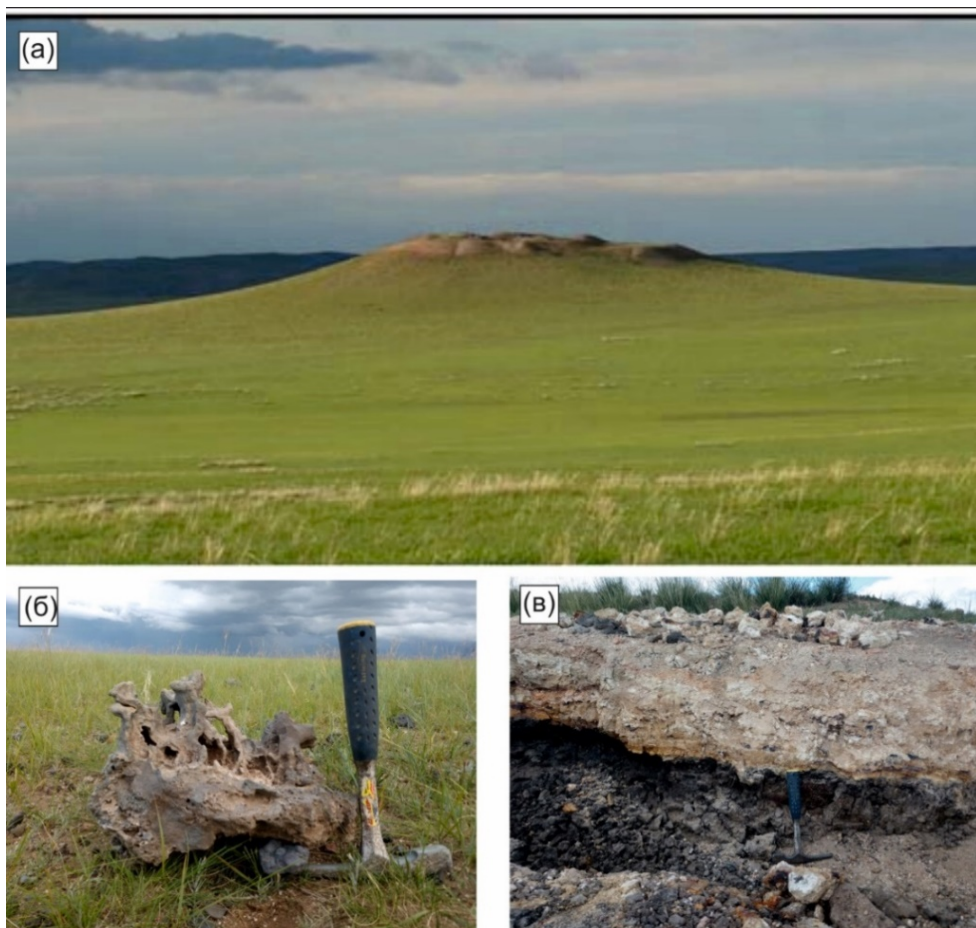


Рисунок 2.3. Останец Корона, Нилгинский комплекс.

(а) – общий вид; (б) – паралава со следами течения на образце; (в) – фрагмент пирогенно изменённой осадочной толщи с аргиллитом, содержащим включения угля (чёрный прослой) и карбонатно-силикатной породы с фрагментами пористой паралавы на вершине останца.

На расстоянии 4 – 5 км к юго-западу от останцов расположен буроугольный карьер *Тугруг*, в стенках которого вскрыты коренные выходы пирогенно изменённых аргиллитов с обособлениями стекловатого клинкера. Вблизи карьера обнаружены развалы и глыбы скрытокристаллических паралав, а в овраге обнажается красноватая толща пирогенных пород мощностью до 5 – 6 м. Согласно данным горнодобывающей компании *Tugrug Nuur Energy* мощность угленосной толщи составляет 40 – 60 м при мощности прослоев угля до 12 м.

2.2. Геологическое строение комплекса Хамарин-Хурал-Хид

Комплекс Хамарин-Хурал-Хид расположен в Восточно-Гобийском угольном бассейне (Рис. 2.1). Ранее бурый уголь добывали здесь кустарным способом.

Комплекс вытянут в северо-восточном направлении на 6 – 7 км, а вскрытая площадь развития пирогенных пород составляет около 20 км² (Рис. 2.4). Согласно полевым наблюдениям 2016, 2018 и 2023 гг. в строении комплекса были выделены три части: юго-западная, центральная и северо-восточная.

На юго-западном, наиболее эродированном фланге комплекса находится гряда длиной 3 км и шириной до 200 м. В её основании обнаружены развалы мелилит-нефелиновой паралавы, а выше них обнажаются коренные выходы высотой до 5 м обожжённого алевропесчаника и стекловатого клинкера.

Площадь центральной части составляет около 6 км². Здесь находился эпицентр (очаг горения) угольного пожара 1932-1937 гг. [Шипулин, 1940; Покровский и др., 1949]. Породы над очагом пожара до настоящего времени имеют повышенную температуру, что косвенно указывает на продолжающийся процесс угольного тления. В ходе природных угольных пожаров, которые наблюдались в этом районе с XVIII века, обрушений пород над выгоревшими пластами угля и разрушений осадочной толщи временными водотоками, в центральной части Хамарин-Хурал-Хида сформировался характерный для современных пирометаморфических комплексов ландшафт “горельников” с протяженными грядами, оврагами и небольшими пещерами (Рис. 2.5, а). Здесь были опробованы разрезы высотой до 15 м, в основании которых залегают аргиллиты и алевропесчаники (Рис. 2.5, в). Выше них залегает слой измененных аргиллитов с прослоями частично выгоревшего угля мощностью до 10 м, который перекрывается толщей мощностью до 3 – 5 м спекшихся пород, содержащих в основном обломки размером 20 – 40 см кирпично-красного изменённого аргиллита и чёрного стекловатого клинкера (Рис. 2.5, б). Также в этом слое встречаются обособления паралавы размером до 30 – 40 см, часто имеющие следы течения расплава на поверхности образцов с ксенолитами осадочных пород и клинкера. На этом участке встречаются глыбы паралавы до 1 м в сечении. Видимая мощность пирогенных образований центральной зоны достигает 30 м (Рис. 2.6, а).

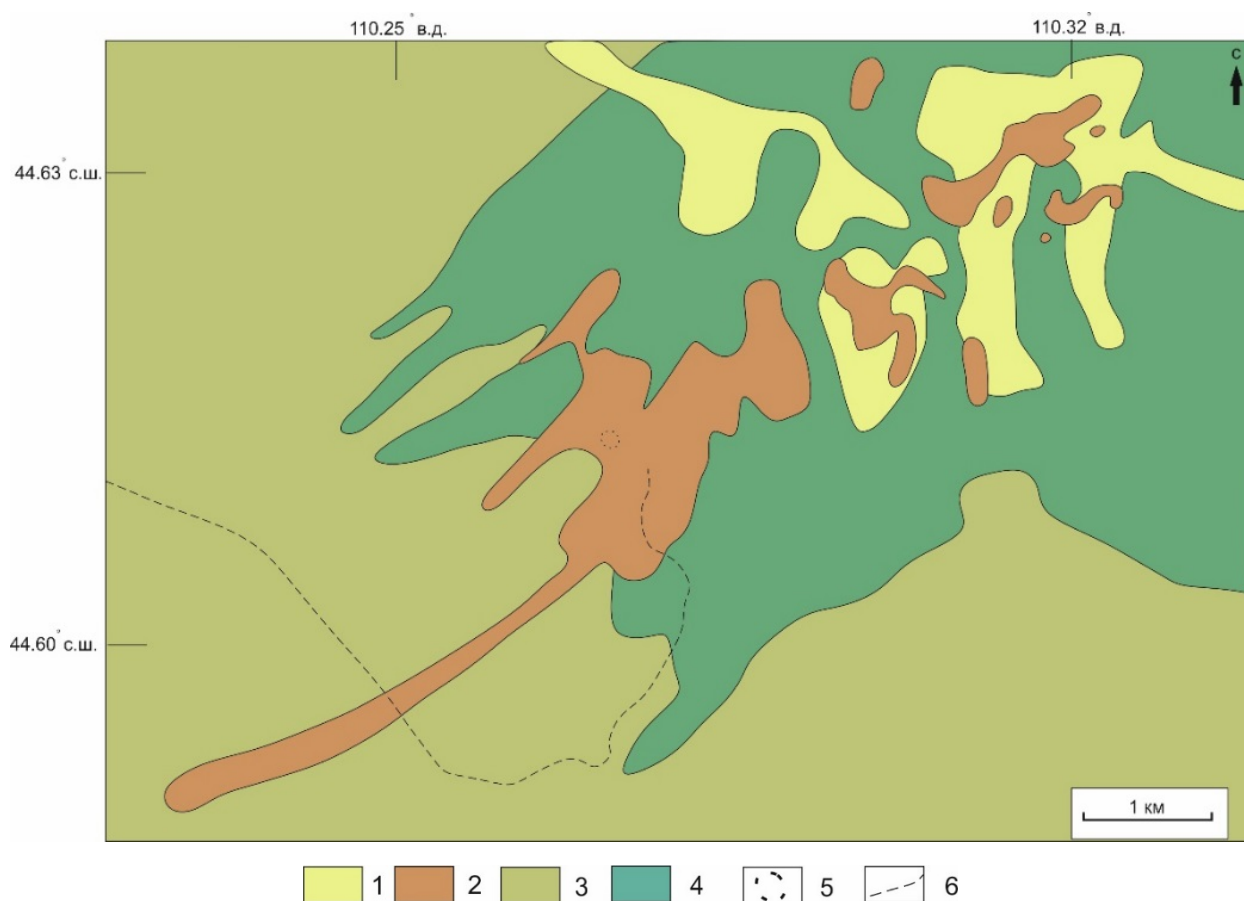


Рисунок 2.4. Схематическая геологическая карта пирометаморфического комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

1 – делювиально-аллювиальные отложения (Q_4); 2 – пирогенно изменённые породы, клинкеры и паралавы; 3 – песчано-конгломератовая толща дзунбаинской свиты (K_1); 4 – глины, песчаники и угленосные аргиллиты дзунбаинской свиты (K_1); 5 – очаг угольного пожара 1932-1949 гг.; 6 – дорога.

Во время полевых работ 2023 г. были впервые изучены выходы пирогенных образований в северо-восточной части комплекса. Здесь расположены три депрессии размером в максимальной горизонтальной проекции до 800 – 900 м, в которых обожжённые пелиты и стекловатый клинкер вскрыты временными водотоками и образуют небольшие холмы высотой до 3 – 4 м (Рис. 2.6, б). В бортах депрессий находятся останцы слоистой осадочной толщи мощностью 30 – 40 м, сложенной песчаником с карбонатным цементом, глиной и обожжённым пелитом (Рис. 2.6, в).

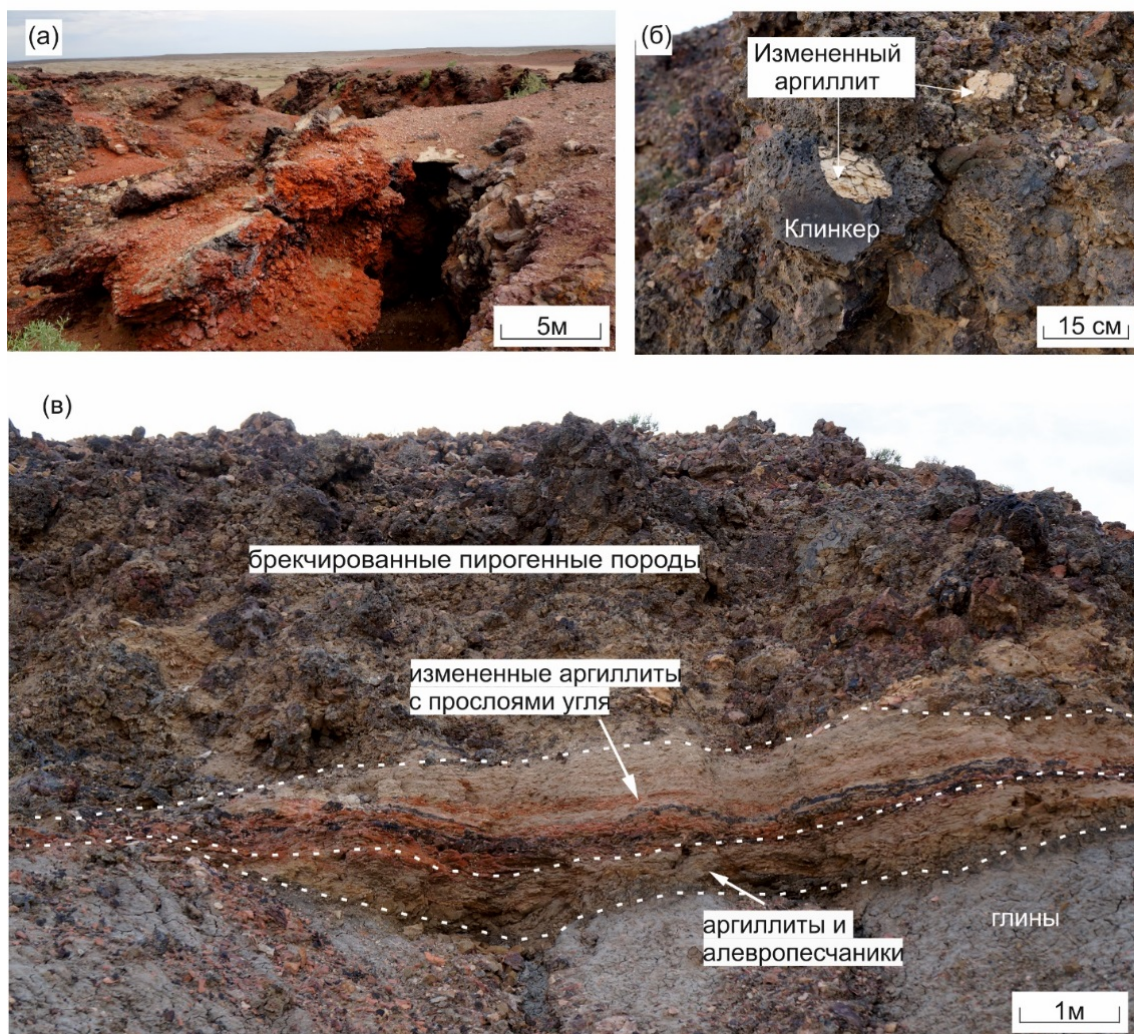


Рисунок 2.5. Рельеф и разрез пирогенных пород в центральной части комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

(а) – небольшие провалы (пещеры) после обрушений пирогенных пород; (б) – стекловатый клинкер с ксенолитом изменённого аргиллита из слоя спёкшихся (брекчированных) пород; (в) – разрез пирогенной толщи.

На территории комплекса Хамарин-Хурал-Хид ранее проводились геологоразведочные работы [Шипулин, 1940]. Здесь было выполнено ручное бурение, дана характеристика бурого угля и оценены его примерные запасы (около 19 тонн по категории В). Геологоразведочными дудками на глубине 6 м был вскрыт угленосный пласт мощностью 8.2 м. По количеству пирита бурый уголь относится к самовозгорающемуся и при пересчете на горючую массу имеет следующий элементный состав (мас.%): С 57.58, Н 5.40, N 3.46, О 32.64. Зольность бурого угля составляет 16 – 23 %, а теплотворная способность варьирует от 3910 до 4920 ккал/гр [Шипулин, 1940].

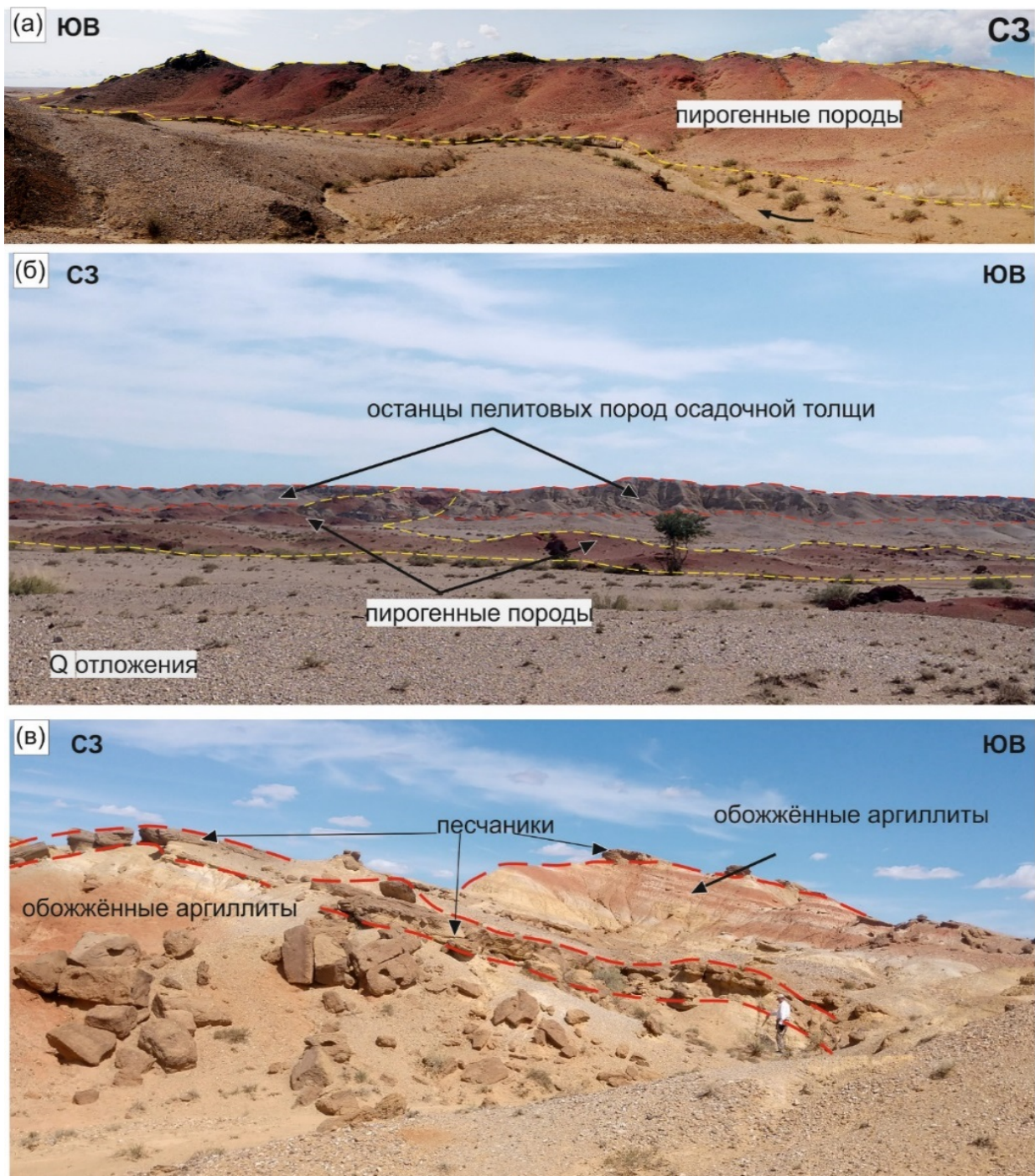


Рисунок 2.6. Геологическое строение северо-восточной части комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

(а) – вид на северо-восточное обрамление центральной части комплекса с борта депрессии; (б) – коренные выходы осадочной толщи и пирогенных пород; (в) – складчатое залегание осадочных пород на борту депрессии.

ГЛАВА 3. ТИПЫ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Среди пирогенных пород в комплексах Монголии преобладают стекловатые массивные клинкеры, чёрные, сиреневатые или красноватые, иногда кавернозные, содержащие ксенолиты термически изменённых аргиллитов и тонкие прожилки паралав (Рис. 3.1, а). Паралавы представлены тонкозернистыми породами со следами течения расплава на поверхности образцов. Встречаются сильно кавернозные разновидности с большим количеством пустот (реликты газовых полостей), ксенолитов клинкера, осадочных и пирогенно изменённых пород (Рис. 3.1, б-г).

Породы пирометаморфических комплексов Монголии демонстрируют широкие вариации концентраций петрогенных оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , K_2O , Na_2O), которые без дополнительных пояснений нельзя сопоставить с составами изверженных пород. Некоторые образцы паралав по внешнему облику и петрографическим особенностям похожи на вулканические породы. Поэтому, для сравнительной визуализации геохимических данных составы пирогенных пород приводятся на TAS диаграмме вулканических пород, мультиэлементных нормированных к примитивной мантии и хондриту распределениях.

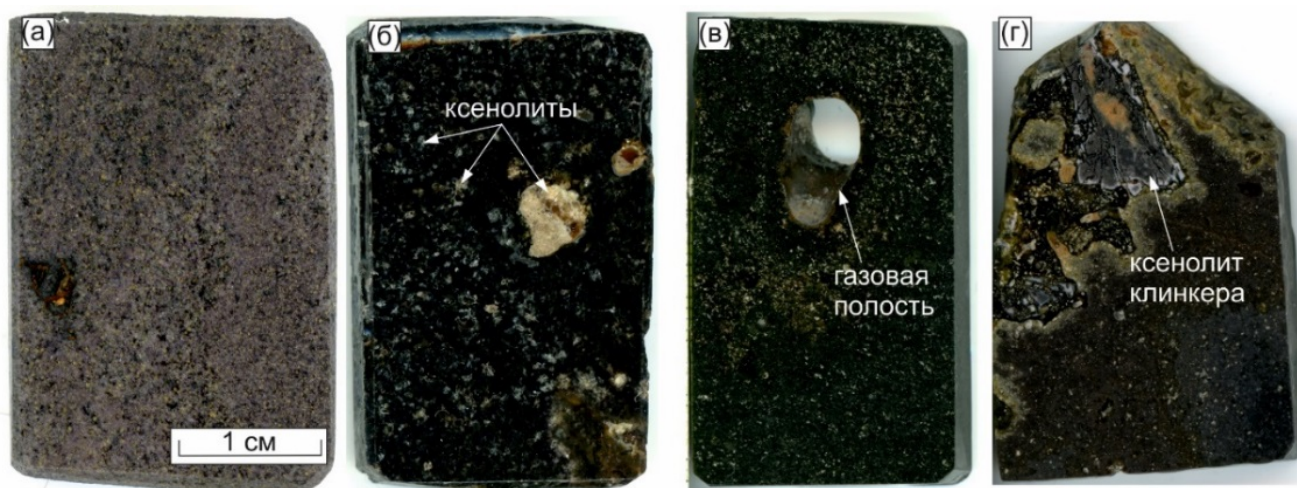


Рисунок 3.1. Образцы клинкера и мелилит-нефелиновых паралав Нилгинского комплекса (а, б) и Хамарин-Хурал-Хида (в, г) в полированных срезах.

(а) – клинкер, обр. MN-1125; (б) – паралава с ксенолитами обожжённых осадочных пород, обр. MN-1179; (в) – паралава с газовой полостью, обр. MN-1411; (г) – паралава с ксенолитом клинкера, обр. MN-1420.

3.1. Геохимическая характеристика пород Хамарин-Хурал-Хида

Валовый состав и концентрации элементов-примесей в терригенных осадочных и образованных из них пирогенных породах комплекса Хамарин-Хурал-Хид определялись в образцах аргиллита, алевропесчаника, термически изменённого аргиллита и клинкера. На TAS диаграмме безводные точки состава этих пород попадают в поля дацита и риолита (Рис. 3.2). Для алевропесчаника и аргиллитов концентрации SiO_2 составляют 68 – 81 мас.% при сумме щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 2 – 5.4 мас.% (Приложение А1, ан. 1 – 3). Количество Al_2O_3 варьирует в широких пределах от 9.4 до 23.1 мас.%. Для пород характерно преобладание Fe_2O_3 над FeO : 0.8 – 4.3 мас.% и 0.2 – 0.6 мас.%, соответственно. В небольших количествах (до 1.6 мас.% в сумме) присутствуют TiO_2 , MgO , MnO , CaO , P_2O_5 . Потери при прокаливании составляют 1.5 – 7 мас.%.

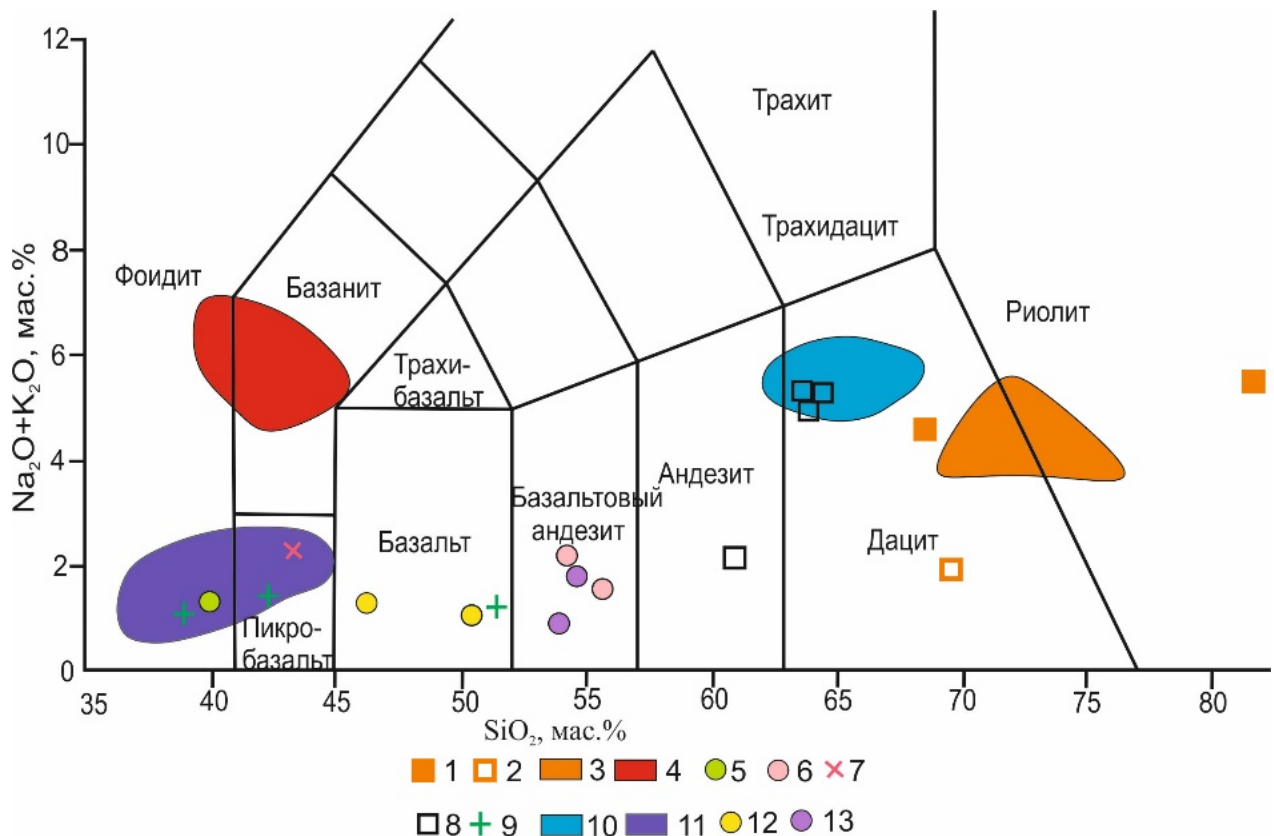


Рисунок 3.2. TAS диаграмма для пород пирометаморфических комплексов.

Хамарин-Хурал-Хид (1-7): 1 – пелиты; 2 – обожжённый аргиллит; 3 и 4 – клинкер и мелилит-нефелиновые паралавы; 5 и 6 – железистые паралавы; 7 – железистая пирогенная порода. Нилгинский комплекс (8-13): 8 – обожжённый аргиллит; 9 – силикатно-карбонатные осадочные породы; 10 и 11 – клинкер и мелилит-нефелиновая паралава; 12, 13 – плагиоклаз-пироксеновая ± индиалитовая паралава.

Клинкер содержит 67.7 – 75 мас.% SiO_2 при близких концентрациях Na_2O и K_2O , сумма которых составляет 3.6 – 5.3 мас.% (Приложение А1, ан. 4 – 8). Содержание Al_2O_3 варьируют в диапазоне 13.4 – 17.8 мас.%, а Fe_2O_3 и FeO 0.1 – 3.4 и 0.2 – 3.5 мас.%, соответственно. Количество других петрогенных компонентов не превышает 2.3 мас.%, а потери при прокаливании составляют не более 4.5 мас.%. На диаграмме нормированных мультиэлементных распределений осадочные породы и клингер комплекса Хамарин-Хурал-Хид имеют близкие формы с максимумами Cs, U, La, Pb, Nd, Sm, Gd и минимумами Ba, Nb, P, Zr, Hf, Ti, Y (Рис. 3.3, а).

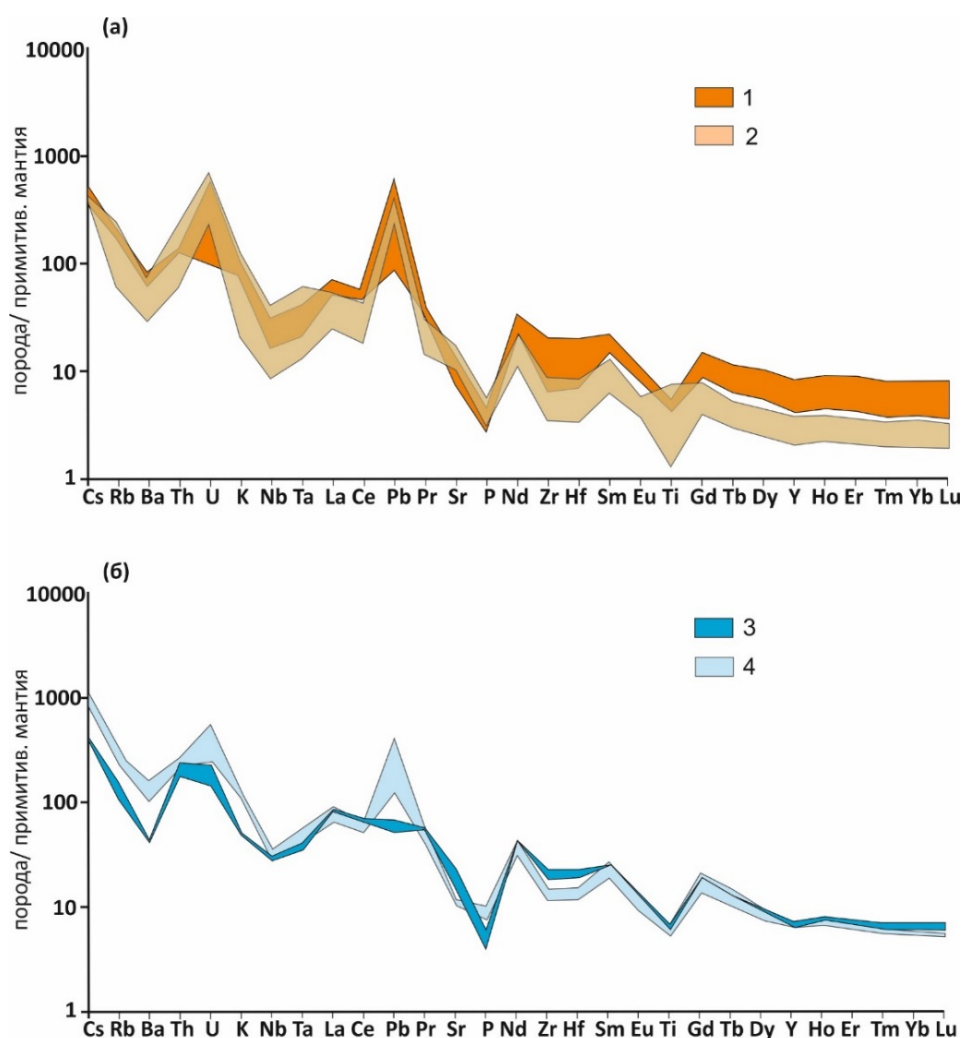


Рисунок 3.3. Мультиэлементные распределения для осадочных пород, изменённых аргиллитов и клинкеров пирометаморфических комплексов (нормированы к примитивной мантии, по McDonough, Sun, 1995).

(а) Породы комплекса Хамарин-Хурал-Хид: 1 – неизменённые пелиты (аргиллиты, алевропесчаники); 2 – кристобалитовый клингер.

(б) Породы Нилгинского комплекса: 3 – клинкеры на останцах и вблизи карьера Тугруг; 4 – изменённые аргиллиты на останцах и вблизи карьера Тугруг.

Термически изменённые карбонатно-силикатные породы представлены обр. MN-1423, который отличается высокими содержанием карбонатной составляющей (40 мас.% CaO, 26.2 мас.% CO₂), и низким – алюмосиликатной (16.3 мас.% SiO₂, 9.1 мас.% Al₂O₃) (Приложение А2, ан. 1). Содержания других петрогенных оксидов составляет менее 3 мас.%.

Паралавы комплекса Хамарин-Хурал-Хид разнообразны по минеральному составу. На основе минерально-фазового анализа было выделено 4 разновидности паралав:

1. мелилит-нефелиновая;
2. тридимит-секанинаитовая;
3. кристобалит-фаялитовая;
4. плагиоклаз-пироксеновая.

Тридимит-секанинаитовые и кристобалит-фаялитовая паралавы составляют группу железистых паралав. Валовый и геохимический составы были определены для всех разновидностей, кроме плагиоклаз-пироксеновой паралавы (обр. MN-1406).

Мелилит-нефелиновые паралавы комплекса Хамарин-Хурал-Хид имеют недосыщенный по кремнезёму состав (39.7 – 45.4 мас.% SiO₂) при резком преобладании Na₂O (4.5 – 6.5 мас.%) над K₂O (0.3 – 0.7 мас.%) (Приложение А2, ан. 7 – 15). На TAS диаграмме точки состава мелилит-нефелиновых паралав попадают в поля фойдита и базанита (Рис. 3.2). Для паралав характерны близкие концентрации Al₂O₃ (17.5 – 21.1 мас.%) и CaO (17.5 – 23.5 мас.%), а количества FeO и MgO составляют 2.2 – 4.1 и 3.5 – 5.3 мас.%, соответственно. В виде примесей присутствуют (мас.%): TiO₂ 0.7 – 0.9, MnO 0.2 – 0.3, P₂O₅ 0.2 – 1.3, S_{общ} до 0.4, потери при прокаливании не превышают 2 мас.%. На нормированных мультиэлементных распределениях наблюдаются максимумы Ba, U, La, Sr, Sm, Gd и минимумы Rb, K, Pb, P, Ti (Рис. 3.4, а).

Карбонатно-силикатная порода (реликт мергелистого известняка, обр. MN-1423) по сравнению с мелилит-нефелиновыми паралавами имеет минимальные концентрации примесных элементов (за исключением Cs, Rb, U) и форму их нормированного распределения, близкую к таковым для паралав (Рис. 3.4, а).

Тридимит-секанинаитовые паралавы изучались в обр. MN-1363 и MN-1368. По соотношению кремнезёма (SiO_2 54.6 – 56.0 мас.%) и суммы щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 1.8 – 2.2 мас.%) на TAS диаграмме точки состава этой паралавы попадают в поле базальтового андезита (Рис. 3.2).

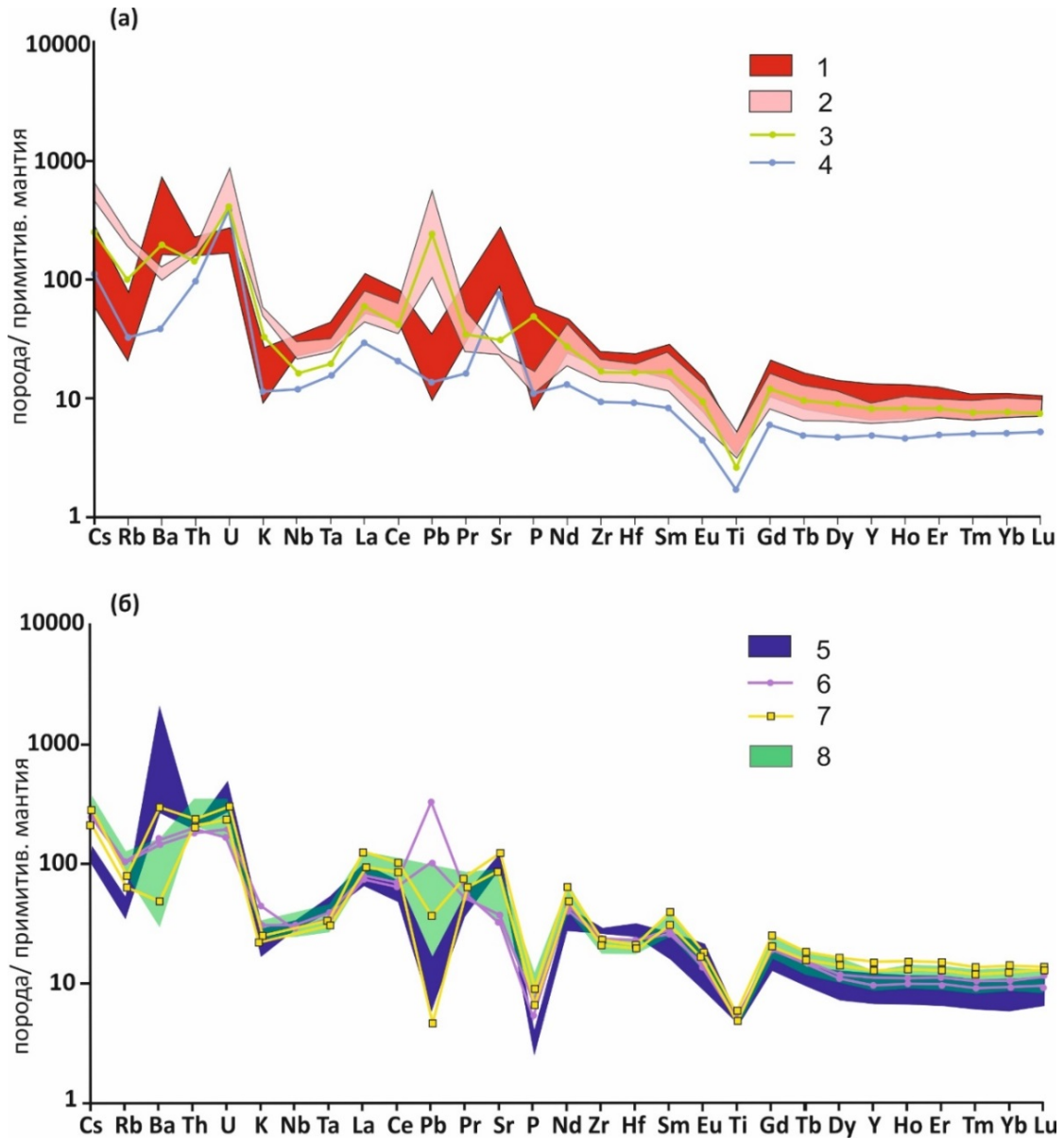


Рисунок 3.4. Мультиэлементные распределения для паралав и реликтовых карбонатно-силикатных пород пирометаморфических комплексов (нормированы к значениям в примитивной мантии, по McDonough, Sun, 1995).

(а) – пиропороды комплекса Хамарин-Хурал-Хид: 1 – мелилит-нефелиновая паралава; 2 – тридимит-секанинаитовая паралава; 3 – кристобалит-фаялитовая паралава; 4 – карбонатно-силикатная порода (реликт мергелистого известняка), обр. MN-1423.

(б) – пирогенные породы Нилгинского комплекса: 5 – мелилит-нефелиновая паралава на останцах; 6, 7 – плагиоклаз-пироксен-индиалитовая и плагиоклаз-пироксеновая паралавы вблизи карьера Тугруг, соответственно; 8 – карбонатно-силикатные осадочные породы.

Содержание остальных петрогенных оксидов следующее (мас.%): TiO_2 0.6 – 1.0, Al_2O_3 15.0 – 18.2, FeO 13.7 – 16.2, Fe_2O_3 3.9 – 5.1, MnO 0.4 – 1.1, MgO 1.3 – 1.4, CaO 1.3 – 1.8, P_2O_5 0.2 – 0.4 (Приложение А2, ан. 1, 2). Потери при прокаливании составляют 1.4 – 1.6 мас.%. Нормированные мультиэлементные распределения имеют близкие формы с максимумами U, Pb, Nd, Sm и Gd и минимумами Ba, Nb, P и Ti (Рис. 3.4, а).

Для других железистых петрогенных пород и кристобалит-фаялитовой паралавы характерен существенно железистый состав (40 – 52 мас.% $\text{FeO}_{\text{общ}}$), и они не имеют аналогов среди вулканических пород.

Кристобалит-фаялитовая паралава в обр. MN-1370 имеет следующий состав (мас.%): SiO_2 39.2, TiO_2 0.5, Al_2O_3 12.0, FeO 19.6, Fe_2O_3 19.0, MnO 1.4, MgO 0.9, CaO 2.8, Na_2O 0.4, K_2O 0.9, P_2O_5 1.0. В нормированном мультиэлементном распределении паралавы наблюдаются максимумы Ba, U, Pb, P и минимумы Rb, Th, Nb (Рис. 3.2, а) (Приложение А2, ан. 3).

Железистые петрогенные породы в обр. MN-1369 и MN-1416 (вероятно, реликты железистых алевропесчаников) содержат (мас.%): 27 – 43 SiO_2 , 8.3 – 8.4 Al_2O_3 , 30 – 52 Fe_2O_3 , потери при прокаливании < 1.2 (Приложение А2, ан. 4, 5).

3.2. Геохимическая характеристика пород Нилгинского комплекса

Аргиллиты и образованный из них клинкер Нилгинского комплекса имеют близкие валовые составы (Приложение А1, ан. 9 – 12). По соотношению SiO_2 (62.6 – 68.3 мас.%) и суммы $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ (4.8 – 6.1 мас.%) на TAS диаграмме большинство точек состава клинкера и аргиллитов попадает в поле дацита (Рис. 3.2). Для этих пород характерно незначительное преобладание K над Na. Количество Al_2O_3 в породах варьирует в диапазоне 18.6 – 20.1 мас.%. В клинкере отношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ составляет 0.05 – 0.12 при максимальной концентрации FeO 4.5 мас.%, а в аргиллите содержится 1.3 мас.% FeO и 4.2 мас.% Fe_2O_3 . В виде примесей с содержанием до 1.6 мас.% отмечаются TiO_2 , MgO и CaO , количество

MnO и P₂O₅ не превышает 0.2 мас.%. Потери при прокаливании составляют 0.8 – 2.5 мас.%. Нормированные мультиэлементные распределения клинкера и аргиллитов имеют близкие формы с максимумами Cs, Nd, Pb, Sm, Gd и минимумами Ba, Nb, P, Zr, Hf, Ti (Рис. 3.3, б).

Пиропороды, отобранные вблизи карьера *карьера Тугруг*, отличаются по химическому составу от таковых, слагающих останцы на площади Нилгинского комплекса. Содержание макрокомпонентов и элементов-примесей было определено для пирогенно изменённого аргиллита и клинкера, которые имеют близкие валовые составы (Приложение А1, ан. 13, 14). Содержание SiO₂ 60.4 – 61.1 мас.% и сумма K₂O + Na₂O 1.6 – 2.2 мас.%. На TAS диаграмме точки состава пород попадают в поле андезита (Рис. 3.2). Породы содержат значительное количество Al₂O₃ (23.0 – 23.4 мас.%). В аргиллите FeO (4.5 мас.%) преобладает над Fe₂O₃ (3.2 мас.%), в то время как образованный из него клинкер содержит 3.9 мас.% FeO и 4.5 мас.% Fe₂O₃. В виде примесей с концентрацией < 2.8 мас.% присутствуют TiO₂, MgO и CaO, и < 0.12 мас.% – MnO, P₂O₅. Потери при прокаливании < 1.5 мас.%. Нормированные мультиэлементные распределения пирогенных пород вблизи карьера Тугруг имеют близкие формы с максимумами Cs, Nd, Sm, Gd и минимумами Ba, P, Zr, Hf, Ti (Рис. 3.3, б)

Среди паралав Нилгинского комплекса по минерально-фазовому составу выделяются три разновидности:

1. мелилит-нефелиновая;
2. плагиоклаз-пироксеновая;
3. плагиоклаз-пироксен-индиалитовая.

Мелилит-нефелиновые паралавы имеют недосыщенный по кремнезему состав (SiO₂ 36.7 – 44.4 мас.%), и большинство точек их состава на TAS диаграмме попадает в поле фойдита при вариациях суммы щелочей Na₂O + K₂O от 0.8 до 2.3 мас.% (Приложение А3, ан. 1 – 4, Рис. 3.2). Состав паралав следующий (мас.%): Al₂O₃ 13.7 – 16.0, FeO 7.0 – 10.0, MgO 7.0 – 8.9, CaO 22.6 – 23.9. Примеси TiO₂ и Fe₂O₃ не превышают 1.9 мас.%, MnO < 0.5 мас.%, P₂O₅ < 0.1

мас.%, и потери при прокаливании 0.8 – 2.4 мас.%. Во всех образцах паралав обнаружена сера до 0.25 мас.%. Нормированные мультиэлементные распределения паралав имеют максимумы Ba, U, La, Sr, Nd, Gd и минимумы Th, K, Pb, P, Ti (Рис. 3.4, б).

Плагиоклаз-пироксеновая паралава вблизи карьера Тугруг. Точки состава по содержанию SiO₂ (46.1 – 50.4 мас.%) и суммы щелочей K₂O + Na₂O (1.2 – 1.4 мас.%) на TAS диаграмме попадают в поле базальта (Рис. 3.2). Порода характеризуется высокой глинозёмистостью (21.4 – 23.1 мас.% Al₂O₃) и содержит (мас.%): CaO 11.9 – 15.3, FeO 5.2 – 5.8, Fe₂O₃ 0.2 – 2.2, MgO 4.8 – 5.3. Примеси TiO₂, MnO, P₂O₅ не превышают 1 мас.%, потери при прокаливании < 1.5 мас.% (Приложение А3, ан. 8, 9).

Плагиоклаз-пироксен-индиалитовая паралава вблизи карьера Тугруг. Точки состава находятся в поле базальтового андезита при незначительных вариациях SiO₂ (54 – 54.6 мас.%) и суммы щелочей K₂O + Na₂O в пределах 0.8 – 1.8 мас.% (Рис. 3.2). Содержания других петрогенных оксидов следующие (мас.%): Al₂O₃ 23.9 – 26.1, FeO 8 – 9.9, MgO 2.8 – 3.1, CaO 4.0 – 6.3, потери при прокаливании < 1.5 мас.% (Приложение А3, ан. 10, 11).

Определён также состав нескольких образцов карбонатно-силикатных осадочных пород вблизи карьера Тугруг. Их составы широко варьируют по количеству SiO₂ 38.9 – 51.4 мас.% и сумме K₂O + Na₂O 1.1 – 1.5 мас.% (Рис. 3.2). Для пород характерно крайне высокое содержание Al₂O₃ (19 – 27 мас.%) и небольшие вариации других оксидов (мас.%): FeO 0.9 – 5.8, Fe₂O₃ 7.5 – 15.7, MgO 2.5 – 5.3, CaO 5.6 – 11.8, потери при прокаливании 2.5 – 3 мас.%. Примесными элементами являются Ti, Mn, P (в оксидной форме < 1 мас.%) (Приложение А3, ан. 5-7). Нормированные мультиэлементные распределения плагиоклаз-пироксеновой ± индиалитовой паралав и карбонатно-силикатных осадочных вблизи карьера Тугруг имеют близкие формы (за исключением Ba и Pb) с минимумами K, P, Ti и максимумами Cs, La, Sr, Nd, Sm, Gd (Рис. 3.4, б).

ГЛАВА 4. МИНЕРАЛЬНО-ФАЗОВЫЕ СОСТАВЫ ПИРОГЕННЫХ ПОРОД

4.1. Минерально-фазовые ассоциации пород

Минеральные ассоциации основных типов пирогенных пород представлены в Таблице 4.1.

Клинкеры сложены кислым стеклом, в котором находятся оплавленные зёрна различных минералов (циркон, кварц и др.), реликты ксенолитов аргиллита, а также новообразованные минералы группы кордиерита ($(\text{MgFe})_2\text{Al}_3(\text{AlSi}_5\text{O}_{18})$) – кордиерит-секанинаит и индиалит-ферроиндиалит. Интерстиции между минералами часто заполнены кристобалитом (особенно, в комплексе Хамарин-Хурал-Хид). Раскристаллизованные области клинкеров сложены лабрадором-битовнитом, ферросилитом и фаялитом, встречаются также микролиты магнетита и тонкоигольчатые выделения муллита микронных размеров.

Минерально-фазовый состав паралав разнообразен. Преобладают *мелилит-нефелиновые паралав*, матрикс которых сложен микрофенокристами основного плагиоклаза, Al-клинопироксена и мелилита. Интерстиции между породообразующими минералами заполнены нефелином или Са-нефелином (давидсмититом) с включениями К-Ва полевых шпатов, пирротина, минералов группы оливина, рёнита-куратита, шпинели. Реже встречаются зёрна апатита, сидерита, целестина и барита. Для этих паралав характерны реликты ксенолитов карбонатно-силиктаных осадочных пород, сложенные кальцитом, геленитом, диопсидом, монтichelлитом, магнетитом, перовскитом и др. более редкими минералами.

Породообразующими минералами *плагиоклаз-пироксеновых паралав* являются основной плагиоклаз, Al-минералы ряда диопсид-геденбергит (Нилгинский комплекс) и энстатит-ферросилит (Хамарин-Хурал-Хид). Второстепенные фазы представлены стеклом, К-Ва полевыми шпатами, фаялитом, баритом, ильменитом, минералами группы шпинели.

Таблица 4.1. Минеральные ассоциации пирогенных пород

Тип пород	Количество образцов, шт	Комплекс	Породообразующие минералы и фазы	Второстепенные минералы и фазы	Акцессорные минералы	Минералы и фазы ксенолитов	Реликтовые зёрна
Клинкер	8	Хамарин-Хурал-Хид, Нилгинский	Кислое стекло, минералы группы кордиерита	Кристобалит, муллит	Минералы группы шпинели, фаялит, плагиоклаз, ферросилит, фторапатит	Кислое стекло (реликты аргиллита)	кварц, циркон, рутил, ильменит, хромит, ксенотим
Железистые пирогенные породы	2	Хамарин-Хурал-Хид	Гематит, магнетит, магнетит-якобит	Ильменит	Фторапатит		КПШ, титанит, кварц
Кристобалит-фаялитовая паралава	1	Хамарин-Хурал-Хид	Кристобалит, фаялит	Al-магнетит, плагиоклаз, K-Na ПШ, K-стекло, ферросилит	Фторапатит, Fe-Ca-Mn фосфатный минерал	Минералы группы кордиерита, герцинит	
Тридимит-секанинаитовая паралава	2	Хамарин-Хурал-Хид	Тридимит, секанинаит	Фаялит, Ti-магнетит, ферросилит, кислое K-стекло	Плагиоклаз, фторапатит, кальцит, кристобалит		Кварц
Мелилит-нефелиновая паралава	25	Хамарин-Хурал-Хид, Нилгинский	Плагиоклаз, минералы ряда диопсид-геденбергит, мелилит, нефелин (давидсмитит)	Нефелин, мин-лы группы оливина (Са-фаялит, кирштейнит), K-Ва ПШ (цельзиан, Ва-ортоклаз), минералы группы шпинели и рёнита-куратита, K-стекло	Форстерит, фосфиды, целестин, барит, сидерит, апатит	Кальцит, геленит, диопсид, монтичеллит, перовскит, магнетит, пирротин	
Плагиоклаз-пироксеновая паралава	2	Хамарин-Хурал-Хид, Нилгинский	Плагиоклаз, ортопироксен	Фаялит-форстерит, K-Ва ПШ, минералы группы			Кварц
Плагиоклаз - пироксен-индиалитовая паралава	2	Нилгинский	Плагиоклаз, ортопироксен, индиалит	Si-Fe фаза, K-стекло, пирротин			

Матрикс *железистых паралав* сложен кристобалитом с включениями фаялита и Al-магнетита или срастаниями тридимита с секанинаитом. Породообразующими минералами *железистых пирогенных пород* являются гематит и промежуточные члены изоморфного ряда магнетит-якобсит.

4.2. Клинкеры

Минерально-фазовый состав частично раскристаллизованного *клинкера Хамарин-Хурал-Хида* изучался в обр. MN-1402, MN-1403 и MN-1365. В стекловатом матриксе породы находятся оплавленные зерна кварца, циркона, монацита, ильменита, рутила, хромита, а также новообразованные кристобалит, минералы группы кордиерита и субмикронные выделения муллита (Рис. 4.1, а). Интерстиции между минералами заполнены кристобалитом или кислым стеклом.

В обр. MN-1365 минералы группы кордиерита представлены кордиеритом и секанинаитом, а в обр. MN-1403 встречаются также футлярные кристаллы индиалита – ферроиндиалита (Рис. 4.1, б, в). Размеры микролитов составляют 50 – 100 мкм. Минералы имеют следующие вариации состава (мас.%): SiO₂ 44.8 – 56.7, Al₂O₃ 27.3 – 39.2, FeO 8.2 – 19.7, MgO 1.4 – 7.4 (Табл. 4.2, ан. 1 – 6, Приложение А4). В виде примеси часто отмечается K₂O в количестве 0.2 – 1.1 мас.%. Для зёрен (фенокристов и микролитов) характерна зональность, которая выражается в понижении значения индекса Mg#, Mg/(Mg + Fe + Mn) от центральной (0.23 – 0.59) к краевой (0.18 – 0.54) зонам (Рис. 4.2).

Обр. клинкера MN-1403 содержит раскристаллизованные участки, сложенные плагиоклазом, ортопироксеном и фаялитом (Рис. 4.1, в). Тонкоигольчатые выделения плагиоклаза представлены лабрадором-битовнитом *An*_{52–80} с примесью минала ортоклаза *Or*, KAlSi₃O₈ < 3 мас.% (Табл. 4.3, ан. 1). По данным СЭМ ЭДС и конфокальной Рамановской спектроскопии (КР-спектрам) пироксен диагностирован как ферросилит, содержащий < 8 мас.% Al₂O₃ и < 1 мас.% CaO (Табл. 4.3, ан. 2).

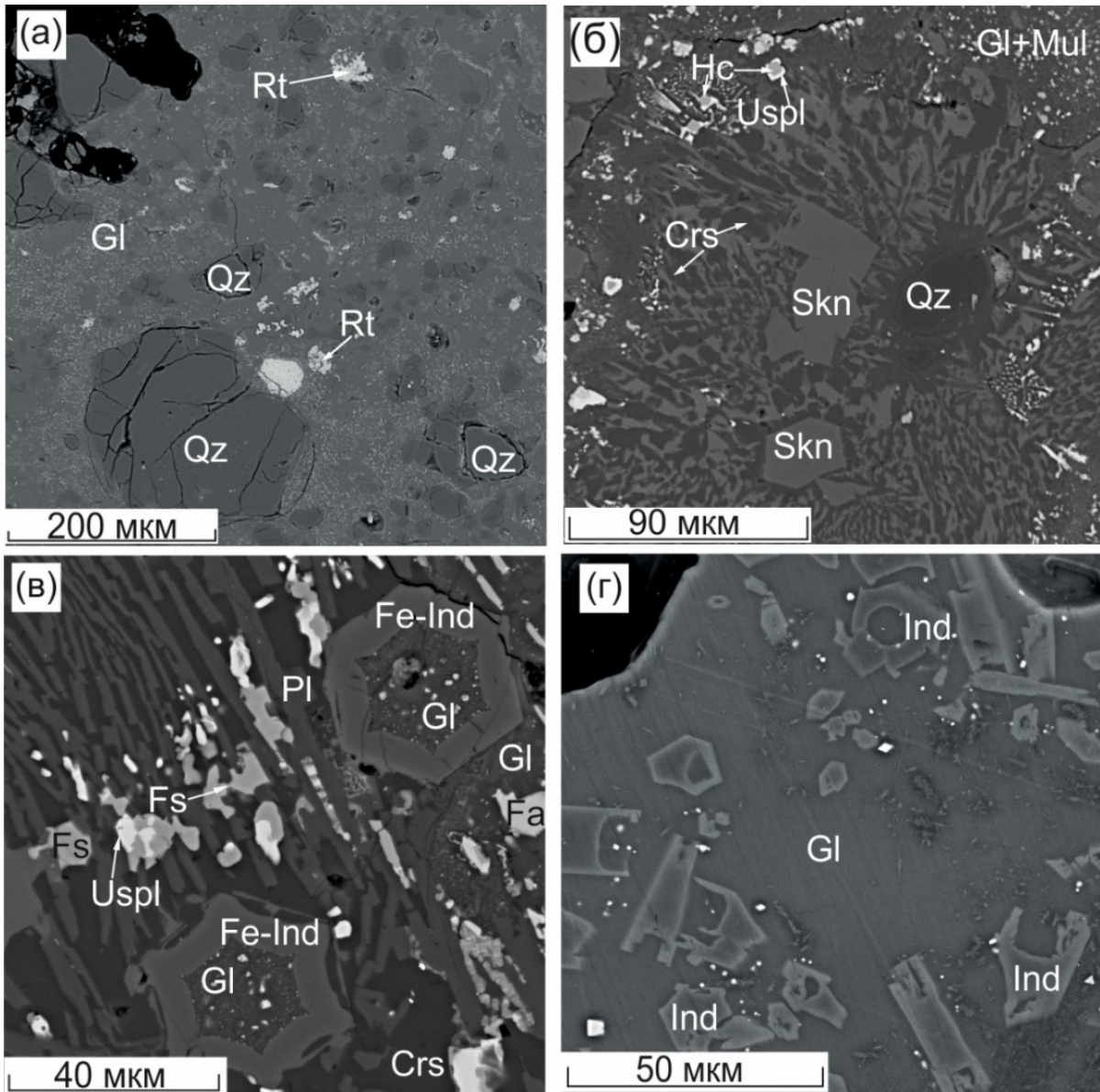


Рисунок 4.1. Фрагменты матрицы клинкеров комплекса Хамарин-Хурал-Хид (а-в) и Нилгинского (г).

(а) Реликтовые зерна кварца и рутила в стекловатом матрице клинкера, обр. MN-1402. (б) Новообразованные микролиты секанинаита и оплавленное зерно кварца в стекловатом матрице, содержащем выделения муллита, кристобалита и герцинита с каймой ульвошпинели, обр. MN-1403 (в) Раскристаллизованный фрагмент клинкера, сложенного футлярными микролитами ферроиндиалита, кристобалитом, плагиоклазом и ферросилитом с включениями фаялита, обр. MN-1403. (г) Скелетные кристаллы индиалита с каймой, обогащенной Fe (индиалита-ферроиндиалита) в стекловатом матрице, обр. MN-1126. Изображения BSE.

Gl – стекло, Rt – рутил, Qz – кварц, Skn – секанинаит, Crs – кристобалит, Mul – муллит, Hc – герцинит, Uspl – ульвошпинель, Fe-Ind – ферроиндиалит, Pl – плагиоклаз, Fa – фаялит, Fs – ферросилит, Ind – индиалит.

Таблица 4.2. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы кордиерита в клинкерах

	Хамарин-Хурал-Хид						Нилгинский комплекс						
	1365		1403				1125	1136		1137		1129	
	1 (20)	2 (8)	3 (16)	4 (6)	5 (7)	6 (1)	7 (6)	8 (8)	9 (16)	10 (14)	11 (16)	12 (11)	13 (14)
SiO ₂	48.64	47.90	48.19	47.47	49.71	47.75	46.92	47.96	47.29	46.75	46.54	46.48	46.47
TiO ₂	0.19	-	-	-	-	-	0.13	-	-	0.11	0.04	0.18	0.21
Al ₂ O ₃	33.81	31.98	31.30	32.77	30.49	32.88	33.56	32.65	31.67	32.78	32.54	33.70	33.45
FeO	9.81	13.39	14.58	11.14	13.12	9.65	8.72	7.85	10.34	10.01	11.99	6.53	8.19
MnO	-	-	-	-	-	-	-	1.84	3.74	1.11	1.40	-	-
MgO	6.78	5.23	4.87	7.03	5.38	7.08	8.2	7.54	5.39	7.04	5.73	9.54	8.02
K ₂ O	0.41	0.56	0.60	0.09	0.62	0.00	0.96	0.61	0.59	0.87	0.88	0.30	0.61
Сумма	99.64	99.05	99.54	98.49	99.32	97.36	98.49	98.45	99.02	98.67	99.12	96.72	96.94
	Формульные коэффициенты, ф. ед.												
Si	4.977	5.022	5.057	4.947	5.181	4.990	4.868	4.979	4.984	4.893	4.900	4.845	4.875
Ti	0.015						0.010			0.009	0.003	0.014	0.017
Al	4.077	3.952	3.871	4.025	3.745	4.050	4.104	3.995	3.933	4.044	4.037	4.140	4.136
Fe ²⁺	0.839	1.174	1.279	0.971	1.144	0.843	0.757	0.682	0.912	0.876	1.056	0.569	0.719
Mn								0.162	0.334	0.099	0.124		
Mg	1.035	0.817	0.762	1.092	0.835	1.103	1.268	1.166	0.846	1.098	0.899	1.482	1.254
K	0.054	0.074	0.080	0.011	0.082	0.000	0.127	0.081	0.079	0.116	0.118	0.040	0.082
Сумма	10.997	11.039	11.048	11.046	10.987	10.986	11.134	11.064	11.089	11.135	11.138	11.090	11.083
Mg#	0.55	0.41	0.37	0.53	0.42	0.57	0.63	0.58	0.40	0.53	0.43	0.72	0.63

Здесь и далее во всех таблицах номера образцов имеют префикс “MN-”. После порядкового номера в скобках – количество СЭМ ЭДС анализов, по которым рассчитаны средние значения. Прочерк – ниже предела обнаружения СЭМ ЭДС.

Формулы рассчитаны на 18 атомов кислорода. Mg#, Mg/(Mg + Fe + Mn).

1, 4, 12 – кордиерит; 2, 3 – секанинаит; 5 – ферроиндиалит; 6, 7, 13 – индиалит; 8, 10 – обогащенный Mn индиалит; 9, 11 – обогащенный Mn ферроиндиалит.

В стекловатом матриксе обр. MN-1403 были также обнаружены новообразованные минералы группы шпинели – изометричные зёрна герцинита с каймой ульвошпинели (Рис. 4.1, б, Рис. 4.7, а). В герцините часто отмечаются примеси V_2O_3 (< 1 мас.%), ZnO (< 1.6 мас.%) и Cr_2O_3 (< 2 мас.%) (Табл. 4.3, ан. 3, 4, Приложение А6). В ассоциации с кордиеритом встречается магнетит, содержащий до 70 мас.% Fe_2O_3 (Табл. 4.3, ан. 5). Интерстиции между новообразованными минералами по данным КР-спектроскопии заполнены кристобалитом, содержащим 1 – 3 мас.% Al_2O_3 . В матриксе находятся также зёрна муллита микронных размеров с примесью Fe_2O_3 до 3 мас.% (Рис. 4.1, б).

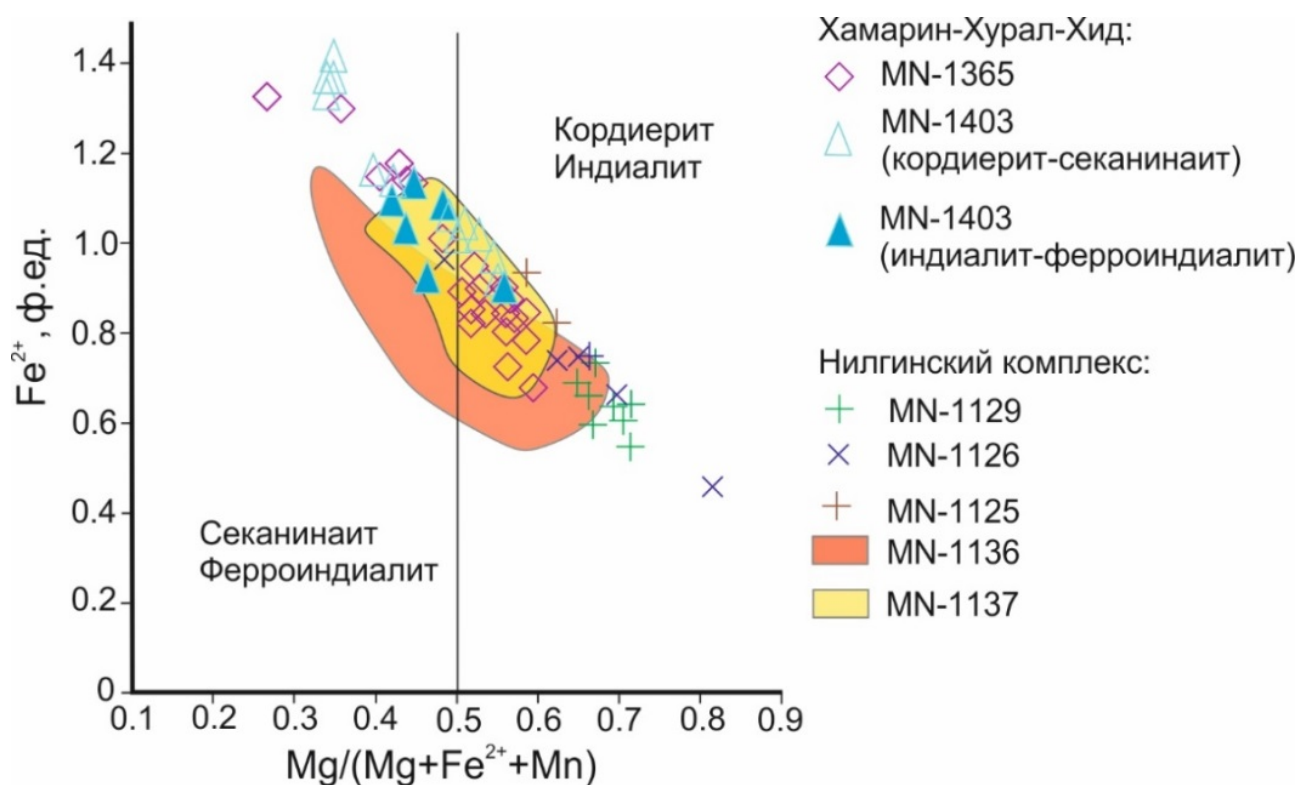


Рисунок 4.2. Вариации состава минералов группы кордиерита в клинкерах.

Таблица 4.3. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты акцессорных минералов кристобалитового клинкера, обр. MN-1403

	1(8)	2(8)	3(10)	4(7)	5(3)
SiO ₂	54.70	43.98	-	-	-
TiO ₂	-	1.19	2.22	22.29	-
Al ₂ O ₃	26.98	6.48	43.93	7.77	-
FeO	0.87	36.35	38.78	53.56	31.31
Fe ₂ O ₃	-	2.18	9.71	15.47	69.21
MnO	-	-	0.07	0.05	-
MgO	-	9.40	0.74	0.08	-
CaO	12.29	0.38	-	-	-
Na ₂ O	3.45	-	-	-	-
K ₂ O	0.48	-	-	-	-
V ₂ O ₃	-	-	0.40	0.42	-
ZnO	-	-	0.65	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	0.79	-	-
Сумма	98.76	99.95	97.28	99.66	100.52
Формульные коэффициенты, ф. ед.					
Si	2.506	1.777			
Ti		0.036	0.052	0.609	
Al	1.457	0.309	1.625	0.333	
Fe ²⁺	0.033	1.229	1.018	1.626	1.004
Fe ³⁺		0.066	0.229	0.423	1.997
Mn			0.002	0.002	
Mg		0.566	0.035	0.005	
Ca	0.603	0.016			
Na	0.306				
K	0.028				
V			0.010	0.012	
Zn			0.015		
Cr			0.020		
Сумма	4.933	3.999	3.006	3.008	3.001
O	8	6	4	4	4

1 – лабрадор; 2 – ферросилит; 3 – герцинит; 4 – ульвошпинель; 5 – магнетит

Большинство точек состава силикатных стёкол клинкера Хамарин-Хурал-Хида на TAS диаграмме попадает в поле риолита, реже – дацита и трахидациита при вариациях содержания SiO₂ 61.7 – 80.4 мас.% и суммы K₂O + Na₂O 3.7 – 11.4 мас.% (Рис. 4.3, а). Количество (мас.%) Al₂O₃, FeO, CaO составляет 8.6 – 18.8, 0 – 6.0 и 0 – 4.2, соответственно (Табл. 4.4, ан. 1 – 3; Рис. 4.4, Приложение А7). В виде примеси стекло содержит TiO₂ (< 1.6 мас.%) и в единичных анализах до 3.6 мас.% MgO. Согласно классификации Шенда стёкла являются плюмазитовыми (А/СНК 1 – 1.7, А/НК 1 – 1.8; Рис. 4.3, б). Стёкла, содержащие SiO₂ > 77 мас.%, наиболее близки к валовому составу алевропесчаника в обр. MN-1424. Количество Al₂O₃, CaO и K₂O в большинстве анализов стекла близко к содержанию данных компонентов в клинкере и пелитовых породах (Рис. 4.4).

Таблица 4.4. Средние составы (мас.%) стекла в клинкерах и в реликтах ксенолитов аргиллита

	Хамарин-Хурал-Хид			Нилгинский комплекс					
	1402	1403	1365	1125	1126	1129		1136	1137
	1(8)	2(15)	3(16)	4(13)	5(15)	6 (15)	7 (13)	8 (5)	9 (15)
SiO ₂	70.75	70.09	70.95	68.46	68.55	66.64	51.93	72.55	70.89
TiO ₂	1.47	1.03	1.46	0.96	0.99	1.18	0.68		0.49
Al ₂ O ₃	15.47	13.80	14.00	15.96	16.60	17.82	36.73	13.60	15.61
FeO	1.76	3.28	2.50	3.18	2.98	3.41	0.74	2.12	2.54
MnO	-	-	-	-	-	-	-	1.33	0.34
MgO	0.90	-	-	0.49	0.36	0.52	-	-	-
CaO	1.06	1.67	1.54	1.33	1.92	1.55	3.39	0.65	1.67
Na ₂ O	3.11	2.64	2.57	2.75	3.10	2.54	1.61	2.47	3.67
K ₂ O	3.11	4.66	4.75	4.46	3.94	5.11	3.01	5.67	4.08
Сумма	97.62	97.17	97.77	97.59	98.45	98.78	98.08	98.39	99.30
A/CNK	1.30	0.94	0.96	1.13	1.16	1.18		0.9	1.02
A/NK	1.82	1.31	1.32	1.55	1.69	1.6		1.13	1.46

Мольное отношение, $A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ и $A/NK = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$.

1 – 6, 8, 9 – стекло, 7 – реликт плавленного ксенолита аргиллита.

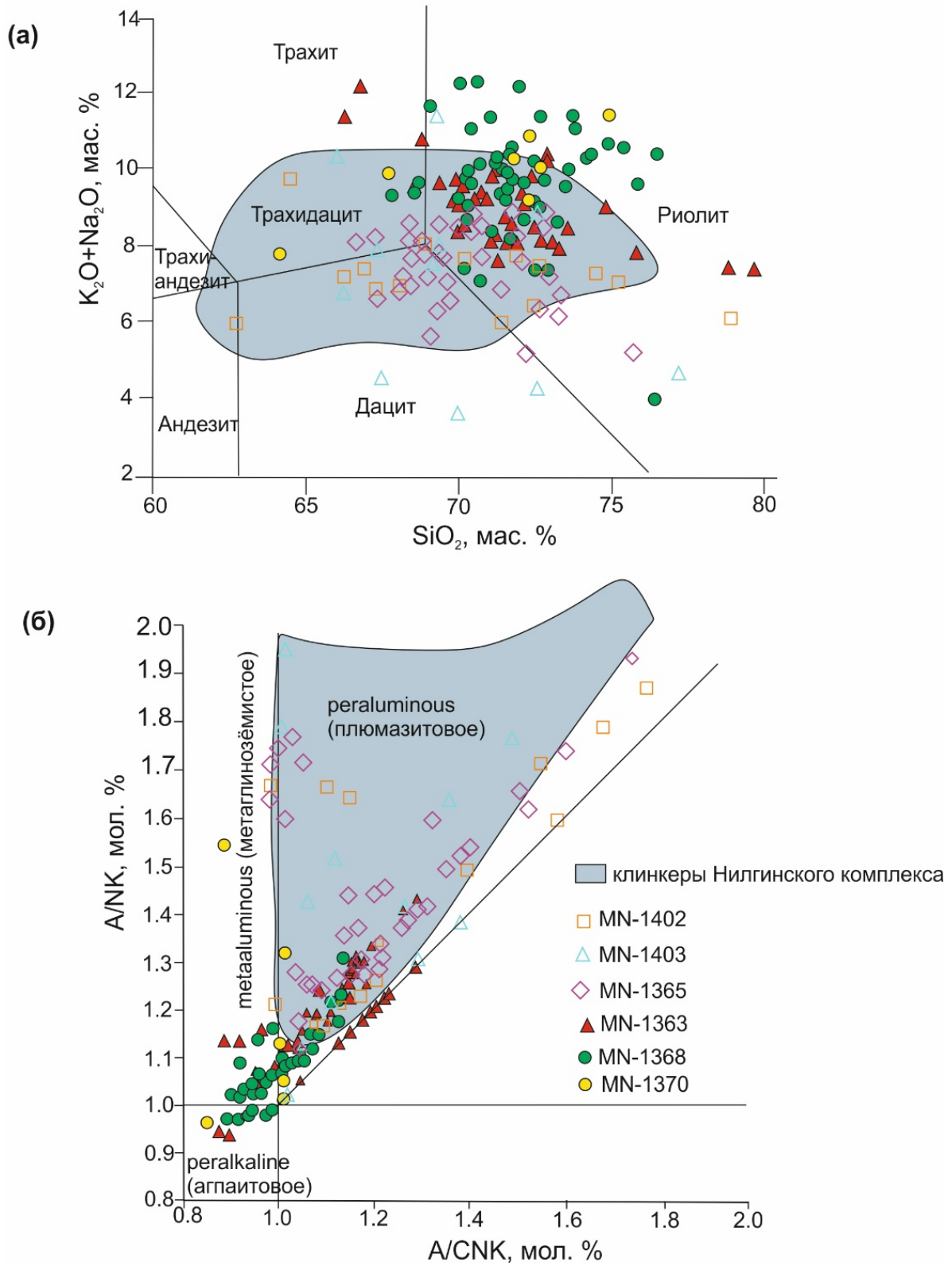


Рисунок 4.3. Фрагмент TAS диаграммы (а) и диаграмма Шенда (б) для стекла из матрикса клинкеров и железистых паралав.

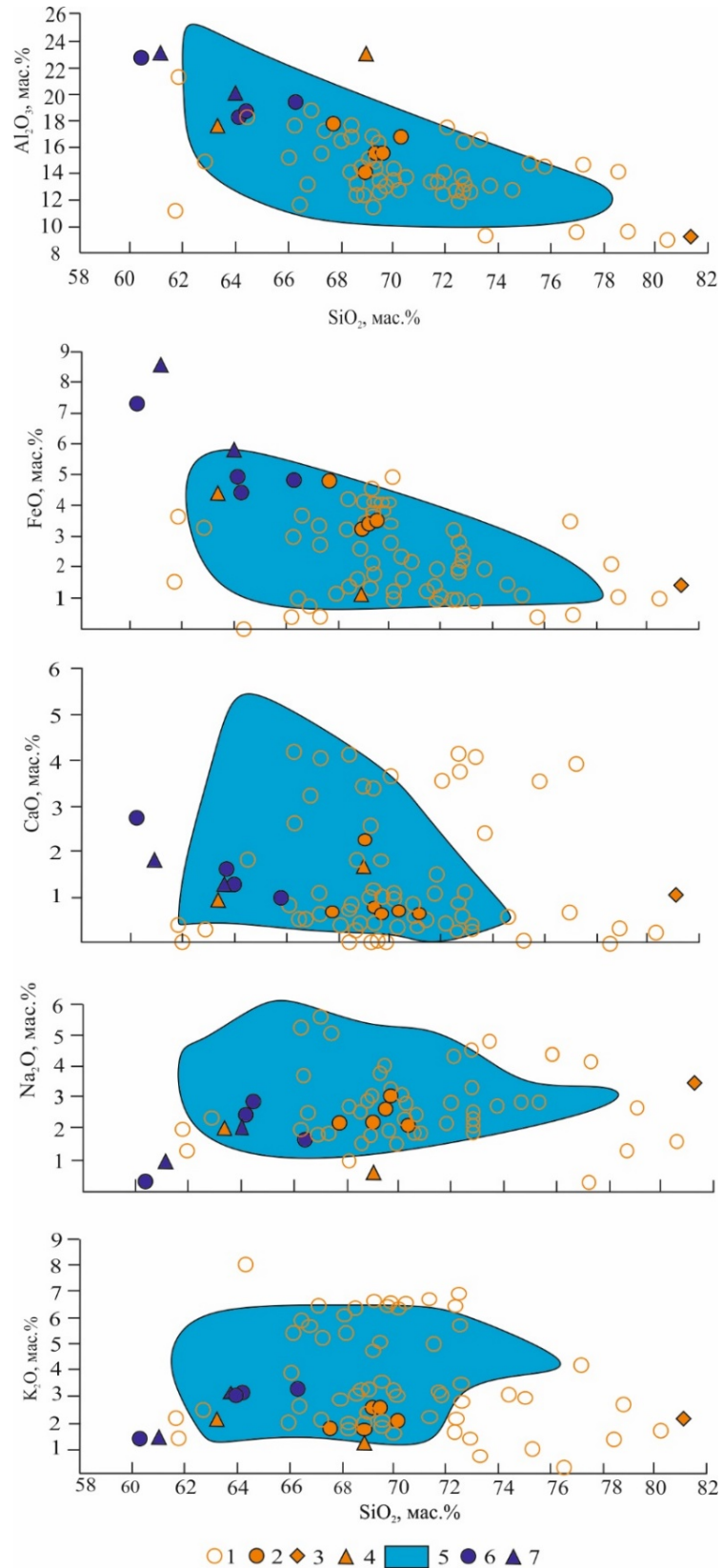


Рисунок 4.4. Соотношения между SiO_2 и Al_2O_3 , FeO , CaO , Na_2O , K_2O в пелитовых, пирогенно изменённых породах и в стекле из матрикса пород.

1 – 4 Хамарин-Хурал-Хид: 1 – стекло в клинкере; 2 – валовые составы клинкера; 3 – алевропесчаник, обр. MN-1424; 4 – аргиллиты и пирогенно изменённые пелиты.

5 – 7 Нилгинский комплекс: 5 – стекло из клинкеров; 6 – валовые составы клинкеров; 7 – аргиллиты и пирогенно изменённые аргиллиты.

Клинкеры Нилгинского комплекса представлены образцами с останцов Корона и Верблюд. Стекловатый матрикс пород содержит реликтовые (детритовые) зёрна кварца, монацита, циркона, ильменита и оплавленные ксенолиты аргиллита. Новообразованные минералы группы кордиерита в клинкерах представлены индиалитом-ферроиндиалитом и кордиеритом-индиалитом, детально описанными в [Перетяжко, Савина, 2018; Peretyazhko, Savina, 2023]. Значение показателя Mg# в индиалите составляет 0.6 – 0.7 при максимальном 0.8. Минералы этой группы образуют таблитчатые или скелетные кристаллы размером до 100 мкм, в которых от центра к краю наблюдается увеличение содержания Fe (Рис. 4.1, г). Индиалит имеет следующие вариации состава (мас.%): SiO₂ 45.0 – 53.2, Al₂O₃ 28.9 – 35.7, FeO 5.4 – 10.7, MgO 4.3 – 10.5, K₂O 0 – 2.3 (Табл. 4.2, ан. 7, Приложение А4). В обр. MN-1136 и MN-1137 минералы ряда индиалит-ферроиндиалит характеризуются повышенным содержанием Mn (до 5.4 мас.% MnO, Mg# 0.3 – 0.7; Табл. 2, ан. 8-11, Рис. 4.2). В стекловатом матриксе обр. MN-1129 в ассоциации с зёрнами муллита и недиагностированных Al-Fe-Mg безводных силикатов встречаются зональные микролиты и фенокристы, ядро которых слагает кордиерит (Mg# 0.64 – 0.75), а краевую зону – индиалит (Mg# 0.6 – 0.7). От центра к краю таких зональных зёрен отмечается увеличение содержания K₂O от 0.2 – 0.5 до 0.3 – 1.1 мас.% (Табл. 4.2, ан. 12, 13).

В клинкере преобладают стекло дацитивого и риолитового состава, в меньшей степени – трахидацитового при вариациях SiO₂ 62.4 – 78.1 мас.% и K₂O + Na₂O 5 – 9.1 мас.% (Рис. 4.3, а). Стекло также содержит (мас.%): Al₂O₃ 10.8 – 24.8, FeO 0.7 – 5.4, CaO 0 – 5.4, примеси TiO₂ и MgO < 1.8 мас.% (Табл. 4.4, ан. 4 – 6; Рис. 4.4, Приложение А4). В стекле из обр. MN-1136 и MN-1137 концентрация MnO достигает 5.4 мас.% (Табл. 4.4, ан. 8, 9, Приложение А4). Стекло клинкера плюмазитовое (A/CNK 1 – 2, A/NK 1.2 – 2.3, Рис. 4.3, б). Стекло плавленных ксенолитов пелитов в клинкере отличаются от стекла в матриксе пород заметно более высокими содержаниями Al₂O₃ 32.4 – 42 мас.%, CaO до 10.5 мас.% и низким SiO₂ 48.8 – 57.1 мас.% (Табл. 4.4, ан. 7).

4.3. Железистые паралавы и пирогенные породы комплекса Хамарин-Хурал-Хид

В центральной части комплекса Хамарин-Хурал-Хид были отобраны образцы тридимит-секанинаитовой паралавы (обр. MN-1363, MN-1368), кристобалит-фаялитовой паралавы (обр. MN-1370) и обогащенных железом пирогенно измененных осадочных пород (обр. MN-1369, MN-1416), вероятно, преобразованных железистых алевропесчаников.

Фаялит является породообразующим в кристобалит-фаялитовой паралаве и второстепенным в тридимит-секанинаитовой паралаве. В обр. MN-1370 многочисленные изометричные выделения фаялита Fa_{84-89} образуют структуру спинифекс вместе с Al-магнетитом на фоне скрытокристаллического или стекловатого матрикса (Рис. 4.5, а). Центральные зоны некоторых зёрен представлены гортонолитом Fa_{36-46} с содержанием Mn до 0.3 ф. ед. (Табл. 4.5, ан. 1, Приложение А5). Для фаялита характерна примесь P_2O_5 до 4 мас.%. Содержание основных компонентов в фаялите следующее (мас.%): SiO_2 28.1 – 34.0, FeO 55.2 – 63.3, MgO 3.0 – 5.7 (Табл. 4.5, ан. 2).

В тридимит-секанинаитовой паралаве зёрна фаялита Fa_{79-90} формируют удлиненные нитевидные образования длиной более 1 мм – структуру спинифекс матрикса (Рис. 4.5, б). В обр. MN-1368 фаялит характеризуется высоким содержанием минала тефроита Tph (до 14 мол.%). Состав оливина в данных паралавах следующий (мас.%): SiO_2 27.7 – 32.8, FeO 58.1 – 67.0, MnO 1.8 – 10.1, MgO 0.8 – 3, примеси $TiO_2 + Al_2O_3 < 1.5$ мас.% (Табл. 4.5, ан. 3, 4).

Полиморфы кремнезёма в железистых паралавах представлены как новообразованными фазами кристобалита и тридимита, так и реликтовыми зёрнами детритового кварца. В кристобалит-фаялитовой паралаве (обр. MN-1370) кристобалит является породообразующей фазой, заполняющей интерстиции между дендритовыми скоплениями зёрен фаялита и Al-магнетита. Встречаются также отдельные зёрна кристобалита размером до 100 мкм. Для кристобалита характерна примесь Al_2O_3 и FeO до 1.5 мас.%. В тридимит-секанинаитовой паралаве (обр. MN-1363, MN-1368) тридимит заполняет интерстиции между

зёрнами секанинита и образует кайму вокруг оплавленных зёрен кварца. Тридимит содержит примеси (мас.%): Al_2O_3 2 – 5, FeO 0.5 – 2.0 и K_2O < 0.5. В этой паралаве встречаются также редкие фрагменты матрикса с включениями кристобалита.

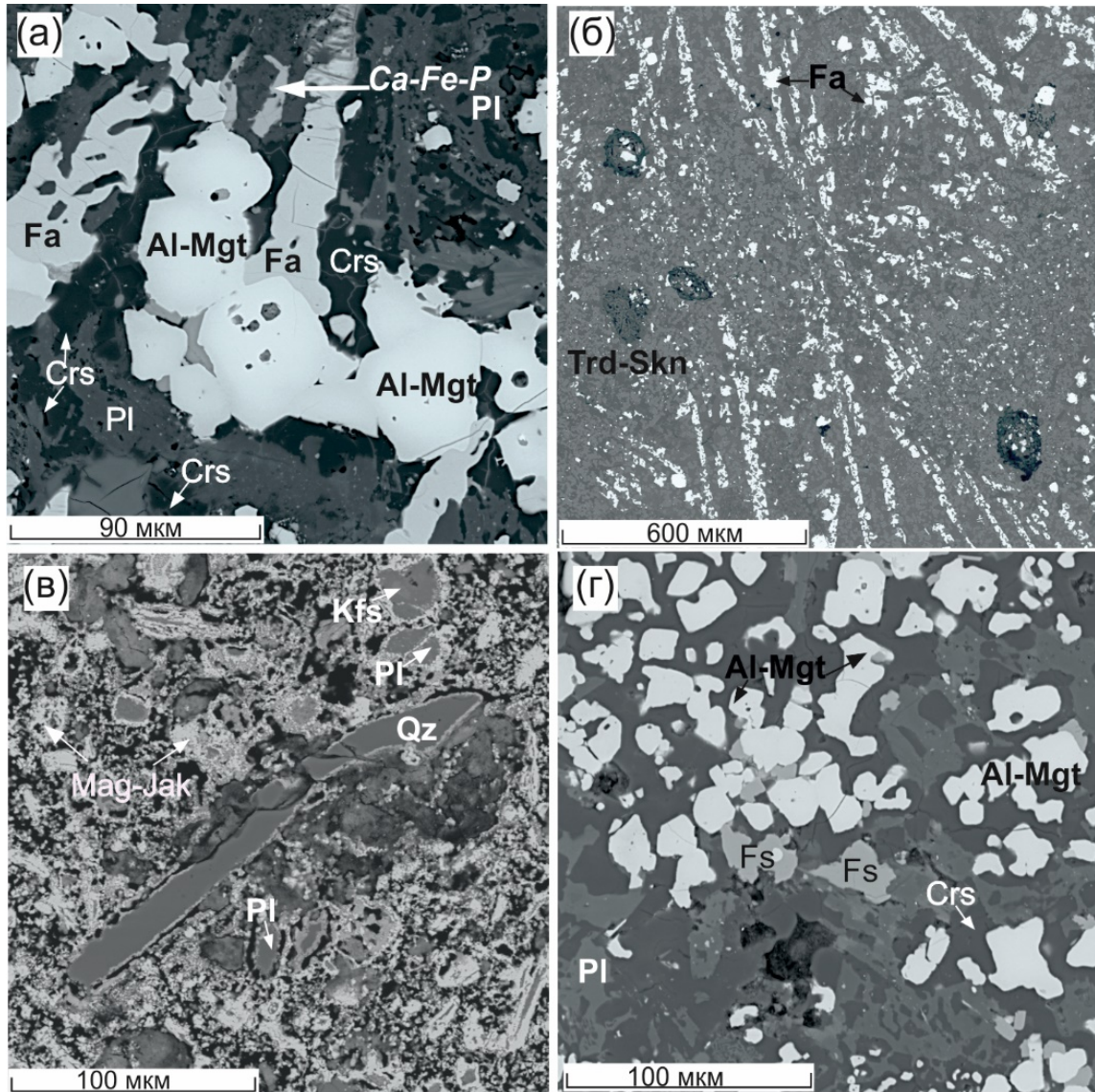


Рисунок 4.5. Фрагменты матрикса железистых паралав и железистых пирогенных пород комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

(а) – скопления зёрен Al-магнетита и фаялита формируют структуру спинифекс в кристобалитовом матриксе, содержащем включения плагиоклаза и недиагностированной Ca-Fe-P фазы, обр. MN-1370. (б) – скопления зёрен фаялита в тридимит-секанинитовом матриксе, обр. MN-1363. (в) – оплавленные зёрна кварца и полевых шпатов в агрегате магнетита-якобсита, обр. MN-1416. (г) – фрагмент матрикса, сложенный зёрнами Al-магнетита, ферросилита и основного плагиоклаза, обр. MN-1370.

Al-Mgt – Al-магнетит, Ca-Fe-P – кальций-железо-фосфатная недиагностированная фаза, Trd-Skn – тридимит-секанинитовый матрикс, Mag-Jak – агрегат магнетита-якобсита, Kfs – калиевый полевой шпат. Остальные обозначения см. Рис. 4.1.

Минералы группы кордиерита являются породообразующими в тридимит-секанинаитовой паралаве (обр. MN-1363, MN-1368) и входят в состав ксенолитов клинкера из кристобалит-фаялитовой паралавы (обр. MN-1370). Минералы этой группы представлены секанинаитом, который образует призматические выделения размером до 0.5 мкм (Рис. 4.5, б). Секанинаит имеет близкий состав при небольших вариациях индекса Mg# ($Mg\#, Mg/(Mg + Fe^{2+} + Mn)$), 0.15 – 0.24, Рис. 4.6). Состав минерала следующий (мас.%): SiO₂ 43.8 – 49.7, FeO 10.0 – 19.4, MgO 2.0 – 5.6, примеси TiO₂ < 0.2, CaO < 2.3, Na₂O < 0.4 мас.%, а также K₂O < 1 мас.% и MnO 0.5 – 3.2 (Табл. 4.5, ан. 5, 6; Приложение А4).

Таблица 4.5. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов групп оливина и кордиерита в железистых паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид

	1370		1363	1368	1363	1368	1370	
	1(9)	2(49)	3(20)	4(49)	5(25)	6(24)	7(28)	8(4)
SiO ₂	33.36	29.50	30.00	29.67	46.13	45.81	49.39	47.30
TiO ₂	-	-	0.06	-	0.02	0.03	0.22	0.11
Al ₂ O ₃	0.28	0.13	0.23	-	31.57	32.01	31.88	33.05
FeO	30.62	61.18	65.09	60.18	17.20	15.84	12.11	10.40
MnO	9.69	4.63	2.30	7.92	0.71	2.30	0.78	0.48
MgO	23.71	3.42	2.13	2.42	2.76	2.66	4.40	6.96
CaO	-	-	-	-	0.27		0.07	
Na ₂ O					0.04			
K ₂ O					0.40	0.53	0.89	0.70
P ₂ O ₅	1.66	0.97	-	-				
Сумма	99.33	99.82	99.81	100.19	99.11	99.19	99.74	99.00
	Формульные коэффициенты, ф. ед.							
Si	0.954	0.972	1.000	0.989	4.949	4.916	5.125	4.918
Ti			0.002		0.002	0.003	0.017	0.009
Al	0.010	0.005	0.009		3.992	4.047	3.899	4.050
Fe ²⁺	0.732	1.685	1.814	1.678	1.543	1.421	1.051	0.904
Mn	0.235	0.129	0.065	0.224	0.064	0.209	0.069	0.042
Mg	1.011	0.168	0.106	0.120	0.441	0.426	0.681	1.079
Ca					0.031		0.008	
Na					0.009			
K					0.055	0.072	0.118	0.093
P	0.040	0.027						
Сумма	2.981	2.986	2.994	3.011	11.085	11.094	10.967	11.095
Mg#	0.51	0.08	0.05	0.06	0.22	0.21	0.38	0.53
<i>Fo</i> , мол.%	51.08	8.47	5.34	5.93				
<i>Fa</i>	37.0	85.14	91.38	82.98				
<i>Trh</i>	11.92	6.39	3.28	11.09				

Формулы рассчитаны на 4 (ан. 1 – 4) и 18 (ан. 5 – 8) атомов кислорода. $Mg\# = Mg/(Mg + Fe + Mn)$.

1 – гортонолит; 2 – 4 – фаялит; 5, 6 – секанинаит; 7 – секанинаит/ферроиндиалит; 8 – кордиерит/индиалит.

Минералы: *Fo* – форстерит; *Fa* – фаялит; *Trh* – тефроит.

Ксенолиты клинкера в обр. MN-1370 сложены зёрнами минералов группы кордиерита, которые, по данным КР-спектроскопии представлены как ромбическим секанинаитом, так и гексагональным ферроиндиалитом с большими вариациями состава ($Mg\#$ 0.2 – 0.5). Центральные зоны некоторых зёрен соответствуют кордиериту или индиалиту (Рис. 4.6). Вариации состава минералов (мас.%): SiO_2 45.2 – 56.0, Al_2O_3 26.0 – 36.3, FeO 10.0 – 15.9, MnO 0.5 – 1.3, MgO 2.2 – 7.1, K_2O 0.5 – 2.0 (Табл. 4.5, ан. 7, 8, Приложение А4).

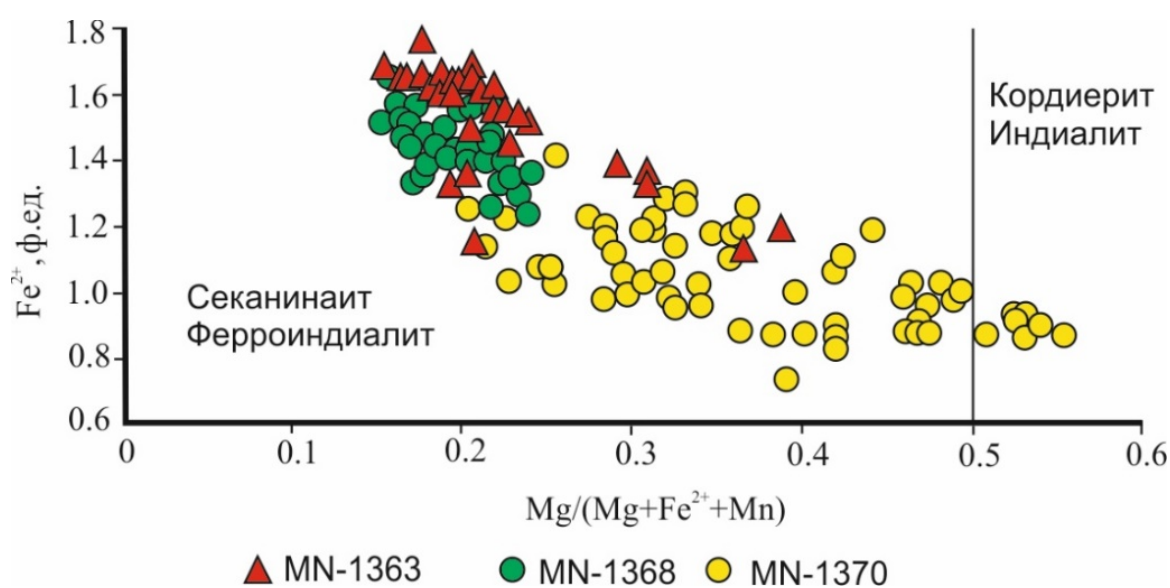


Рисунок 4.6. Диаграмма состава минералов группы кордиерита в железистых паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид

Минералы группы шпинели являются второстепенными минералами железистых паралав. В обр. MN-1370 кристобалит-фаялитовой паралавы преобладают изометричные зёрна магнетита и Al-магнетита, которые вместе с фаялитом образует структуру спинифекс матрикса (Рис. 4.5, а), реже встречаются микролиты Fe-пикотита. Для минералов характерны следующие вариации состава (мас.%): TiO_2 0 – 2.6, Al_2O_3 13.0 – 32.9, FeO 20.3 – 35.5, Fe_2O_3 28.9 – 56.4, MnO 1.0 – 5.6, MgO 0 – 2.0 (Рис. 4. 7, а, Табл. 4.6, ан. 2, 3, Приложение А6). В некоторых фрагментах матрикса паралавы в ассоциации с основным плагиоклазом, кристобалитом, а также гётитом и ярозитом встречаются изометричные выделения магнетита, имеющего состав (мас.%): TiO_2 0 – 2.2, Al_2O_3 0 – 5.1, FeO

24.0 – 31.0, Fe₂O₃ 59.4 – 67.2, MnO 0.6 – 3.5, MgO 0 – 3.0 (Табл. 4.6, ан. 1). Иногда в Al-магнетите встречаются включения герцинита с вариациями содержаний (мас.%): Al₂O₃ 56.8 – 69.1, FeO 18.9 – 26.6, MgO 0.3 – 13 (Рис. 4. 7, а).

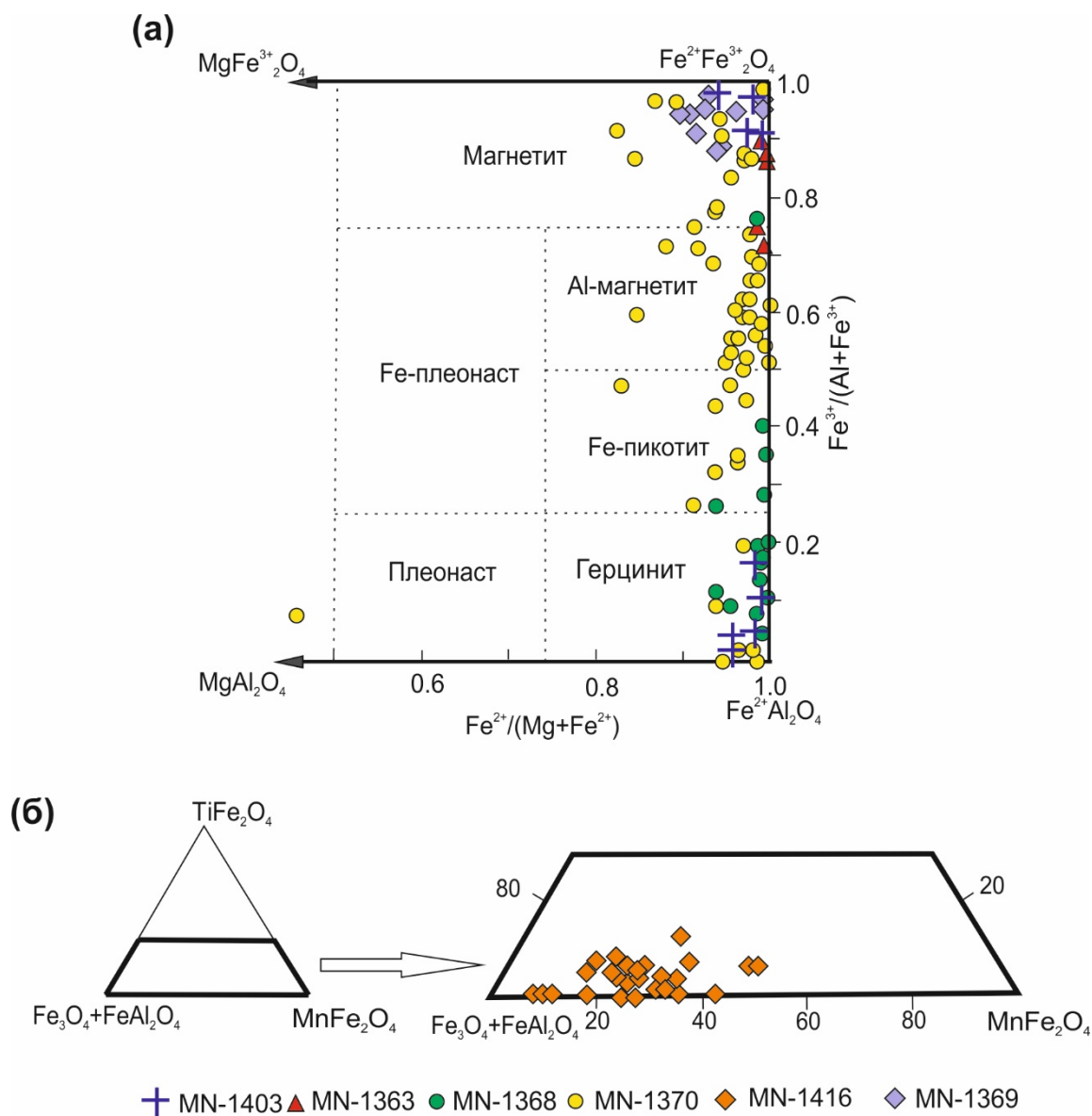


Рисунок 4.7. Вариации состава минералов группы шпинели в клинкере, железистых паралавах и железистых пирогенных породах комплекса Хамарин-Хурал-Хид. (а) фрагмент классификационной диаграммы $Fe^{2+}/(Fe^{2+}+Mg) - Fe^{3+}/(Fe^{3+}+Al)$; (б) фрагмент диаграммы $(Fe_3O_4 + FeAl_2O_4) - MnFe_2O_4 - TiFe_2O_4$ для магнетита-якобсита.

В тридимит-секанинаитовой паралаве минералы группы шпинели представлены в основном Ti-магнетитом с содержанием Ti до 0.7 ф. ед., реже – Al-магнетитом (Рис. 4.7, а). Ti-магнетит встречается в виде изометричных выделений размером до 30 мкм, которые совместно с зёрнами фаялита образуют структуру спинифекс. Состав Ti-магнетита варьирует значительно (мас.%): TiO₂

1.9 – 26.1, Al_2O_3 4.4 – 14.0, FeO 33.9 – 54.6, Fe_2O_3 13.6 – 41.8, MnO 0.6 – 4.6, отмечается редкая примесь Cr_2O_3 и V_2O_3 (< 0.8 мас.% в сумме) (Табл. 4.6, ан. 4 – 8, Приложение А6). В обр. MN-1368 фаялит содержит включения герцинита следующего состава (мас.%): TiO_2 0.7 – 2.5, Al_2O_3 28.9 – 49.0, FeO 35.0 – 39.7, Fe_2O_3 6.6 – 26.7, MnO 1.0 – 3.1 (Табл. 4.6, ан. 9, Рис. 4.7, а). Иногда в магнетите отмечаются ламелии ильменита, содержащего в сумме до 5 мас.% примесей Al_2O_3 , MgO и MnO (Табл. 4.6, ан. 10, 13).

Стекло заполняет интерстиции между фенокристаллами минералов железистых паралав. Согласно данным КР-спектроскопии стекло водосодержащее и с учётом невязок суммы СЭМ ЭДС анализов может содержать до 3 – 7 мас.% H_2O (Табл. 4.7, ан. 1, 2, Приложение А7). На TAS диаграмме точки состава стекла находятся в поле риолита (SiO_2 64.1 – 76.5 мас.%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 4.1 – 12.1 мас.%, Рис. 4.3, а). Для стекла характерно существенное преобладание K_2O (5.9 – 10.6 мас.%) над Na_2O (0 – 3.6 мас.%). В тридимит-секанинаитовой паралаве стекло, в основном, плюмазитовое, реже – метаглиноземистое и агпаитовое (A/CNK 0.9 – 1.2, A/NK 0.9 – 1.6), содержит примесь P_2O_5 до 1.2 мас.%. В кристобалит-фаялитовой паралаве стекло встречается редко и характеризуется метаглиноземисто-агпаитовым составом (A/CNK 0.8 – 1.0, A/NK 0.9 – 1.6, Рис. 4.3, б, Табл. 4.7, Приложение А7).

Плагиоклаз An_{60-80} образует удлинённые микролиты длиной до 50 – 70 мкм в тридимит-секанинаитовой паралаве (обр. MN-1363, MN-1370). Иногда основной плагиоклаз формирует симплектитоподобные срастания с тридимитом или кристобалитом. В частично раскристаллизованном ксенолите клинкера в паралаве (обр. MN-1368) встречаются микролиты более кислого плагиоклаза An_{39-52} . В кристобалит-фаялитовой паралаве лабрадор-битовнит содержит примесь P_2O_5 до 1.2 мас.% (Табл. 4.8, ан. 1 – 3).

Таблица 4.6. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы шпинели и Fe-Ti оксидов в железистых пирогенных породах комплекса Хамарин-Хурал-Хид

	1370			1363			1368				1416	1369	
	1 (9)	2 (43)	3 (23)	4 (13)	5 (9)	6 (10)	7 (15)	8 (4)	9 (19)	10 (3)	11 (37)	12 (27)	13 (4)
SiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.72	-	-
TiO ₂	0.64	1.54	1.64	15.31	6.10	20.80	23.06	8.95	1.64	45.51	3.41	1.70	36.05
Al ₂ O ₃	2.55	17.89	26.02	7.42	11.68	6.65	6.35	6.85	42.97	1.52	1.59	1.84	2.07
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.11	0.25	0.15	-	0.28	-	-	-	-
FeO	28.05	33.19	34.37	45.88	37.94	50.46	49.94	39.48	37.52	48.70	23.64	30.14	53.01
Fe ₂ O ₃	64.44	45.07	34.99	30.57	43.25	20.00	17.25	42.16	14.26	-	56.51	62.80	1.68
MnO	2.16	1.67	1.22	0.78	0.79	0.87	2.94	1.13	2.27	1.71	9.98	1.47	1.41
MgO	0.97	0.44	0.80	-	-	-	-	-	0.05	-	0.13	0.42	1.41
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.24	0.35	-	-
V ₂ O ₃	-	-	-	0.32	0.18	0.52	0.97	1.57	0.55	-	-	-	-
Сумма	98.80	99.79	99.04	100.27	100.05	99.56	100.66	100.13	99.54	97.68	96.33	98.37	95.63
Формульные коэффициенты, ф. ед.													
Si	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-
Ti	0.018	0.040	0.041	0.418	0.165	0.571	0.625	0.247	0.038	0.904	0.101	0.049	0.757
Al	0.115	0.736	1.032	0.318	0.494	0.287	0.270	0.296	1.572	0.047	0.074	0.084	0.068
Cr	-	-	-	-	0.003	0.007	0.004	-	0.007	-	-	-	-
Fe ²⁺	0.894	0.968	0.967	1.394	1.140	1.542	1.505	1.212	0.974	1.076	0.776	0.971	1.238
Fe ³⁺	1.848	1.183	0.886	0.836	1.169	0.550	0.468	1.164	0.333	-	1.668	1.822	0.035
Mn	0.070	0.049	0.035	0.024	0.024	0.027	0.090	0.035	0.060	0.038	0.332	0.048	0.033
Mg	0.055	0.023	0.040	-	-	-	-	-	0.002	-	0.007	0.024	0.059
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.007	0.015	-	-
V	-	-	-	0.009	0.005	0.015	0.028	0.046	0.014	-	-	-	-
O	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4	3
Сумма	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	2.999	2.990	3.000	2.999	2.072	3.003	2.998	2.191

1, 12 – магнетит; 2 – Al-магнетит, 3 – Fe пикотит, 4-8 – Ti-магнетит; 9 – герцинит; 10, 13 – ильменит, 11 – магнетит-якобсит.

Ортопироксен является второстепенным минералом тридимит-секанинаитовой паралавы, а также встречается в некоторых фрагментах кристобалит-фаялитовой паралавы. По КР–спектрам ортопироксен в обр. MN-1363 и MN-1368 диагностирован как ферросилит. Состав минерала следующий (мас.%): SiO_2 41.4 – 44.8, TiO_2 0 – 1.0, Al_2O_3 2.8 – 7.8, FeO 37.6 – 46.3, Fe_2O_3 0 – 4.6, MnO 1.4 – 7.9, MgO 0.5 – 2.9, CaO 0.5 – 0.9 (Табл. 4.8, ан. 4, 5). В формуле ферросилита до 0.4 ф. ед. Al и до 0.3 ф. ед. Mn. В обр. MN-1370 ортопироксен имеет промежуточный энстатит-ферросилитовый состав ($\text{Mg}\#$ 0.3 – 0.4) и содержит (мас.%): SiO_2 44.3 – 45.3, Al_2O_3 4.0 – 5.4, FeO 35.5 – 36.7, Fe_2O_3 2.5 – 4.7, MnO 3.0 – 4.3, MgO 7.5 – 8.6, CaO 0.3 – 0.7 (Табл. 4.8, ан. 6).

Матрикс *железистой пирогенной породы* в обр. MN-1416 сложен тонкодисперсным гематитом, а в обр. MN-1369 – агрегатом магнетита-якобсита MnFe_2O_4 , содержащего до 17 мас.% MnO (Рис. 4.7, б). Минерал встречается в виде изометричных выделений размером до 50 мкм, а также образует кайму вокруг реликтовых зёрен полевых шпатов (Рис. 4.5, в). Наиболее обогащенные Mn составы встречаются в агрегатах со структурой распада на Ti-магнетит и магнетит-якобсит. Состав магнетита-якобсита варьирует в широком диапазоне (мас.%): TiO_2 0.2 – 6.2, Al_2O_3 0.6 – 3.0, FeO 16.8 – 28.0, Fe_2O_3 49.6 – 62.1, MnO 4.0 – 17.4. Характерна примесь MgO и CaO (< 1.0 мас.%) и SiO (< 1.7 мас.%) (Табл. 4.6, ан. 11, Приложение А6).

Таблица 4.7. Средние составы (мас.%) стекла в железистых паралавах

Образец		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	A/CNK	A/NK	Сумма
1363 (N=50)	Среднее	71.57	0.33	12.43	1.64	–	0.50	1.23	7.73	0.31	–	1.10	1.20	95.74
	S	2.39	0.29	1.16	0.57	–	0.39	0.95	0.97	0.42	–			
	min	66.32	0	10.32	0.42	–	0	0	5.71	0.00	–			
	max	79.61	1.08	17.82	3.51	–	2.38	4.61	9.94	1.40	–			
1368 (N=54)	Среднее	71.85	0.33	13.05	1.54	0.11	0.64	1.87	7.82	0.33	–	1.03	1.13	97.54
	S	1.89	0.36	0.97	1.10	0.23	0.53	0.51	1.60	0.45	–			
	min	67.82	0	11.60	0	0	0	1.00	0.39	0	–			
	max	76.48	1.97	15.74	8.43	1.46	3.33	3.67	10.59	1.35	–			
1370 (N=6)	Среднее	71.85		13.71	1.97	–	1.33	1.06	9.30	0.41	0.55	0.96	1.16	100.16
	S	2.38		1.92	0.56	–	1.69	0.76	1.17	0.68	0.77			
	min	67.69	0	11.81	1.29	–	0.27	0.39	8.40	0	0			
	max	74.92	0	13.76	2.19	–	5.65	2.00	10.52	4.47	1.86			

N – число анализов; S – стандартное отклонение; min – минимальное содержание; max – максимальное содержание.

Мольные отношения: $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$, $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$.

Таблица 4.8. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты плагиоклаза и ортопироксена в железистых паралавах

	1363	1368	1370	1363	1368	1370
	1(5)	2(14)	3(15)	4(10)	5(13)	6(8)
SiO ₂	50.90	57.67	52.24	44.10	43.14	45.01
TiO ₂				0.48	0.52	0.04
Al ₂ O ₃	30.00	25.84	28.64	3.22	5.14	4.41
FeO	1.78	0.75	1.69	45.86	39.69	35.87
Fe ₂ O ₃				1.74	1.76	3.19
MnO				1.65	7.59	3.35
MgO				2.60	1.96	7.89
CaO	13.11	9.64	12.81	0.73	0.49	0.42
Na ₂ O	2.78	4.01	2.28			
K ₂ O	0.56	1.04	1.41			
P ₂ O ₅			0.31			
Сумма	99.13	98.96	99.39	100.38	100.28	100.17
	Формульные коэффициенты, ф. ед.					
Si	2.348	2.614	2.401	1.877	1.833	1.843
Ti				0.015	0.017	0.001
Al	1.631	1.380	1.552	0.162	0.257	0.213
Fe ²⁺	0.069	0.028	0.065	1.632	1.411	1.228
Fe ³⁺				0.056	0.056	0.098
Mn				0.059	0.273	0.116
Mg				0.165	0.124	0.482
Ca	0.648	0.468	0.631	0.033	0.022	0.018
Na	0.248	0.353	0.203			
K	0.033	0.060	0.083			
P			0.012			
Сумма	4.977	4.903	4.948	3.999	3.993	4.000
O	8	8	8	6	6	6
Mg#				8.63	6.65	25.03
<i>An</i> , мол.%	69.71	53.12	68.79			
<i>Or</i>	3.57	6.86	9.05			
<i>Ab</i>	26.72	40.03	22.16			

1, 3 – лабрадор-битовнит; 2 – андезин-лабрадор; 4, 5 – ферросилит; 6 – энстатит-ферросилит.

Миналы: *An* – анортит; *Ab* – альбит; *Or* – ортоклаз.

4.4. Мелилит-нефелиновая и плагиоклаз-пироксен ± индиалитовая паралавы

Плагиоклаз в таких паралавах образует игольчатые микролиты и более редкие фенокристы размером до 0.5 мм (Рис. 4.8, а). Редкие включения плагиоклаза встречаются также в зернах Al-клинопироксена и мелилита. Для

мелилит-нефелиновых паралав *Хамарин-Хурал-Хида* характерен лабрадор-битовнит, содержащий примеси (мас.%): $< 1.8 \text{ K}_2\text{O}$, $< 3 \text{ FeO}$, $< 2.8 \text{ BaO}$ и $< 3.4 \text{ SrO}$ (Табл. 4.9, ан. 1, Приложение А8). Фенокристы плагиоклаза имеют зональное строение: центральная часть сложена битовнитом-анортитом, An_{70-100} , а краевая – андезином-лабрадором, An_{48-70} (Табл. 4.9, ан. 2, 3, Рис. 4.9). В плагиоклаз-пироксеновой паралаве (обр. MN-1406) плагиоклаз характеризуется большими вариациями состава, An_{40-95} (Табл. 4.9, ан. 4, 5, Приложение А8).

В паралавах этих типов часто встречаются К-Ва полевые шпаты – цельзиан и гиалофан в виде выделений неправильной формы размером до 100 мкм. Цельзиан имеет следующий состав (мас.%): SiO_2 32.6 – 37.4, Al_2O_3 20.8 – 26.8, CaO 0.3 – 2.5, K_2O 0 – 2.0, Na_2O 0 – 2.5, BaO 24.0 – 38.7, SrO 0 – 4.0 (Табл. 4.9, ан. 6, Приложение А8). Гиалофан обнаружен только в двух образцах мелилит-нефелиновой паралавы и содержит (мас.%): SiO_2 44.7 – 51.7, Al_2O_3 19.7 – 22.5, CaO 7 – 7.5, K_2O 1.5 – 2.6, Na_2O 2.3 – 4.5, BaO 15.2 – 19.2, SrO 1.6 – 2.4 (Табл. 4.9, ан. 7) [Глушкова, 2023б].

Плагиоклаз в мелилит-нефелиновых паралавах *Нилгинского комплекса* представлен преимущественно анортитом-битовнитом An_{98-73} с примесью Na_2O и FeO до 2.5 мас.% (Табл. 4.9, ан. 8, Приложение А8, Рис. 4.9). Количество минала *Or*, как правило, не превышает 5 мол.%. Некоторые фенокристы содержат в сумме до 6 мас.% BaO и SrO . Зональность в пределах зерен не обнаружена. Плагиоклаз-пироксеновые прожилки в клинкере на останцах сложены андезином, An_{30-43} , а плагиоклаз-пироксен ± индиалитовая паралава вблизи карьера Тугруг – анортитом-лабрадором, An_{73-100} (Табл. 4.9, ан. 9, 10). В некоторых образцах паралав с останца Верблюд и вблизи него во включениях из ксенолитов пелитовых пород встречается калиевый полевой шпат, содержащий до 96 мол.% минала *Or* и до 1.3 мас.% Na_2O (Табл. 4.9, ан. 11). Цельзиан и гиалофан, как правило, образуют кайму на фенокристах плагиоклаза (Рис. 4.15, в). В паралаве на останце Верблюд встречаются скопления игольчатых микролитов или отдельные зёрна цельзиана размером до 100 мкм, содержащие до 41.5 мас.% BaO (Табл. 4.9, ан. 12, Приложение А8).

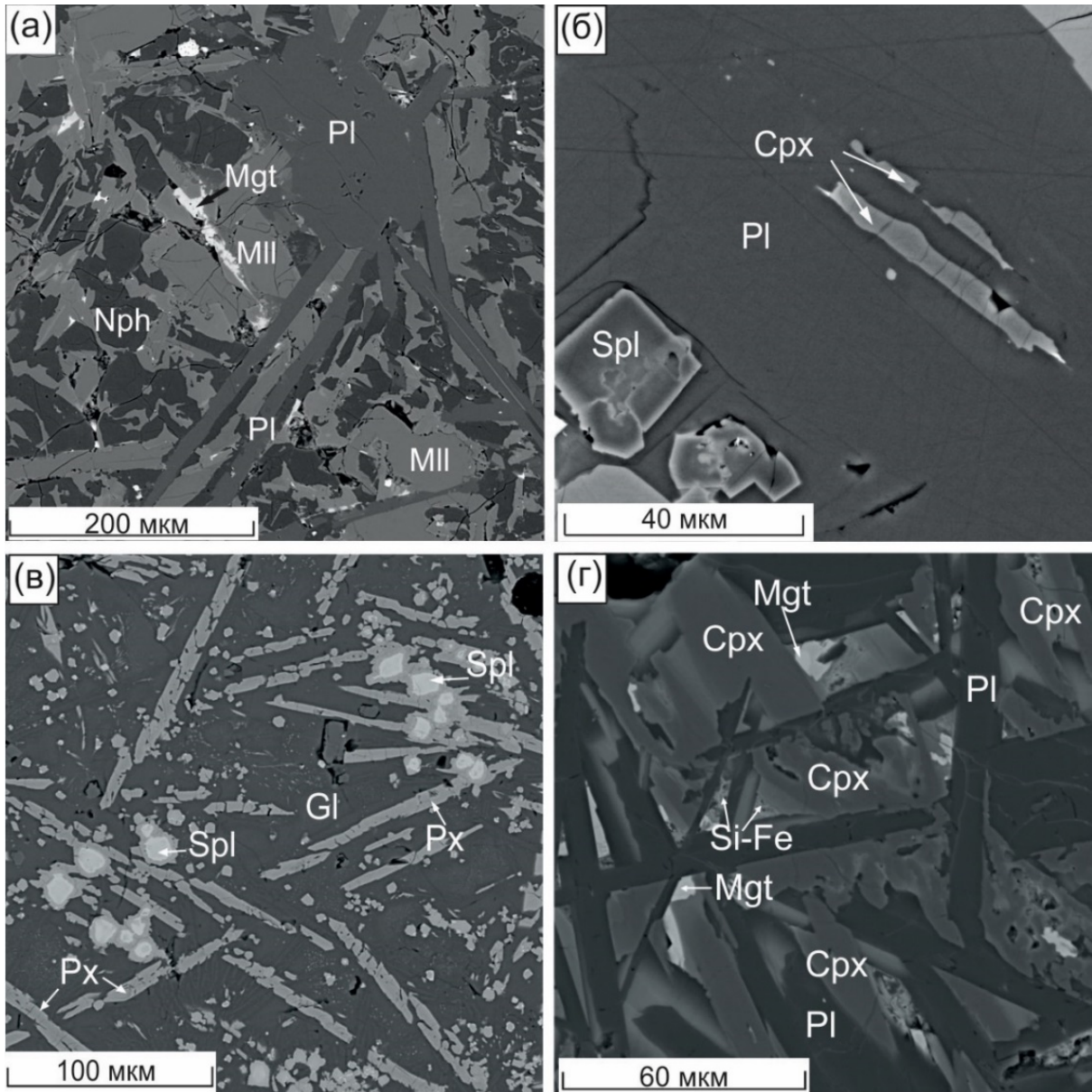


Рисунок 4.8. Фрагменты матрикса паралава.

(а) Фенокристы плагиоклаза в ассоциации с меллитом, Са-нефелином (давидсмититом) и Al-магнетитом, обр. MN-1412 (Хамарин-Хурал-Хид). (б) Микролиты Al-клинопироксена в плагиоклазе, обр. MN-1127 (Нилгинский комплекс). (в) Фенокристы Mn-содержащего ортопироксена в стекле прожилка паралавы в клинкере, обр. MN-1136 (Нилгинский комплекс). (г) Фенокристы Al-клинопироксена и плагиоклаза, интерстиции между которыми заполнены силикатно-железистой фазой и магнетитом, обр. MN-1310 (вблизи карьера Тугруг, Нилгинский комплекс). Изображения в BSE. Cpx – Al-клинопироксен, Px – пироксен энстатит-ферросилитового ряда с высоким содержанием Mn, Gl – стекло, Nph – нефелин, Mgt – магнетит, Spl – минералы группы шпинели, Pl – плагиоклаз, Si-Fe – силикатно-железистая фаза.

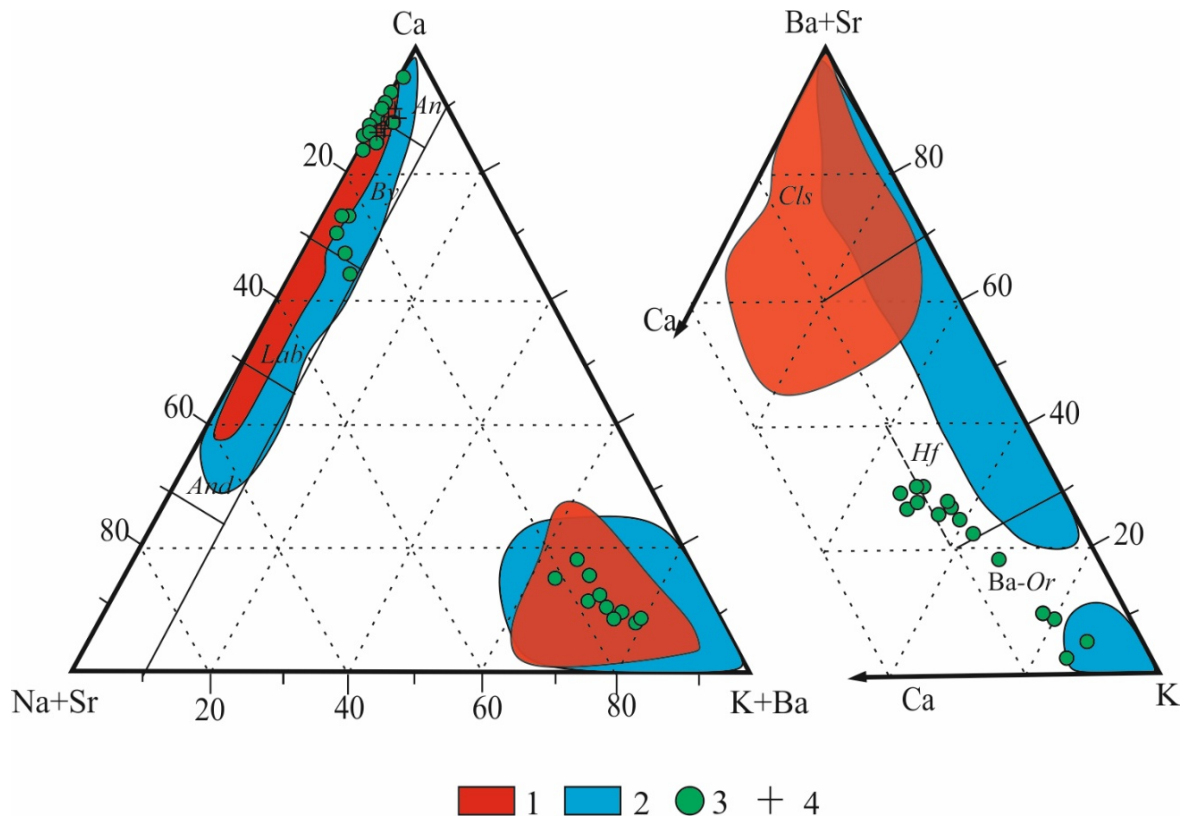


Рисунок 4.9. Ca – (K + Ba) – (Na + Sr) и (Ba + Sr) – K – Ca диаграммы для плагиоклаза и К-Ва полевых шпатов.

1 – паралавы Хамарин-Хурал-Хида; 2 – паралавы Нилгинского комплекса; 3 и 4 – плагиоклаз-пироксеновая паралава (обр. MN-1310) и плагиоклаз-пироксен-индиалитовая паралава (обр. MN-1275, MN-1276, MN-1277) вблизи карьера Тугруг, соответственно.

An – анортит, *By* – битовнит, *Lab* – лабрадор, *And* – андезин, *Cls* – цельзиан, *Hf* – гиалофан, *Ba-Or* – Ва-ортоклаз.

Таблица 4.9. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты полевых шпатов

	Комплекс Хамарин-Хурал-Хид							Нилгинский комплекс				
	1420	1410		1406		1419	1420	1193	1136	1275	1172	1133
	1 (8)	2 (4)	3 (2)	4 (14)	5 (6)	6(9)	7(7)	8(14)	9 (5)	10 (17)	11(3)	12(7)
SiO ₂	46.52	48.91	52.68	48.27	54.87	34.79	46.52	43.35	62.93	47.32	63.33	33.07
Al ₂ O ₃	32.01	31.06	27.68	31.4	26.73	24.94	22.90	34.72	22.19	34.32	17.88	25.43
Fe ₂ O ₃	0.23	0.14	0.19	0.37	0.4	1.08	0.54	0.46	0.6	0.87		0.28
CaO	17.25	15.75	12.95	16.26	10.54	2.39	4.03	19.22	5.98	17.02	0.13	0.58
Na ₂ O	1.91	2.85	4.27	2.46	5.18	0.78	3.25	0.43	5.93	1.02	0.54	-
K ₂ O	-	-	0.17	-	0.24	0.39	2.10	0.02	1.38	0.15	16.73	0.64
BaO	-	-	-	-	-	34.74	19.26	0.48	-	-	-	39.61
SrO	1.19	-	-	-	-	2.07	2.14	0.50	-	-	-	0.56
Сумма	99.11	98.71	97.94	98.76	97.96	101.19	100.74	99.17	99.01	100.7	98.62	100.16
	Формульные коэффициенты, ф. ед.											
Si	2.189	2.268	2.441	2.242	2.524	2.088	2.453	2.039	2.816	2.156	2.987	2.062
Al	1.775	1.698	1.512	1.719	1.449	1.765	1.423	1.925	1.170	1.843	0.994	1.869
Fe ³⁺	0.008	0.005	0.007	0.013	0.014	0.049	0.021	0.016	0.020	0.030		0.013
Ca	0.870	0.783	0.643	0.809	0.520	0.154	0.228	0.969	0.287	0.831	0.007	0.039
Na	0.173	0.256	0.384	0.222	0.462	0.091	0.332	0.039	0.514	0.090	0.049	
K			0.010		0.014	0.030	0.142	0.001	0.079	0.009	1.007	0.051
Ba						0.817	0.398	0.009				0.968
Sr	0.033					0.072	0.065	0.014				0.020
Сумма	6.130	6.053	6.040	6.046	5.992	6.279	6.248	6.058	5.786	5.917	6.107	6.113
<i>An</i> , мол. %	83.41	75.33	62.02	78.51	52.18	15.37	29.70	96.03	32.58	89.37	0.66	3.67
<i>Ab</i>	16.59	24.67	37.01	21.49	46.40	-	-	3.86	58.46	9.69	4.61	-
<i>Or</i>	0	0	0.97	0	1.42	2.99	18.45	0.11	8.96	0.94	94.73	4.82
<i>Cls</i>	-	-	-	-	-	81.65	51.86	-	-	-	-	91.51

Формулы рассчитаны на 8 атомов кислорода.

Миналы: *An* – анортит, *Ab* – альбит, *Or* – калиевый полевой шпат, минал ортоклаза, *Cls* – цельзиан.

Минералы группы пироксена встречаются в виде идиоморфных фенокристов и микролитов размером до 0.5 мм, реже – в удлинённых дендритовых кристаллах и зернах разной морфологии (Рис. 4.8, б, в, г). Для фенокристов Al-клинопироксена из мелилит-нефелиновых паралав характерно зональное строение: от центра к краю снижается содержание Al, Mg и возрастает Fe. Центральные зоны обогащены Mg ($Mg\#, Mg/(Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+}) 0.5 - 0.8$) и Al_{VI} до 0.25 ф. ед., что приводит к смещению точек состава минерала на классификационной диаграмме *Wo – En – Fs* выше полей диопсида и геденбергита (Рис. 4.10, а). Поэтому, для дальнейшего описания состава клинопироксена рассчитывалось количество минала кушироита, $Ks Ca_2AlAlSiO_6$ и учитывалось положение точек состава минерала на диаграмме $(Si + Ti)^{4+} - Al^{3+}$ (Рис. 4.10, в).

Клинопироксен в мелилит-нефелиновых паралавах *Хамарин-Хурал-Хида* соответствует обогащённому Al диопсиду-геденбергиту с примесью минала кушироита до 42 мол.%. Минерал имеет следующие вариации миналов (мол.%): *Wo* 22 – 45, *En* 3 – 38, *Fs* 3 – 33, *Ks* 9 – 42 (Рис. 4.10, а). В клинопироксене содержание TiO_2 обычно < 6 мас.%. Только в одном образце паралавы (MN-1420) количество TiO_2 достигает 12 мас.% (Табл. 4.10, ан. 1). Концентрация Na_2O в клинопироксене из всех разновидностей паралав < 2.8 мас.%. В обр. MN-1367 встречаются единичные зёрна авгита $CaNa(R^{2+}Al)(SiAl)_2O_6$ и пижонита $CaR^{2+}Si_2O_6$, где $R = Mg^{2+} + Fe^{2+}$ (Табл. 4.10, ан. 2). В краевой зоне фенокристов 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 Al_2O_3 (Табл. 4.10, ан. 3, 4, Приложение А9). При этом точки состава находятся преимущественно в поле геденбергита (Рис. 4.10, а), а на диаграмме $(Si + Ti)^{4+} - Al^{3+}$ располагаются в области $(Si + Ti)^{4+} > 1.7$ ф. ед. (Рис. 4.10, в).

В энстатите-ферросилите, *En* 42-61 из плагиоклаз-пироксеновой паралавы (обр. MN-1406) количество миналов *Wo* и *Ks* не превышает 8 мол.% (Табл. 4.10, ан. 5, Рис. 4.10, Приложение А9).

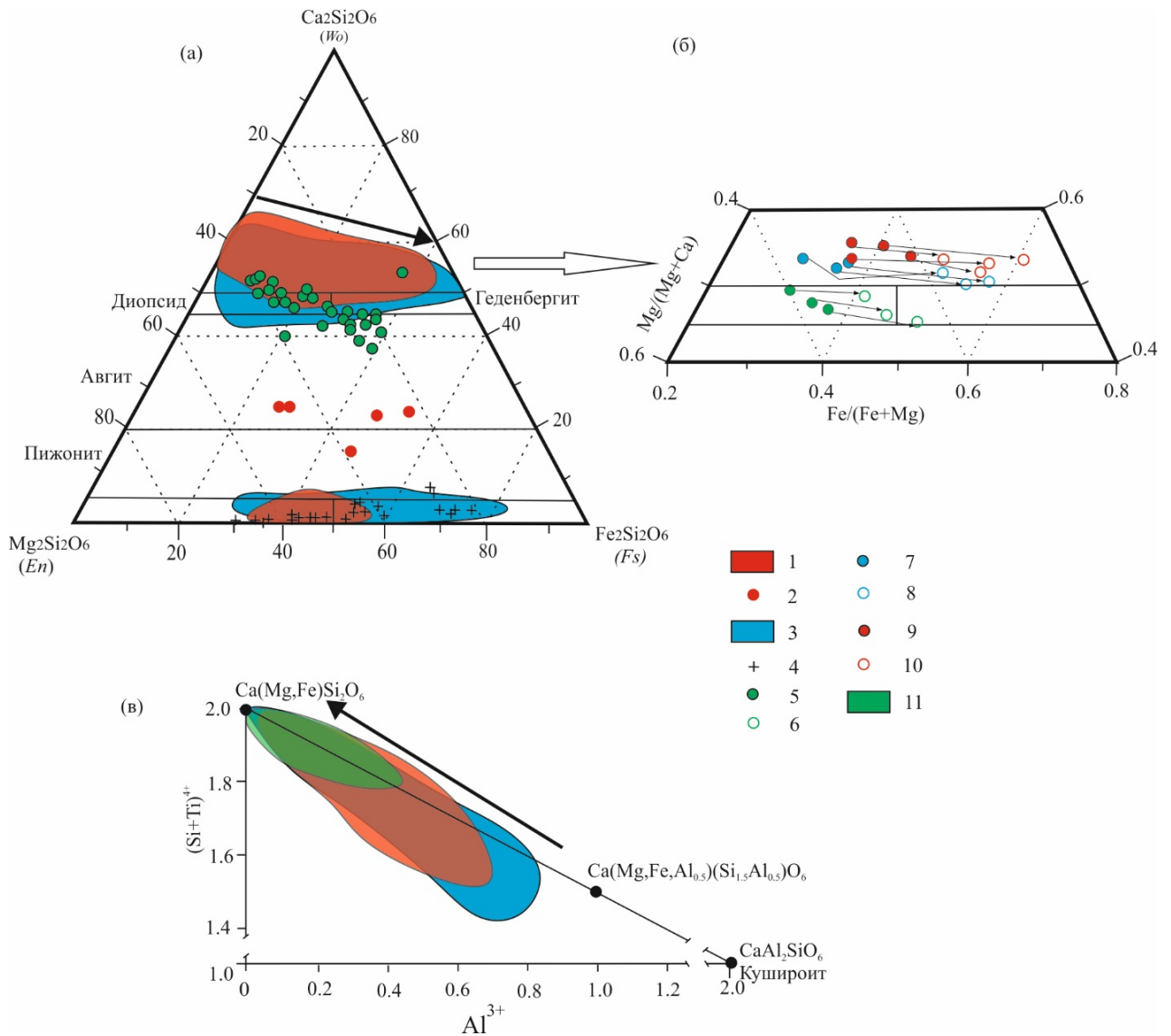


Рисунок 4.10. Составы минералов группы пироксена (а) и эволюция состава клинопироксена (б, в).

(а) Классификационная диаграмма $Wo - En - Fs$. (б) Вариации состава зональных фенокристов Al-клинопироксена. (в) Эволюция состава Al-клинопироксена на диаграмме $(Si + Ti)^{4+} - Al^{3+}$.

Мелилит-нефелиновые паралавы: 1, 2, 9, 10 – Хамарин-Хурал-Хид; 3, 7, 8 – Нилгинский комплекс. 4, 5, 6 и 11 – плагиоклаз-пироксен-индиалитовая и плагиоклаз-пироксеновая паралавы вблизи карьера Тугруг;

Стрелками на диаграммах показано изменение состава от центральной к краевой зонам фенокристов.

Клинопироксен в мелилит-нефелиновых паралавах *Нилгинского комплекса* соответствует обогащённому Al диопсиду-геденбергиту при следующих вариациях минералов (мол.%): Wo 23 – 41, En 0 – 49, Fs 0 – 55, Ks 4 – 49 (Рис. 4.10, а). Содержание TiO_2 редко превышает 2 – 3 мас.%.

Таблица 4.10. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы пироксена

	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	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
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, ф. ед.												
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
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
Al _{VI}	0.02	0.02	0.09	0.02		0.19	0.17	0.01	0.06	0.07	0.02	0.14
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
Fe ²⁺		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	
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
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
K												0.014
Cr												0.004
V												0.007
Сумма	5.80	6.02	5.86	5.84	5.95	6.00	6.00	5.98	6.00	6.00	6.00	5.96
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
Wo, мол.%	35.08	19.34	34.81	38.47	0	32.24	32.97	0.57	0.22	39.11	37.66	0
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

Формулы рассчитаны на 6 атомов кислорода.

Mg#, Mg/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺). 1 – обогащённый титаном диопсид; 2 – авгит; 3, 4, 6, 7, 10, 11 – зональные зёрна с ядром диопсида и краевой зоной геденбергита; 5, 8, 9, 12 – энстатит-ферросилит. Миналы: Wo – волластонит; En – энстатит; Fs – ферросилит; Ks – кушироит Ca₂AlAlSiO₆

Для фенокристов характерно зональное строение: центральные части обогащены Mg (Mg# 0.7 – 0.75) и содержат Al₂O₃ до 15 – 17 мас.%, а краевые – более железистые (Mg# 0.19 – 0.5) и менее глиноземистые (7 – 13 мас.% Al₂O₃) (Табл. 4.10, ан. 6, 7, Приложение А10). Точки состава фенокристов на диаграмме Wo –

En – Fs так же, как и для комплекса Хамарин-Хурал-Хид, образуют тренд от Al-диопсида с высоким содержанием минала *Ks* до геденбергита (Рис. 4.10, а).

Пироксен из плагиоклаз-пироксеновых прожилков в клинкере на останцах Корона и Верблюды (обр. MN-1129 и MN-1177) характеризуется большими вариациями состава. В прожилках находятся зональные фенокристы обогащенного Al диоспида-геденбергита, а вблизи обособлений кислого силикатного стекла с реликтами оплавленных зерен кварца и микролитов новообразованного индиалита встречаются тонкоигольчатые кристаллы энстатита-ферросилита, содержащего до 3.2 мас.% CaO (Табл. 4.10, ан. 8, Приложение А10). Энстатит-ферросилит в паралаве из обр. MN-1136 и MN-1137 характеризуются повышенной концентрацией MnO (4.5 – 24 мас.%, Табл. 4.10, ан. 9, Рис. 4.8, в, Приложение А10). Пироксены из паралав Нилгинского комплекса содержат 1.4 – 2 ф. ед. $(\text{Si} + \text{Ti})^{4+}$ и 0.8 – 0.03 ф. ед. Al (Рис. 4.10, в).

В плагиоклаз-пироксеновой паралаве (обр. MN-1310) Al-клинопироксен образует зёрна неправильной формы размером до 100 мкм (Рис. 4.8, г). Минерал представлен Al-содержащим диопсидом-геденбергитом со следующими вариациями миналов (мол.%): 31 – 43 *Wo*, 8.5 – 38 *En*, 7 – 49 *Fs*, 3.5 – 20 *Ks*. Хорошо проявлена зональность от центра к краю зёрен: содержание FeO увеличивается от 5 – 11 до 22 мас.% при уменьшении Al₂O₃ и MgO (Табл. 4.10, ан. 10, 11, Рис. 4.10, б, Приложение А10). Энстатит-ферросилит в плагиоклаз-пироксен-индиалитовой паралаве (обр. MN-1275, MN-1276 и MN-1277) образует тонкоигольчатые кристаллы следующего состава (мол.%): < 1 *Wo*, 13 – 55 *En*, 24 – 71 *Fs*, 9 – 19 *Ks* (Рис. 4.10, а). Минерал содержит примеси (мас.%): K₂O < 1.1, Cr₂O₃ < 0.3, V₂O₃ < 0.4, P₂O₅ < 0.8, SO₃ < 0.7 (Табл. 4.10, ан. 12), а на диаграмме $(\text{Si} + \text{Ti})^{4+} - \text{Al}^{3+}$ точки его состава при сумме $(\text{Si} + \text{Ti})^{4+} > 1.8$ ф. ед. находятся вблизи минала $\text{CaR}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$, где $\text{R} = \text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}$ (Рис. 4.10, в).

Минералы группы мелилита образуют фенокристы размером до 0.5 мм (Рис. 4.11, а). Мелилит из паралав комплекса Хамарин-Хурал-Хид характеризуется значительными вариациями состава (мас.%): SiO₂ 21 – 44, CaO 22 – 43, Na₂O < 5.7, TiO₂ < 1.8, MnO < 1.2.

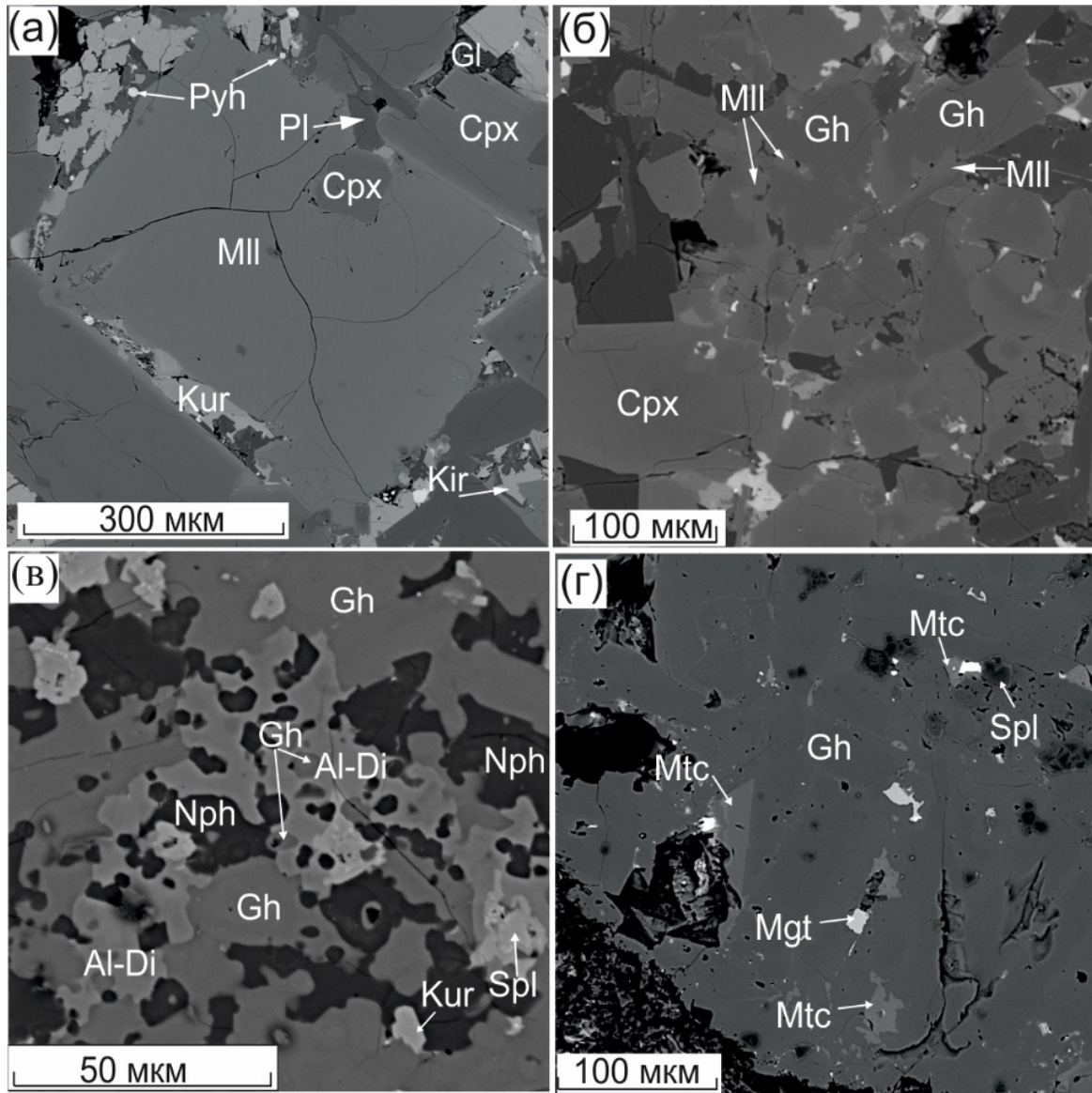


Рисунок 4.11. Фрагменты матрикса мелилит-нефелиновых паралав с реликтами ксенолитов мергелистого известняка.

(а) Фенокристы мелилита, Al-клинопироксена и основного 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 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). Изображения в BSE.

Al-Di – Al-диопсид, Gh – геленит, Gl – стекло, Mll – железистый акерманит-алюмоакерманит, Kir – кирштейнит, Mtc – монтичеллит-кирштейнит, Kur – куратит, Pyh – пирротин. Остальные обозначения см. на Рис. 4.5, 4.8.

В программном комплексе CRYSTAL [Перетяжко, 1996] масс-балансовым методом с минимальными невязками по формульным коэффициентам были

рассчитаны составы мелилита на пять миналов: *Ak*, акерманит $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$; *A\ddot{a}k*, алюмоакерманит $\text{CaNaAlSi}_2\text{O}_7$; *Gh*, геленит $\text{Ca}_2\text{AlAlSiO}_7$; *Fe2-Ak*, $\text{Ca}_2\text{Fe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_7$ и *Fe3-Ak*, $\text{CaNaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_7$ (Табл. 4.11). Диапазон концентраций миналов в мелилите следующий (мол.%): 4 – 92 *Gh*, 13 – 58 *Ak*, 0 – 54 *A\ddot{a}k*, 0 – 34 *Fe2-Ak*, 0 – 21 *Fe3-Ak* (Рис. 4.12). Преобладают миналы акерманита, алюмоакерманита и геленита, сумма которых в большинстве анализов > 90 мол.% (Табл. 4.11, ан. 1) при значении $\text{Mg}\#$ 0.3 – 1.0 (в среднем, 0.7 – 0.8).

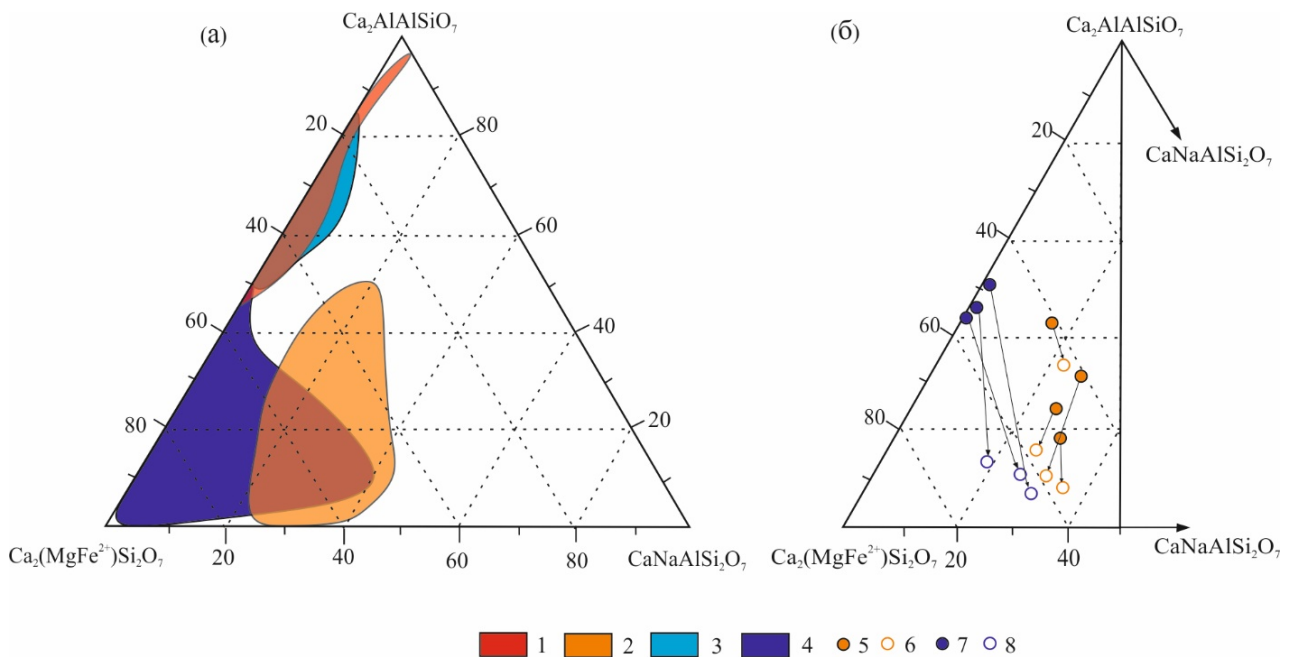


Рисунок 4.12. Вариации состава минералов группы мелилита.

(а) Мелилит из паралав и реликтов ксенолитов осадочных карбонатно-силикатных пород.

(б) Вариации состава зональных фенокритов.

1 и 2 – Хамарин-Хурал-Хид; 3 и 4 – Нилгинский комплекс; 5 и 6 – Хамарин-Хурал-Хид; 7 и 8 – Нилгинский комплекс. Стрелками на диаграмме (б) показано изменение состава от центральной к краевой зонам фенокритов.

В образцах паралав Хамарин-Хурал-Хида (MN-1367, MN-1411, MN-1419 и MN-1425) фенокриты мелилита от центра к краю становятся более железистыми, менее глиноземистыми (Рис. 4.11, б, 4.12, б) и содержат (мол.%): в центральной зоне 19 – 40 *Gh* и 4 – 9 *Fe2-Ak*, а в краевой – 9 – 15 *Gh* и 17 – 29 *Fe2-Ak* (Табл. 4.11, ан. 2, 3, Приложение А11). В образцах мелилит-нефелиновой паралавы MN-1410, MN-1411, MN-1420 и MN-1425 наряду с породообразующим железистым акерманитом-алюмоакерманитом, в реликтах ксенолитов мергелистого известняка находятся геленит (43 – 92 мол.% *Gh*, Табл. 4.11, ан. 4, Приложение А11),

монтichelлит-кирштейнит, перовскит, Al-шпинель и Al-диопсид, содержащий до 42 мол.% Ks (Рис. 4.11, в).

Таблица 4.11. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы мелилита

	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, ф. ед.									
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
Al _{VI}	0.39	0.51	0.41	0.75	0.23	0.11	0.33	0.32	0.52
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
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
Ba						0.02			
Sr						0.03			
Сумма	4.99	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	4.99	4.99	5.01
Mg#	0.83	0.78	0.52	0.61	0.84	0.88	0.73	0.52	0.77
<i>Ak</i> , мол.%	49.20	37.37	30.41	14.63	64.09	76.89	48.93	35.65	36.13
<i>Aak</i>	30.73	24.78	29.49	0	8.72	5.46	17.00	23.06	0
<i>Gh</i>	7.75	25.81	11.16	71.70	13.76	6.37	16.17	9.21	56.29
<i>Fe2-Ak</i>	9.44	6.62	21.09	6.78	12.21	5.54	16.53	31.50	3.21
<i>Fe3-Ak</i>	2.89	5.42	7.85	6.89	1.22	5.74	1.30	0.58	4.36

Формулы рассчитаны на 7 атомов кислорода.

Mg#, Mg/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺).

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

Минералы: *Ak* – акерманит Ca₂MgSiO₇; *Aak* – алюмоакерманит CaNaAlSi₂O₇; *Gh* – геленит, Ca₂AlAlSiO₇; *Fe2-Ak* = Ca₂Fe²⁺Si₂O₇; *Fe3-Ak* = CaNaFe³⁺Si₂O₇.

Мелилит *Нилгинских паралав* имеет следующие вариации состава (мол.%): 0 – 80 *Gh*, 10 – 83 *Ak*, 0 – 45 *Aak*, 0 – 44 *Fe2-Ak*, 0 – 23 *Fe3-Ak* (Табл. 4.11, ан. 5, Рис. 4.12). Преобладают магнезиальные разности ($Mg\#$ 0.7 – 0.8). В качестве примесей иногда отмечаются до 3.1 мас.% MnO и до 1.4 мас.% K_2O . В обр. MN-1133 встречаются фенокристы мелилита, содержащие до 1.4 мас.% BaO и до 1.4 мас.% SrO (Табл. 4.11, ан. 6).

Зональные фенокристы, в которых от центра к краю повышается Fe и снижается Al , встречаются во всех паралавах Нилгинского комплекса (Рис. 4.11, б). Такой мелилит содержит (мол.%): 4 – 20 *Fe2-Ak*, 15 – 47 *Gh* в центральной и 24 – 36 *Fe2-Ak*, 8 – 11 *Gh* в краевой зонах (Табл. 4.11, ан. 7, 8, Приложение А12). В образцах паралав MN-1133, MN-1176, MN-1193, MN-1279, MN-1234 и MN-1185 встречаются реликты ксенолитов мергелистого известняка, сложенные геленитом, содержащим до 80 мол.% *Gh*, перовскитом, шпинелью, монтичеллитом-кирштейнитом и кальцитом (Табл. 4.11, ан. 9, Рис. 4.11, г) [Глушкова и др., 2023б].

Минералы группы шпинели в паралавах образуют идиоморфные микролиты, которые часто встречаются в виде включений размером до 0.2 мм как в интерстициях между минералами матрикса, так и виде включений в микрофенокристах плагиоклаза и Al -клинопироксена, а также в реликтах ксенолитов осадочных пород (Рис. 4.8, б).

В паралавах *Хамарин-Хурал-Хида* преобладают микролиты, отвечающие по составу плеонасту и Fe -плеонасту (Табл. 4.12, ан. 1; Рис. 4.13, а, Приложение А6). В паралаве MN-1411 шпинелиды имеют зональное строение: соотношения $Fe^{3+}/(Fe^{3+} + Al)$ и $Fe^{2+}/(Fe^{2+} + Mg)$ увеличиваются от центра к краю с 0.2 – 0.3 до 0.65 (Табл. 4.12, ан. 2, 3). Шпинель $MgAl_2O_4$, содержащая до 27.8 мас.% MgO , встречается только в ксенолитах мергелистого известняка, обр. MN-1420. В обр. MN-1425 Al -магнетит в ассоциации с геленитом образует скелетные кристаллы во флюидальном прослое (Рис. 4.14, а), а магнетит, содержащий до 89.5 мас.% $FeO_{общ}$, встречается во включениях в пирротине (Табл. 4.12, ан. 4).

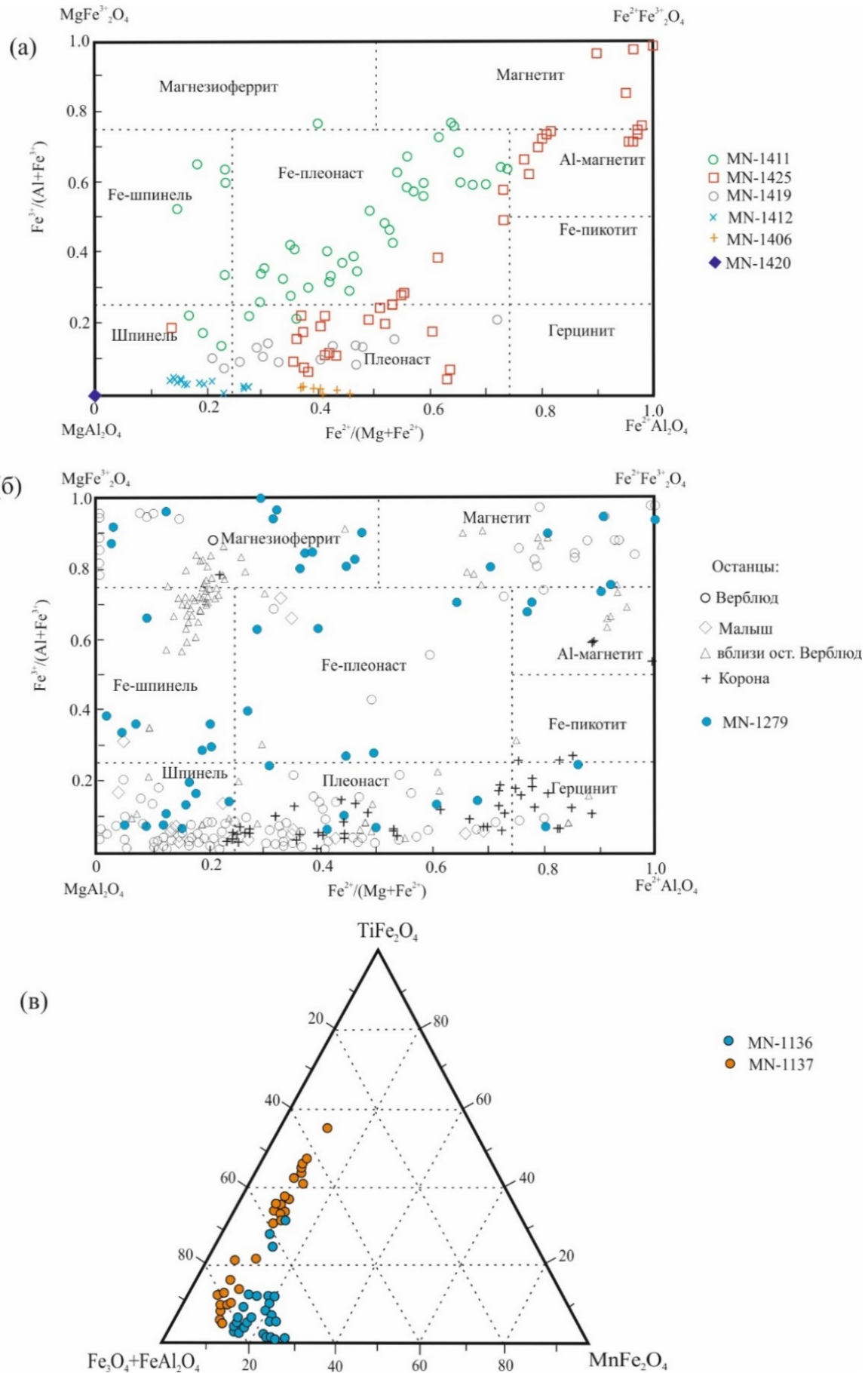


Рисунок 4.13. Вариации состава минералов группы шпинели в паралавах Хамарин-Хурал-Хида (а) и Нилгинского комплекса (б, в).

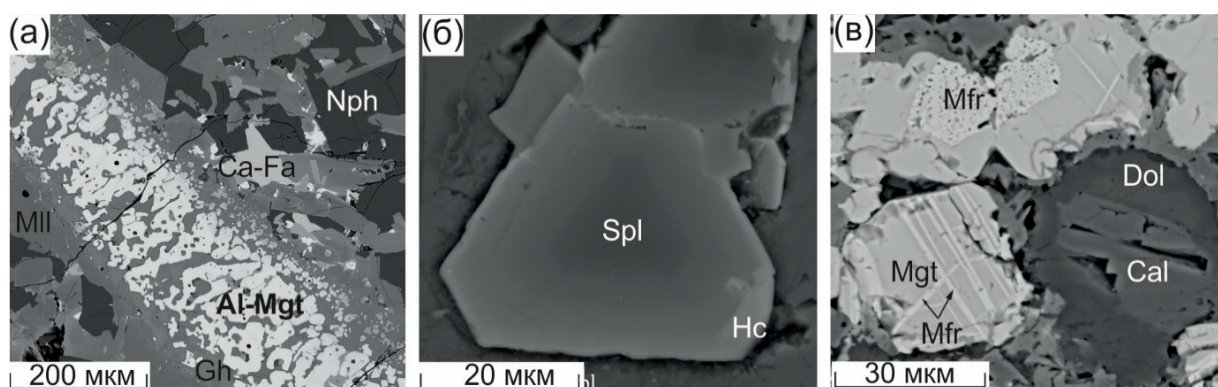


Рисунок 4.14. Фрагменты матрикса паралав.

(а) Флюидальный прослой, сложенный Al-магнетитом и геленитом, обр. MN-1425 (Хамарин-Хурал-Хид). (б) Зерно шпинели с каймой герцинита, обр. MN-1279 (Нилгинский комплекс). (в) Магнетит с включениями магнезиоферрита, обр. MN-1279. Al-Mgt – Al-магнетит, Hc – герцинит, Mft – магнезиоферрит, Dol – доломит.

Состав шпинелидов из паралав *Нилгинского комплекса* более разнообразен, чем в породах Хамарин-Хурал-Хида. В мелилит-нефелиновых паралавах преобладают микролиты шпинели и плеонаста (Рис. 4.13, б). Паралавы и прожилки паралав в клинкере на останце Корона содержат микролиты герцинита FeAl_2O_4 с примесью TiO_2 до 5.6 мас.%. (Табл. 4.12, ан. 5, Приложение А14). Ксеноморфные зёрна магнезиоферрита MgFe_2O_4 и Fe-шпинели характерны для ксенолитов осадочных пород в обр. MN-1234 (Табл. 4.12, ан. 6). Широкие вариации состава шпинелидов отмечаются в паралаве обр. MN-1279 (Рис. 4.13, б, Приложение А14). Здесь встречаются идиоморфные зональные микролиты состава шпинель-герцинит, в которых от ядра к краю значение $\text{Fe}^{2+}/(\text{Fe}^{2+} + \text{Mg})$ изменяется от 0.2 до 0.68, а в кайме достигает 0.86 (Рис. 4.14, б). Вблизи ксенолитов осадочных пород, наряду с выделениями магнезиоферрита неправильной формы, встречаются субидиоморфные зерна магнетита с включениями магнезиоферрита (Рис. 4.14, в). Прожилки паралавы в клинкере из обр. MN-1136 и MN-1137 содержат микролиты шпинелидов с высокими концентрациями MnO (2.5 – 9.4 мас.%), которые обрастают игольчатыми кристаллами Mn-содержащего ортопироксена (Рис. 4.8, в). В минералах группы шпинели широко варьирует содержание TiO_2 (до 17.3 мас.%, Табл. 4.12, ан. 7, 8, Приложение А14). Количество минала якобсита MnFe_2O_4 и ульвошпинели

составляет (мол.%): 6 – 28 и 0 – 54 при вариациях суммы миналов магнетита и герцинита 35 – 84 мол.% (Рис. 4.13, в).

Таблица 4.12. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы шпинели

	Хамарин-Хурал-Хид				Нилгинский комплекс			
	1419	1411		1425	1126	1234	1136	1137
	1(14)	2(3)	3(1)	4(8)	5(6)	6(8)	7(35)	8(36)
TiO ₂	0.58	0.64	1.42	2.37	3.12	0.81	2.98	9.90
Al ₂ O ₃	53.64	39.05	20.20	15.73	34.31	11.37	17.21	28.69
Cr ₂ O ₃	1.93	1.58	-	-	-	-	-	-
FeO	15.85	14.35	23.48	28.24	37.81	7.05	30.60	42.48
Fe ₂ O ₃	11.29	30.11	46.86	47.27	18.67	63.08	44.33	16.40
MnO	0.87	1.35	1.98	0.36	-	3.66	6.33	3.36
MgO	14.07	13.73	6.95	4.49	4.73	15.14	0.27	0.74
ZnO	0.09	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	98.32	100.80	100.88	98.46	98.64	101.10	101.72	101.57
Формульные коэффициенты, ф. ед.								
Ti	0.012	0.014	0.035	0.062	0.075	0.020	0.077	0.241
Al	1.735	1.320	0.778	0.643	1.293	0.432	0.698	1.094
Cr	0.042	0.036						
Fe ²⁺	0.364	0.344	0.642	0.819	1.011	0.190	0.880	1.150
Fe ³⁺	0.233	0.650	1.152	1.234	0.449	1.530	1.148	0.399
Mn	0.020	0.033	0.055	0.011		0.100	0.184	0.092
Mg	0.576	0.587	0.339	0.232	0.226	0.728	0.014	0.036
Zn	0.002							
Сумма	2.983	2.983	3.000	3.000	3.054	2.999	3.000	3.012
<i>Mgt</i> , мол.%							38.49	10.70
<i>Hc</i>							34.97	54.97
<i>Jcb</i>							18.99	9.53
<i>Usp</i>							7.55	24.81

Формулы рассчитаны на 4 атома кислорода.

Миналы: *Mgt* – магнетит, *Hc* – герцинит, *Jcb* – яacobсит MnFe₂O₄, *Usp* – ульвошпинель.

Минералы группы оливина разнообразны по составу. При определении состава оливина рассчитывались содержания следующих миналов: форстерит *Fo*, Mg₂SiO₄, фаялит *Fa*, Fe₂SiO₄, кальциооливин *Caol*, Ca₂SiO₄, тефроит *Tph*, Mn₂SiO₄, кирштейнит *Kir*, CaFeSiO₄ и монтчеллит *Mtc*, CaMgSiO₄. В дальнейшем описании состав оливина представлен тремя наборами миналов: *Fo*, *Fa*, *Caol* и *Tph* для классификационной диаграммы; *Fo*, *Fa*, *Tph* и *Kir* для продуктов распада твердого раствора Ca-Fe оливина; *Fo*, *Tph*, *Kir* и *Mtc* для минералов ряда монтчеллит-кирштейнит.

В плагиоклаз-пироксеновой паралаве комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* редкие обособления минералов группы оливина представлены гортонолитом *Fo*₄₅₋₅₂

следующего состава (мас.%): SiO₂ 33.2 – 35.4, FeO 36.2 – 44.9, MgO 19.4 – 22.1 (Приложение А5). В виде постоянной примеси с содержанием < 2.0 мас.% присутствуют CaO и MnO (Табл. 4.13, ан. 1). Мелилит-нефелиновые паралавы вблизи газовых полостей или в фенокристах плагиоклаза содержат редкие зёрна форстерита *Fo*₈₉₋₉₄ размером до 10 – 20 мкм. В виде примесей в магнезиальном оливине содержится до 0.5 мас.% MnO и до 0.7 мас.% CaO (Табл. 4.13, ан. 2).

Продукты распада твердого раствора Fe-Са оливина на Са-фаялит и кирштейнит обнаружены в матриксе только двух образцов мелилит-нефелиновых паралав (обр. MN-1419, MN-1425). Минералы образуют выделения размером до 100 мкм, в которых по объёмному соотношению Са-фаялит преобладает над кирштейнитом (Рис. 4.15, а). Количество минала *Caol* изменяется от 7 до 13 мол.% в Са-фаялите и от 35 до 43.5 мол.% в кирштейните, а содержание минала *Fa* варьирует в пределах 58 – 86 и 47 – 59 мол.%, соответственно. При этом в Са-фаялите количество минала *Kir* составляет 13.5 – 23 мол.%, а в кирштейните – 4 – 17 мол.% минала *Fa*. Химический состав Са-фаялита варьирует в пределах (мас.%): SiO₂ 29.3 – 31.4, FeO 49.5 – 63.5, MnO 2.5 – 5.5, MgO 1.1 – 10.3, CaO 4.2 – 7.9 (Табл. 4.13, ан. 3, 5, Приложение А5) Содержание основных компонентов в кирштейните следующее (в мас.%): SiO₂ 29.6 – 32.4, FeO 36.3 – 43.9, MnO 1.8 – 3.2, MgO 1.1 – 3.0, CaO 21.1 – 26.1. (Табл. 4.13, ан. 4, 6). Значение Mg# = Mg/(Mg + Fe) в кирштейните изменяется от 0.07 до 0.22.

Кирштейнит и зерна промежуточного состава между кирштейнитом и монтichelлитом в мелилит-нефелиновых паралавах Хамарин-Хурал-Хида обнаружены только в ксенолитах мергелистого известняка в обр. MN-1410. Оливины образуют выделения неправильной формы размером до 100 мкм в ассоциации с геленитом и другими минералами (Рис. 4.15, б). Монтichelлит-кирштейнит имеет следующие вариации состава (мас.%): SiO₂ 30.7 – 33.7, FeO 12.5 – 26.5, MnO 0.4 – 1.5, MgO 6.6 – 15.3, CaO 29.6 – 32.8. Значение Mg# изменяется от 0.3 до 0.7, а содержание минала *Kir* – от 60 до 68 мол.% (Табл. 4.13, ан. 7, Приложение А5).

В мелилит-нефелиновых паралавах *Нилгинского комплекса* оливин встречается чаще, чем в паралавах *Хамарин-Хурал-Хида*. В пяти образцах обнаружены микролиты обогащенного Са форстерита (Fo_{85-94}) размером до 200 мкм, содержащие 2.5 – 6 мол.% *Caol* (Табл. 4.13, ан. 8).

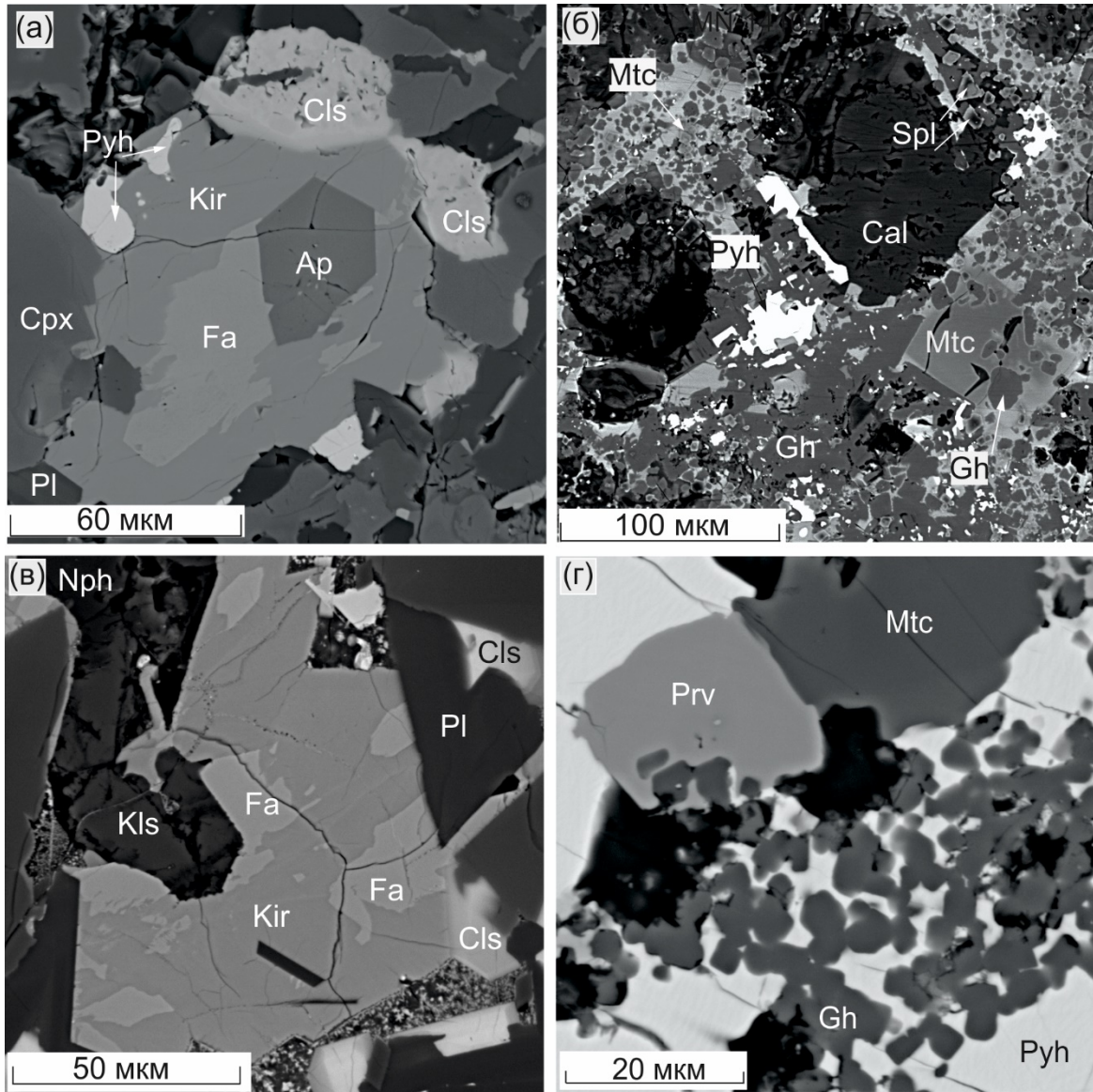


Рисунок 4.15. Фрагменты матрикса паралав (а, в) и ксенолитов термически изменённого мергелистого известняка (б, г) в паралавах комплексов *Хамарин-Хурал-Хид* (а, б) и *Нилгинского* (в, г).

(а) Включение апатита в продуктах распада твердого раствора оливина на Са-фаялит и кирштейнит, обр. MN-1425. (б) Монтичеллит, геленит, кальцит, шпинель и пирротин в реликте ксенолита мергелистого известняка, обр. MN-1411. (в) Продукты распада твердого раствора Fe-Са оливина на Са-фаялит и кирштейнит, обр. MN-1193. (г) Монтичеллит в ассоциации с перовскитом и геленитом в ксенолите мергелистого известняка, обр. MN-1176. Изображения BSE.

Ap – апатит, Cls – цельзиан, Fa – Са-фаялит, Kir – кирштейнит, Kls – кальсилит, Prv – перовскит. Остальные обозначения см. на Рис. 4.8, 4.11.

Продукты распада твердого раствора Fe-Ca оливина на Са-фаялит и кирштейнит встречаются во многих образцах мелилит-нефелиновых паралавах Нилгинского комплекса в виде обособлений размером до 200 мкм (Рис. 4.15, в). Содержания миналов *Caol* и *Fa* составляют 5 – 15 и 43 – 86 мол.% в Са-фаялите и 37 – 45, 34 – 56 мол.% в кирштейните, соответственно. Количество минала *Kir* в Са-фаялите варьирует в пределах 6.5 – 33.5 мол.%, а в кирштейните от 0 до 25 мол.% минала *Fa*. Вариации состава Са-фаялита следующие (мас.%): SiO₂ 27.8 – 32.9, FeO 46.8 – 61.7, MnO 0.6 – 7.02, MgO 2.3 – 14.3, CaO 3.2 – 7.6 (Табл. 4.13, ан. 9, 11, Приложение А13). Состав кирштейнита (мас.%): SiO₂ 28.7 – 34.5, FeO 26.5 – 43.2, MnO 0.4 – 4.52, MgO 0.85 – 9.3, CaO 20.0 – 29.1, Mg# 0.15 – 0.3 (в единичных анализах – до 0.55) (Табл. 4.13, ан. 10, 12, Приложение А13).

Монтichelлит и разности промежуточного состава между монтichelлитом и кирштейнитом (выделения размером до 100 мкм) обнаружены в четырёх образцах мелилит-нефелиновых паралав Нилгинского комплекса. Эти оливины имеют следующие вариации состава (мас.%): SiO₂ 34.1 – 37.6, FeO 1.5 – 19.1, MnO 0 – 3.4, MgO 12.1 – 24.1, CaO 31.0 – 37.2 (Табл. 4.13, ан. 13-17, Приложение А13). Монтichelлит, геленит, содержащий до 80 мол.% минала *Gh*, перовскит, магнетит и пирротин слагают реликты ксенолитов термически измененного мергелистого известняка (Рис. 4.15, г). Даже в пределах одного образца паралавы встречаются зёрна монтichelлит-кирштейнитового ряда с большими вариациями значения Mg# (от 0.4 до 0.9). Содержание *Caol* в большинстве обособлений монтichelлита и монтichelлита-кирштейнита изменяется в интервале 48 – 53 мол.% при количестве *Kir* (3 – 37 мол.%) и *Tph* до 1.1 мол.%. Максимальная концентрация минала *Mtc* составляет 96 мол.% [Глушкова и др., 2023а].

Продолжение таблицы 4.13

Нилгинский комплекс										
	1193	1127		1180		1133	1180	1179	1234	
	8 (7)	9 (46)	10 (49)	11 (6)	12 (19)	13 (6)	14 (2)	15 (2)	16 (6)	17 (5)
SiO ₂	41.06	30.89	31.65	29.37	32.69	36.66	36.51	35.58	32.55	36.28
FeO	3.35	56.87	40.03	54.10	31.03	3.78	15.67	11.46	31.84	12.13
MnO	0.53	1.50	1.14	6.49	3.11	0.49	0.83	0.85	4.22	2.38
MgO	51.27	6.06	2.93	5.83	6.22	22.56	15.71	17.07	5.51	16.40
CaO	2.53	5.35	24.14	3.95	26.82	35.57	32.68	35.62	26.30	34.28
Сумма	98.75	100.67	99.89	99.74	99.87	98.95	101.39	100.57	100.42	101.46
Формульные коэффициенты, ф. ед.										
Si	0.998	0.986	0.989	0.960	0.991	0.987	1.005	0.981	0.989	0.995
Fe ²⁺	0.068	1.517	1.046	1.478	0.787	0.085	0.361	0.264	0.809	0.278
Mn	0.011	0.041	0.030	0.180	0.080	0.011	0.019	0.020	0.109	0.055
Mg	1.858	0.288	0.136	0.284	0.281	0.905	0.645	0.702	0.250	0.670
Ca	0.066	0.183	0.809	0.138	0.871	1.026	0.964	1.052	0.856	1.007
Сумма	3.002	3.014	3.011	3.040	3.009	3.014	2.995	3.019	3.012	3.005
Mg#	0.96	0.16	0.12	0.16	0.26	0.91	0.64	0.73	0.24	0.71
<i>Caol</i> , мол.%	3.26	8.77	40.16	5.90	43.32	50.94	48.34	52.14	42.51	50.22
<i>Fo</i>	92.88	14.05	6.55	13.20	13.83	44.92	32.38	34.61	12.19	33.38
<i>Fa</i>	3.36	75.50	52.05	72.91	39.10	3.92	18.18	12.74	40.16	13.77
<i>Tph</i>	0.51	1.67	1.24	7.98	3.76	0.22	1.10	0.52	5.15	2.63
<i>Fo</i>	92.88	14.05	6.55	13.20	13.83	0	2.21	0	9.84	0
<i>Fa</i>	0.11	66.73	11.89	67.01	0	-	-	-	-	-
<i>Tph</i>	0.51	1.67	1.24	7.98	3.76	0.03	1.10	0.08	5.15	2.35
<i>Kir</i>	6.51	17.55	80.32	11.81	82.42	8.98	36.36	28.09	80.31	29.21
<i>Mtc</i>	-	-	-	-	-	90.98	60.33	71.83	4.71	68.43

Формулы рассчитаны на 4 атома кислорода.

1 – гортонолит; 2 – форстерит; 3, 5, 9, 11 – Ca фаялит; 4, 6, 10, 12 – кирштейнит; 7, 16 – кирштейнит-монтichelлит; 13-15, 17 – монтichelлит.
Mg#, Mg/(Mg + Fe).

Миналы: *Fo* – форстерит, *Fa* – фаялит, *Caol* – кальциооливин, *Tph* – тефроит, *Kir* – кирштейнит, *Mtc* – монтichelлит.

В мелилит-нефелиновых паралавах обоих комплексов обнаружены минералы группы рёнита (подгруппа сапфирина) изоморфного ряда рёнит $\text{Ca}_4(\text{MgFe}^{2+})_8\text{Fe}_2^{3+}\text{Ti}_2\text{O}_4\text{Si}_6\text{Al}_6\text{O}_{36}$ – куратит $\text{Ca}_4\text{Fe}^{2+}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{36}$. В паралавах *Хамарин-Хурал-Хида* включения рёнита-куратита неправильной формы размером до 100 мкм встречаются в Al-клинопироксене и мелилите, а агрегаты игольчатых кристаллов размером 50 – 150 мкм обнаружены в кальците (Рис. 4.16, а). Для минералов характерны значительные вариации состава (мас.%): SiO_2 18.2 – 36.9, TiO_2 2.8 – 11.7, Al_2O_3 9.2 – 22.5, FeO 1.5 – 33.6, Fe_2O_3 0 – 35.9, MgO 2.9 – 16.4, CaO 9.7 – 21.9, Na_2O 0 – 4.2 (Табл. 4.14, ан. 1, Приложение А15). Большинство точек состава микролитов на диаграмме $\text{Mg} - \text{Fe}^{2+}$ попадает в поле рёнита с величиной X_{Mg} , $\text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$ от 0.5 до 0.94 (Рис. 4.17, а). В краевых зонах фенокristов значение X_{Mg} снижается до 0.13 и точки смещаются в область низкотитанового куратита, имеющего < 2 ф. ед. Ti и < 3 ф. ед. Fe^{3+} (Табл. 4.14, ан. 2, 3, Рис. 4.17, б). В обр. MN-1411 встречаются наиболее окисленные разности рёнита, содержащие 4 – 7 ф. ед. Fe^{3+} . На диаграмме $\text{Ti}_{\text{VI}} - (\text{Si-Na-K})$ точки состава этого минерала при Si 4 – 6 ф. ед. и Ti < 1 ф. ед. находятся вблизи точки доррита $\text{Ca}_4\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_9\text{O}_4\text{Si}_3\text{Al}_8\text{Fe}^{3+}\text{O}_{36}$ (Рис. 4.17, б, Табл. 4.14, ан. 4).

В мелилит-нефелиновых паралавах *Нилгинского комплекса* минералы данной серии в основном представлены куратитом (X_{Mg} до 0.45), содержащим (мас.%): SiO_2 22.3 – 36.7, TiO_2 0 – 13.2, Al_2O_3 11.1 – 21.5, FeO 16.8 – 39.5, Fe_2O_3 0 – 28.1, MgO 0 – 9.2, CaO 9.7 – 14.3, Na_2O 0 – 3.9 (Табл. 4.14, ан. 5, 6, Рис. 4.17, а, Приложение А15). Единичные микролиты рёнита встречаются только в паралаве обр. MN-1176 (Табл. 4.14, ан. 7). Наиболее контрастные по составу разности куратита характерны для обр. MN-1133, где минерал встречается как в виде выделений неправильной формы в интерстициях между цельзианом и плагиоклазом, так и образует призматические кристаллы в стекле в ассоциации с Са-фаялитом, герцинитом и пирротинном (Рис. 4.16, в, г). Куратит в первой ассоциации содержит < 1.2 ф. ед. Ti и ~ 1.5 ф. ед. Mg, а во второй > 2 ф. ед. Ti и 3 – 3.5 ф. ед. Mg (Табл. 4.14, ан. 8, 9).

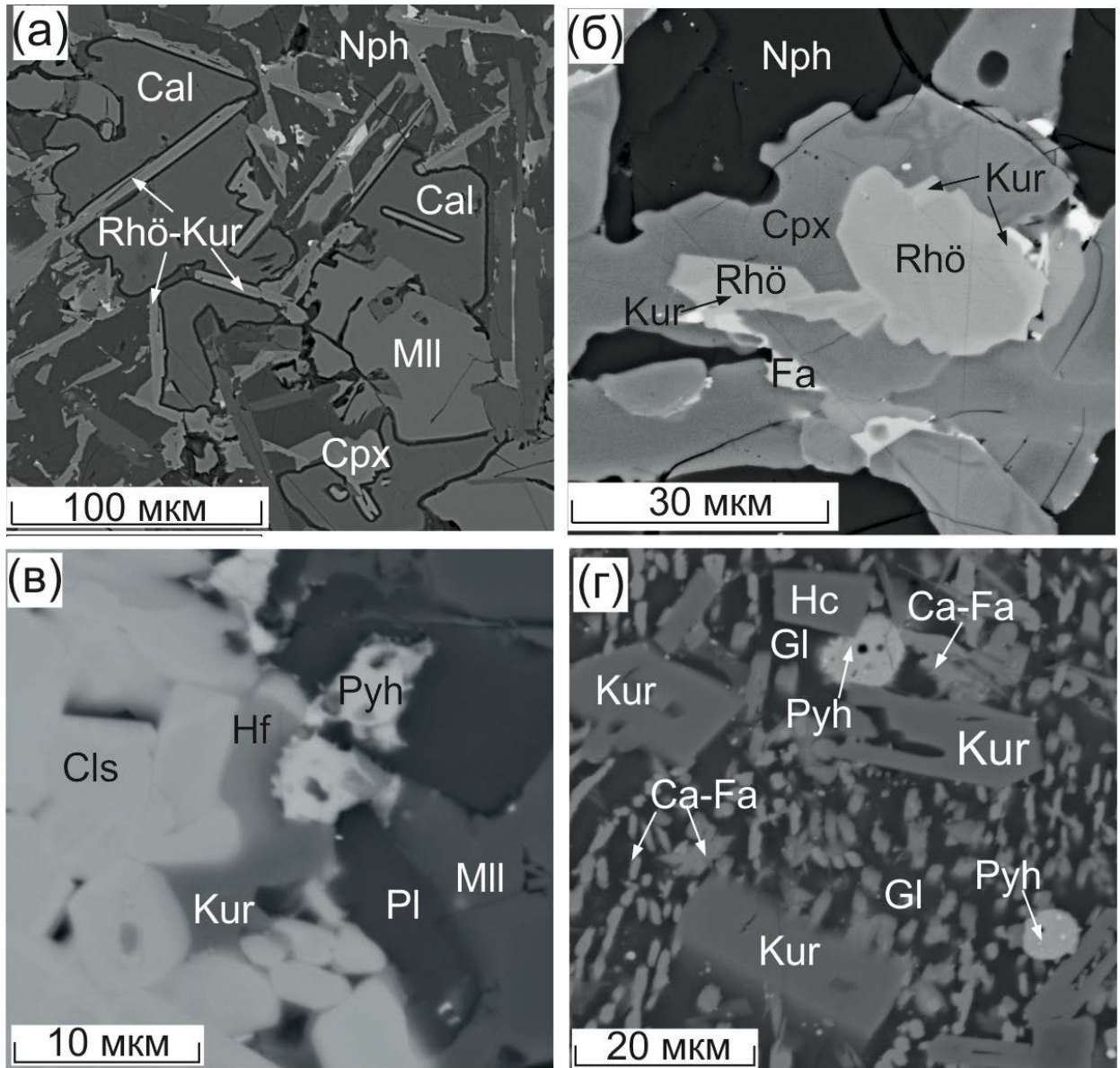


Рисунок 4.16. Фрагменты матрикса паралав Хамарин-Хурал-Хида (а, б) и Нилгинского комплекса (в, г).

(а) Тонкоигольчатые кристаллы рёнита-куратита в кальците, обр. MN-1412. (б) Зёрна рёнита с краевой зоной куратита в клинопироксене, обр. MN-1419. (в) Куратит в интерстициях цельзиана, гиалофана и плагиоклаза, обр. MN-1133. (г) Микролиты куратита в Si-K-Na стекле в ассоциации с Ca-фаялитом, герцинитом и пирротинном, обр. MN-1133. Изображения BSE. Rhö – рёнит, Kur – куратит, Hf – гиалофан. Остальные обозначения см. Рис. 4.8, 4.11.

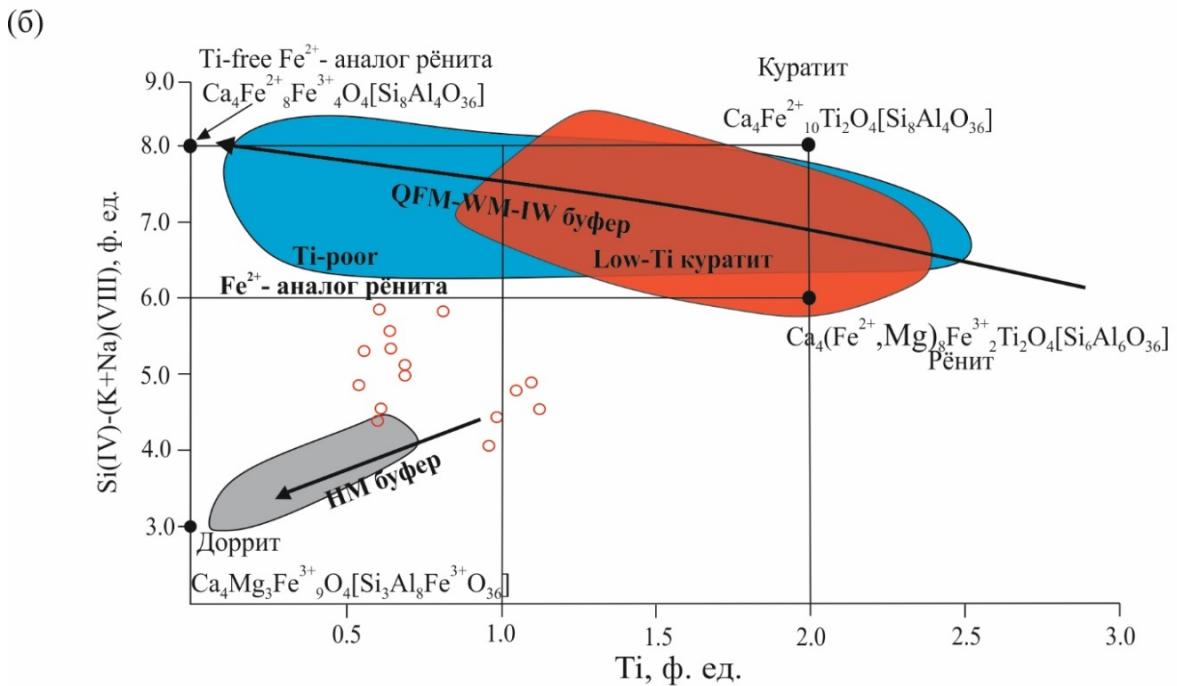
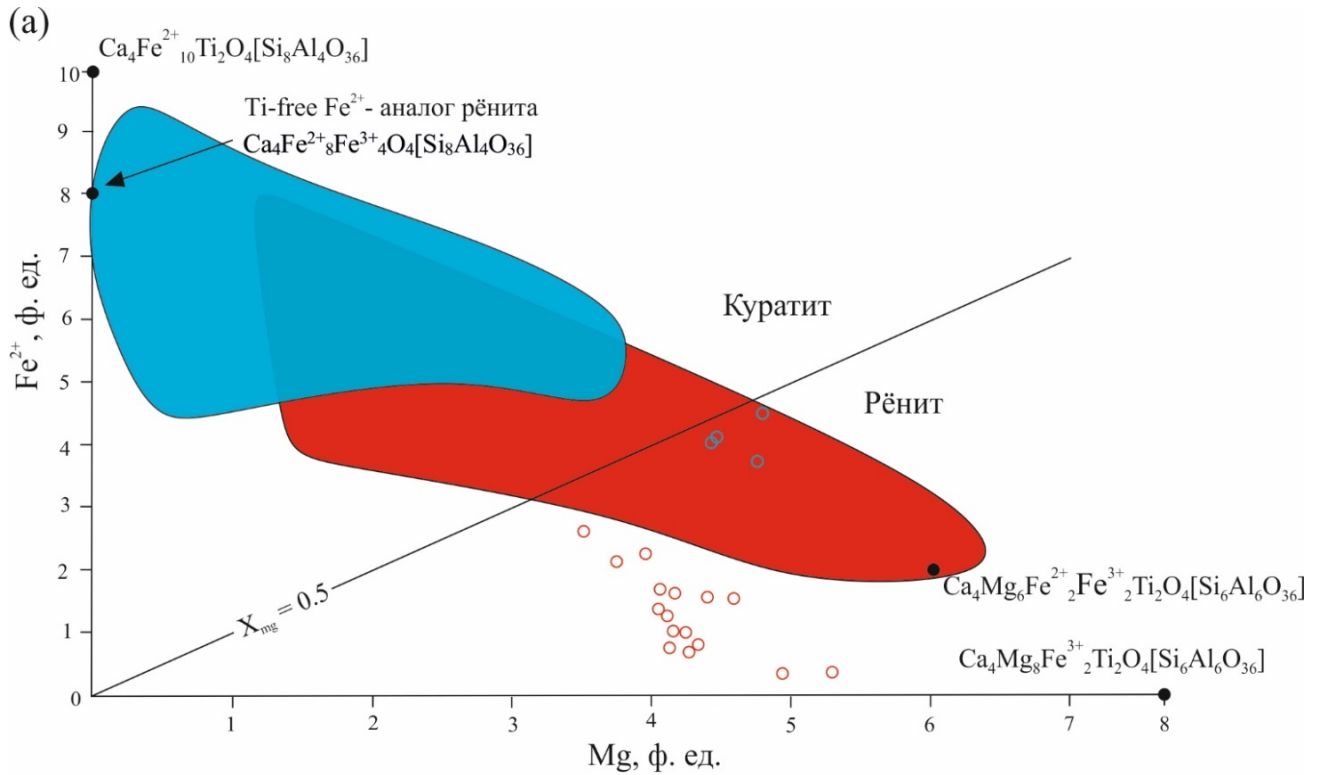


Рисунок 4.17. Составы рёнита-куратита на диаграммах Fe²⁺– Mg (а) и Si_(IV) – (Na + K)_(VIII) – Ti⁴⁺_(VI) (б), по [Peretyazhko et al., 2017] с дополнениями.

1 – 3 – паралавы Хамарин-Хурал-Хида (1), Нилгинского комплекса (2), породы разного генезиса, по [Foit et al., 1987; Cosca et al., 1988] (3); 4 – обр. MN-1411 (Хамарин-Хурал-Хид); 5 – обр. MN-1176 (Нилгинский комплекс).

Таблица 4.14. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы рёнита

	Хамарин-Хурал-Хид				Нилгинский комплекс				
	1425	1419		1411	1127	1129	1176	1133	
	1(11)	2(5)	3(3)	4(5)	5(14)	6(11)	7(3)	8(13)	9(5)
SiO ₂	25.53	25.03	24.90	19.93	24.71	27.19	28.05	27.22	26.12
TiO ₂	8.37	8.63	7.18	4.10	7.58	2.81	8.28	5.16	9.90
Al ₂ O ₃	16.07	15.86	14.87	20.62	15.58	14.62	17.15	16.93	16.02
FeO	19.46	17.02	21.65	6.72	31.10	29.82	20.92	29.98	25.12
Fe ₂ O ₃	8.11	10.73	11.51	24.75	6.07	11.29	2.68	4.44	0.78
MnO	0.26	0.72	1.05	0.70	0.24	0.32	0.48	0.53	0.41
MgO	8.56	9.51	6.08	10.26	2.58	0.69	10.47	3.55	7.91
CaO	12.79	12.78	12.81	13.98	12.35	11.51	13.21	12.13	11.33
Na ₂ O	0.87	0.90	1.07	0.32	0.26	0.70	0.31	0.37	0.24
K ₂ O	-	-	-	-	-	0.67	-	-	-
Сумма	100.02	101.17	101.11	101.38	100.47	99.62	101.55	100.32	97.83
	Формульные коэффициенты, ф. ед.								
Si	7.043	6.821	6.981	5.415	7.124	7.947	7.487	7.705	7.366
Ti	1.737	1.768	1.514	0.839	1.643	0.617	1.662	1.099	2.099
Al	5.224	5.095	4.912	6.602	5.295	5.037	5.395	5.647	5.325
Fe ²⁺	4.490	3.880	5.075	1.527	7.498	7.289	4.670	7.098	5.923
Fe ³⁺	1.683	2.201	2.427	5.060	1.317	2.482	0.538	0.947	0.165
Mn	0.060	0.166	0.249	0.160	0.058	0.079	0.109	0.128	0.099
Mg	3.519	3.864	2.541	4.158	1.107	0.301	4.165	1.499	3.325
Ca	3.780	3.732	3.848	4.071	3.814	3.603	3.778	3.678	3.424
Na	0.467	0.474	0.579	0.169	0.145	0.395	0.160	0.201	0.129
K						0.251			
Сумма	28.001	28.000	28.125	28.000	28.000	28.000	27.964	28.000	27.855
Mg#	0.44	0.50	0.33	0.73	0.13	0.04	0.47	0.17	0.36

Формулы рассчитаны на 40 атомов кислорода. Mg#, Mg/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺). 1, 3, 5, 6, 8, 9 – куратит; 2, 4, 7 – рёнит.

На завершающей стадии кристаллизации матрикса паралав в интерстициях между фенокристаллами и микролитами кристаллизовались минералы группы нефелина. В пиропородах *Хамарин-Хурал-Хида* межзерновое пространство заполнено нефелином следующего состава (мас.%): SiO₂ 40.8 – 51.1, Al₂O₃ 26.7 – 33.1, CaO 0.8 – 7.0, Na₂O 12 – 15.7, K₂O 1.2 – 3.0. Примесь Fe₂O₃ составляет < 1.8 мас.%, а среднее содержание CaO – 3.5 мас.% (Табл. 4.15, ан. 1 – 3, Приложение А16). При таком соотношении компонентов единственным Са-содержащим

минералом в группе нефелина является давидсмитит $(Ca\Box)_2Na_6Al_8Si_8O_{32}$. Формулы минералов этой группы рассчитаны на 32 атома кислорода, и точки состава показаны на фрагменте диаграммы *An* – тринефелин $NaAlSiO_4$, *Trn* – кальсилит $KAlSiO_4$, *Kls* (Рис. 4.18). На диаграмме точки состава минерала попадают преимущественно в поле давидсмитита при содержании минала *Kls* не более 15 мол.%. В обр. MN-1411 точки состава смещаются в сторону минерала лисетита $CaNa_2Al_4Si_4O_{16}$ (Табл. 4.15, ан. 4). Соотношение Si/Al во всех анализах составляет 1.1 – 1.5, сумма (Si + Al) в большинстве анализов 15.7 – 15.8 ф. ед., а количество Na в формуле < 5.8 ф. ед.

Таблица 4.15. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы нефелина

	Хамарин-Хурал-Хид				Нилгинский комплекс				
	1411	1412	1419	1367	1177	1179		1180	
	1(12)	2 (12)	3(8)	4(12)	5(20)	6(20)	7(13)	8(12)	9(7)
SiO ₂	43.53	48.33	44.50	45.68	41.39	41.05	38.39	41.56	39.39
Al ₂ O ₃	32.89	30.68	33.22	32.12	33.40	33.50	31.30	34.62	32.59
FeO	-	-	-	-	1.02	0.72	0.61	0.41	0.37
Fe ₂ O ₃	1.38	0.53	0.70	0.63	-	-	-	-	-
CaO	4.63	2.35	4.48	2.84	2.13	1.24	0.05	2.03	
Na ₂ O	15.16	15.71	15.21	15.67	12.82	13.80	1.39	13.78	1.43
K ₂ O	2.03	1.78	1.34	2.62	9.11	9.08	27.86	7.90	26.89
BaO	-	-	-	-	-	0.13	-	-	0.35
Сумма	99.62	99.38	99.46	99.55	99.87	99.52	99.61	100.30	101.02
	Формульные коэффициенты, ф. ед.								
Si	8.325	9.086	8.441	8.672	1.014	1.011	1.012	1.006	1.014
Al	7.414	6.798	7.426	7.187	0.965	0.972	0.972	0.988	0.989
Fe ²⁺					0.021	0.015	0.014	0.008	0.008
Fe ³⁺	0.221	0.082	0.111	0.100					
Ca	0.950	0.474	0.910	0.577	0.056	0.033	0.002	0.053	
Na	5.622	5.726	5.594	5.766	0.609	0.659	0.071	0.647	0.072
K	0.496	0.427	0.325	0.634	0.285	0.285	0.937	0.244	0.883
Ba						0.001			0.004
Сумма	23.027	22.593	22.806	22.936	2.950	2.975	3.006	2.945	2.969
O	32	32	32	32	4	4	4	4	4
<i>An</i> , мол.%	13.44	7.15	13.32	8.27	5.90	3.34	0.15	5.58	0
<i>Kls</i>	7.02	6.45	4.76	9.09	29.98	29.22	92.80	25.86	92.50
<i>Nph</i>	79.55	86.41	81.92	82.64	64.12	67.44	7.05	68.56	7.50

1 – 4 – давидсмитит; 5 – 8 – нефелин.
An – анортит, *Kls* – кальсилит, *Nph* – нефелин.

В интерстициях между минералами матрикса *нилгинских паралав* находится нефелин следующего состава (мас.%): SiO_2 38.4 – 45.3, Al_2O_3 26.7 – 35.7, CaO 0 – 2.7, Na_2O 11.7 – 16.1, K_2O 4.1 – 11.5, FeO < 2 (Табл. 4.15, ан. 5, 6, 8, Приложение А16). Количество минала *Kls* варьирует в диапазоне 14 – 34 мол.% при количестве минала анортита < 8 мол.%. Наряду с нефелином, некоторые интерстиции между микролитами в паралавах на останце Малыш и вблизи останца Верблюд заполнены кальсилитом следующего состава (мас.%): SiO_2 37.1 – 41.4, Al_2O_3 26.5 – 32.0, Na_2O 0 – 2.4, K_2O 24.1 – 30.8, примеси FeO и CaO < 2.5 (Табл. 4.15, ан. 7, 9, Приложение А16). Кальсилит образует как сростания с нефелином, так и полностью заполняет межзерновое пространство в некоторых фрагментах матрикса (Рис. 4.15, в). В единичных анализах нефелина и кальсилита из обр. MN-1180 и MN-1179 отмечается примесь BaO до 1.0 мас.%.

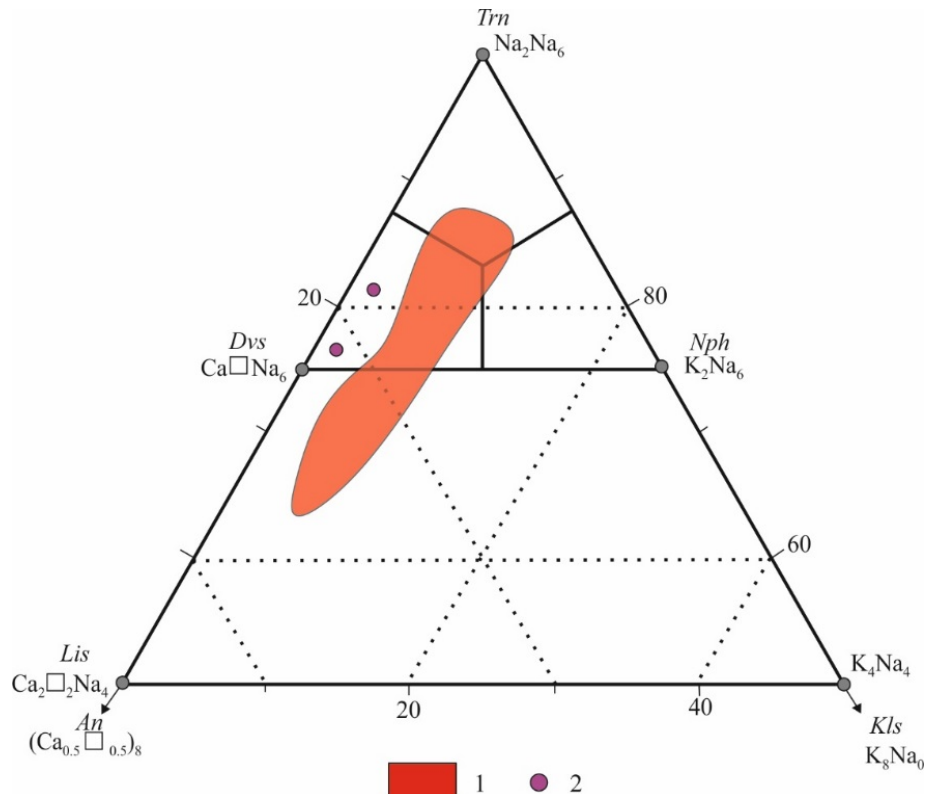


Рисунок 4.18. Фрагмент классификационной диаграммы Na–K–(Ca□) минералов группы нефелина, по [Савина и др., 2020] с дополнениями. Все точки состава на диаграмме имеют постоянное значение $(\text{AlSi})_{16}\text{O}_{32}$. Миналы: *Nph* – нефелин, *Kls* – кальсилит, *Trn* – тринефелин NaAlSiO_4 , *Dvs* – давидсмитит. Минералы: *Lis* – лисетит $\text{CaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$, *An* – анортит. 1 – поле состава давидсмитита из мелилит-нефелиновых паралав Хамарин-Хурал-Хида; 2 – точки состава давидсмититата, по [Kechid et al., 2017].

Кальцит часто встречается в мелилит-нефелиновых паралавах в виде глобул диаметром до 300 мкм или выделений неправильной формы, а также образует кайму вокруг газовых полостей. Нередко минерал образует округлые включения диаметром до 10 – 20 мкм в фенокристах плагиоклаза, Al-клинопироксена, мелилита и в выделениях пирротина (Рис. 4.19, б). Для кальцита характерна примесь SO_3 (< 3.1 мас.%), часто дополнительно отмечается примесь SrO до 2.5 мас.%. В кальцитовых глобулах иногда встречаются включения недиагностированной водосодержащей Ca-Mn фазой (Рис. 4.19, а).

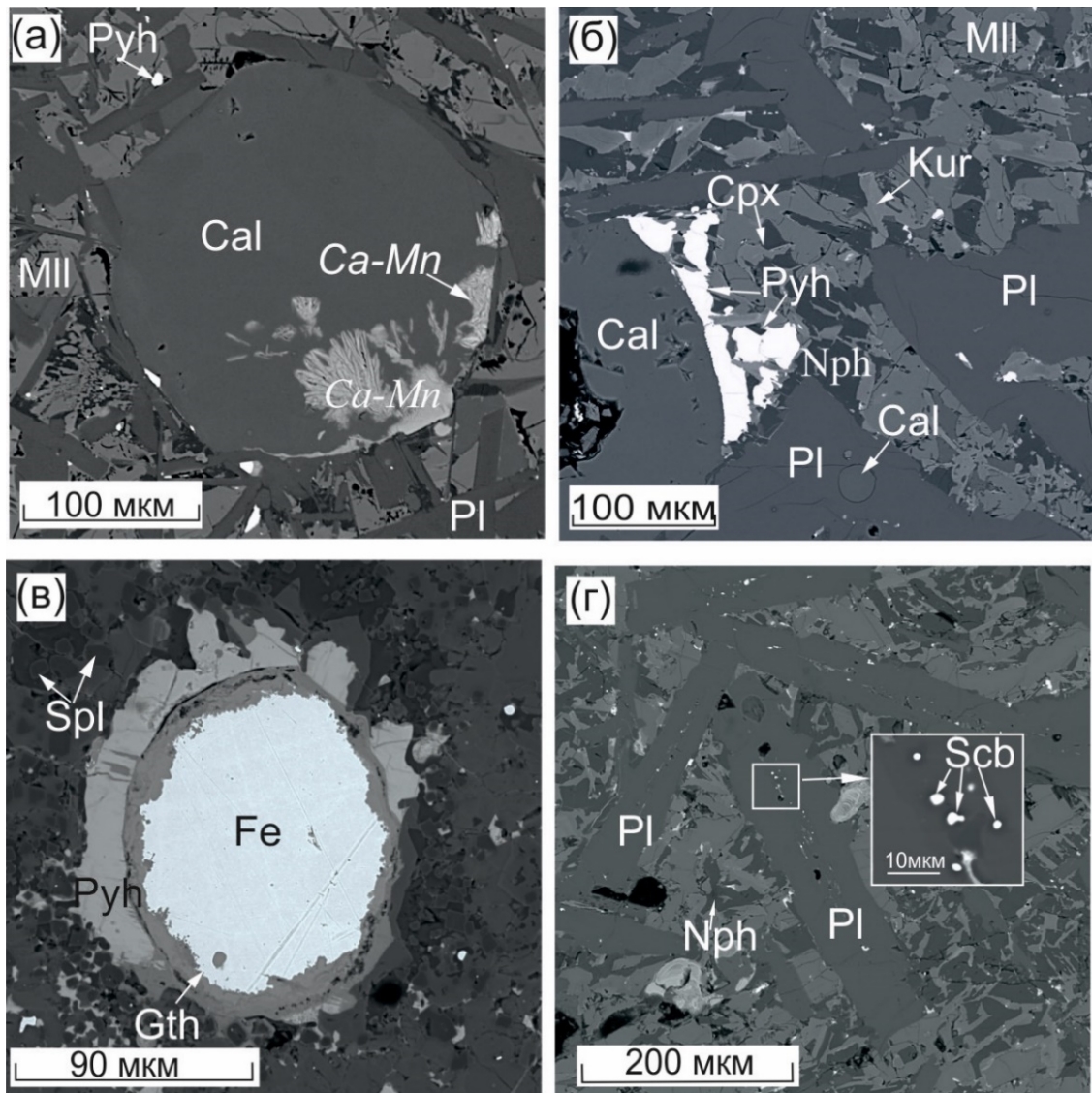


Рисунок 4.19. Фрагменты матрикса мелилит-нефелиновых паралав.

(а) Крупная глобула кальцита с Ca-Mn фазой, обр. MN-1133 (Нилгинский комплекс). (б) Округлое включение кальцита в плагиоклазе и фрагмент кальцитовой глобулы, обр. MN-1412 (Хамарин-Хурал-Хид). (в) Самородное железо с гётит-пирротиновой каймой, обр. MN-1412. (г) Субмикронные зёрна шрейберзита в плагиоклазе, обр. MN-1412. Изображения BSE. Ca-Mn – Ca-Mn водосодержащая недиагностированная фаза, Fe – самородное железо, Ght – гётит, Scb – шрейберзит, Fe_3P . Остальные обозначения см. Рис. 4.8, 4.11.

Характерной особенностью мелилит-нефелиновых паралав Хамарин-Хурал-Хида является наличие включений самородного Fe диаметром до 100 – 150 мкм и фосфида Fe (*шрейберзита* Fe_3P), которые иногда образуют совместные срастания (Рис. 4.19, в). Микронные глобулы шрейберзита, самородного железа и *троилита*, часто, в совместных срастаниях, находятся также силикатном калиевом стекле, образованном при плавлении ксенолитов аргиллита (обр. MN-1420, Табл. 4.16, ан. 1, Табл. 4.17, ан. 4, Приложение А17), а в центральной зоне удлинённых фенокристов плагиоклаза (обр. MN-1412) иногда встречаются включения фосфидов Fe – *баррингерита* Fe_2P , шрейберзита, и *стеадита*, Fe_4P (эвтектика α -Fe и Fe_3P) (Рис. 4.19, г, Табл. 4.16, ан. 2 – 4, Приложение А17).

Таблица 4.16. Средние составы фосфидов железа, по [Савина и др., 2020]

Компоненты	MN-1420		MN-1412	
	1(5)	2(4)	3(19)	4(3)
Fe	84.85	77.15	84.58	88.56
P	15.72	22.92	15.40	11.33
Сумма	100.57	100.07	99.98	99.89
	Формульные коэффициенты, ф. ед.			
Fe^{0+}	2.998	1.954	3.012	4.063
P	1.002	1.046	0.988	0.937
Сумма атомов	4	3	4	5

Формулы фосфидов Fe_2P , Fe_3P и Fe_4P рассчитаны на 3, 4 и 5 атомов (Fe + P) соответственно 1, 3 – шрейберзит, 2 – баррингерит, 4 – стеадит.

В интерстициях между минералами матрикса паралав встречается силикатное стекло. В обр. MN-1410, MN-1406 и MN-1420 (*Хамарин-Хурал-Хид*) обнаружено кислое силикатное, преимущественно, плюмазитовое (A/CNK 1.0 – 1.9, A/NK 1.2 – 3.0) стекло (Рис. 4.20). Сумма оксидов в стекле изменяется от 86 до 96 мас.% (содержит воду по данным КР-спектроскопии). Составы стёкол в интерстициях варьируют значительно (мас.%): SiO_2 51.4 – 77.3, TiO_2 0 – 1.4, Al_2O_3 6.4 – 24.8, FeO 0 – 5.8, MgO 0 – 0.8, CaO 0 – 3.1, Na_2O 2 – 4.8, K_2O 2.7 – 8.0 (Табл. 4.17, ан. 1, Приложение А18). В обр. MN-1420 встречается стекло в реликтах ксенолитов аргиллита, содержащее до 8.1 мас.% Na_2O (Табл. 4.17, ан. 2). В плагиоклаз-пироксеновой паралаве (обр. MN-1406) метаглинозёмистое (A/CNK

0.8 – 1.0, A/NK 1.2 – 1.7) стекло имеет примесь до 1.3 мас.% P₂O₅ (Табл. 4.17, ан. 3).

Таблица 4.17. Средние составы (мас.%) стекла в мелилит-нефелиновых паралавах

	Хамарин-Хурал-Хид			Нилгинский комплекс			
	1410	1420	1406	1129	1175	1185	1127
	1(9)	2(5)	3(9)	4(4)	5(26)	6(7)	7(4)
SiO ₂	69.51	58.55	64.30	68.84	59.27	32.2	52.06
TiO ₂	1.2	1.07	1.33	0.6	2.84	-	-
Al ₂ O ₃	12.92	21.60	11.47	12.22	12.89	18.46	38.7
FeO	1.75	0.75	3.55	1.65	2.32	8.26	0.55
MgO	-	-	0.12	-	0.75	-	-
CaO	1.57	0.18	2.31	0.41	3.27	9.98	-
Na ₂ O	3.37	7.10	2.86	3.17	2.35	2.67	1.54
K ₂ O	3.45	4.52	3.00	4.9	4.55	6.94	4.9
P ₂ O ₅	-	-	0.82	-	-	-	-
BaO	-	-	-	-	-	4.3	-
SrO	-	-	-	-	-	3.10	-
Сумма	93.77	93.77	89.76	91.8	88.23	85.9	97.74
A/CNK	1.06	1.28	0.94	1.08	0.87	0.61	4.94
A/NK	1.39	1.30	1.44	1.16	1.47	1.55	0.20

Мольные отношения $A/CNK = Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ и $A/NK = Al_2O_3/(Na_2O + K_2O)$.

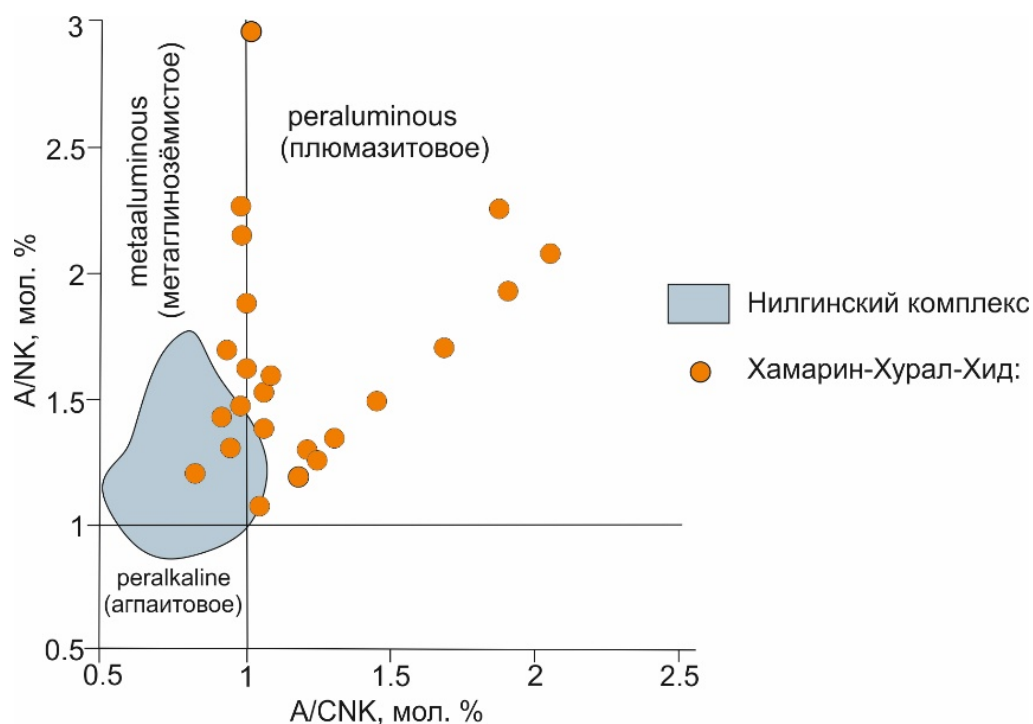


Рисунок 4.20. Диаграмма Шенда для стекла из мелилит-нефелиновых паралав.

Стекло из паралав *Нилгинского комплекса* имеет большие вариации состава. В большинстве анализов сумма оксидов в стекле 85 – 90 мас.% (содержит воду). Преобладает метаглиноземистое стекло (A/CNK 0.6 – 1.0, A/NK 1.0 – 1.7, Табл.

4.17, ан. 4, 5, Приложение А18), содержащее 4 – 7 мас.% K_2O и 1.5 – 3.5 мас.% Na_2O . В паралаве из обр. MN-1185 обнаружено обогащённое Ba и Sr стекло (Табл. 4.17, ан. 6). Стекло в ксенолитах плавленного аргиллита из паралав характеризуется высокой глинозёмистостью ($Al_2O_3 > 29$ мас.%, Табл. 4.17, ан. 7).

Перовскит образует зёрна неправильной формы размером до 20 мкм в реликтах ксенолитов мергелистого известняка в ассоциации с геленитом, кальцитом и монтичеллитом, либо находится вблизи газовых полостей, окаймленных пирротином (Рис. 4.15, г). Для перовскита нилгинских паралав характерны примеси Al_2O_3 (< 1.7 мас.%) и FeO (< 4.0 мас.%), а в паралавах Хамарин-Хурал-Хид этот минерал содержит (мас.%): $Ce_2O_3 < 1.0$, $V_2O_5 < 1.5$ (Табл. 4.18, ан. 1, 2, 5, 6).

В мелилит-нефелиновых паралавах иногда встречаются микролиты фторапатита. Минерал находится во включениях в пирротине, в фенокристах Са-фаялита либо в виде удлинённых зёрен в матриксе (Рис. 4.15, а). Фторапатит имеет небольшие вариации состава, часто содержит примеси SrO, La_2O_3 и Ce_2O_3 (в сумме < 3 мас.%; Табл. 4.18, ан. 3, 4, 7, 8).

Таблица 4.18. Средние составы (мас.%) и формульные коэффициенты фторапатита и перовскита

	Хамарин-Хурал-Хид				Нилгинский комплекс			
	1420	1411	1420	1412	1193	1234	1179	1279
	1(3)	2(3)	3(11)	4(4)	5(10)	6(4)	7(2)	8(5)
SiO ₂		4.26	4.72	5.41			4.09	3.67
TiO ₂	59.44	48.47			58.59	53.56		
Al ₂ O ₃	0.47	2.24	1.41	0.99	0.99	1.20	0.64	0.45
FeO		2.71	2.08	0.91	0.66	3.47	0.41	0.92
CaO	40.02	39.80	50.36	53.14	39.94	39.94	50.55	49.67
SrO	0.22		1.33	1.68			2.75	3.85
P ₂ O ₅			37.95	36.10			35.95	37.44
SO ₃			0.83	0.16			1.89	
Cl			0.59	0.05				
F			0.32	1.20			2.92	3.95
V ₂ O ₃	0.74							
La ₂ O ₃							0.31	0.44
Ce ₂ O ₃	0.74	0.49					0.72	1.16
Сумма	101.63	97.97	99.59	99.64	100.17	98.18	100.19	101.55
Формульные коэффициенты, ф. ед.								
Si		0.098	0.373	0.433			0.325	0.292
Ti	0.997	0.838			0.992	0.941		
Al	0.012	0.061	0.131	0.093	0.026	0.033	0.060	0.042
Fe ²⁺		0.052	0.138	0.061	0.012	0.068	0.027	0.061
Ca	0.956	0.980	4.271	4.557	0.964	1.000	4.307	4.237
Sr	0.003		0.061	0.078			0.127	0.178
P			2.543	2.446			2.421	2.524
S			0.050	0.010			0.113	
Cl			0.079	0.007				
F			0.081	0.304			0.733	0.995
V	0.013							
La							0.009	0.013
Ce	0.006	0.004					0.021	0.034
Сумма	1.987	2.032	7.727	7.988	1.995	2.042	7.832	7.956
O	3	3	12	12	3	3	12	12

1, 2, 5, 6 – перовскит; 3, 4, 7, 8 – фторапатит.

ГЛАВА 5. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ ПИРОГЕННЫХ ПОРОД И ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРОМЕТАМОРФИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

5.1. Особенности геологического строения пирометаморфических комплексов

Пирометаморфические комплексы Монголии, расположенные на удалении около 300 км друг от друга, сформировались в результате угольных пожаров в раннемеловой терригенно-осадочной толще дзунбаинской свиты. Комплексы имеют ряд общих черт и различий как в геологическом строении, так и по минералого-геохимическим характеристикам слагающих их пород.

По геоморфологическим особенностям пирометаморфические комплексы Монголии существенно различаются. В Нилгинском комплексе пирогенные породы мощностью до 10 – 15 м обнаружены на трёх останцах в разной степени плавленной осадочной толще (Рис. 2.3, а), в которых находились, по-видимому, эпицентры древних природных угольных пожаров, проходивших в четвертичное время (< 2 млн лет, по [Перетяжко и др., 2018]). Стекловатые клинкеры, обожжённые пелиты и находящиеся под ними на останцах слои глины и алевропесчаника сохранились после эрозии раннемеловых осадочных пород.

Анализ геологического строения комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* с учётом данных ручного бурения [Шипулин, 1940] и особенностей развития и строения пирометаморфических комплексов [Пирогенный ..., 2005] позволил построить схематический геологический разрез от его центральной до северо-восточной частей (Рис. 5.1). В центральной части комплекса обнажается осевой фрагмент антиклинальной складки, осложненной на крыльях складками меньшего порядка и прогибами с пологим углом залегания пород осадочной толщи и линзами бурого угля. Центральная часть отделена от северо-восточной крутопадающим сбросом. Природные пожары здесь были вызваны, по-видимому, самовозгоранием бурого угля в процессе окисления сульфидной серы (горение поддерживалось поступлением атмосферного кислорода в угольные пласты по трещинным зонам в осадочной толще). Фронт пожаров постепенно продвигался

по угольным линзовидным прослоям от флангов линз к их центральной части, где мощность бурого угля была максимальной. После выгорания угля, по-видимому, произошло оседание вышележащих пирогенно изменённых пород и образовались три депрессии, ограниченные сбросами на контакте с останцами осадочных пород, частично перекрытые в настоящее время четвертичными отложениями (Рис. 2.6, а-в, 5.1).

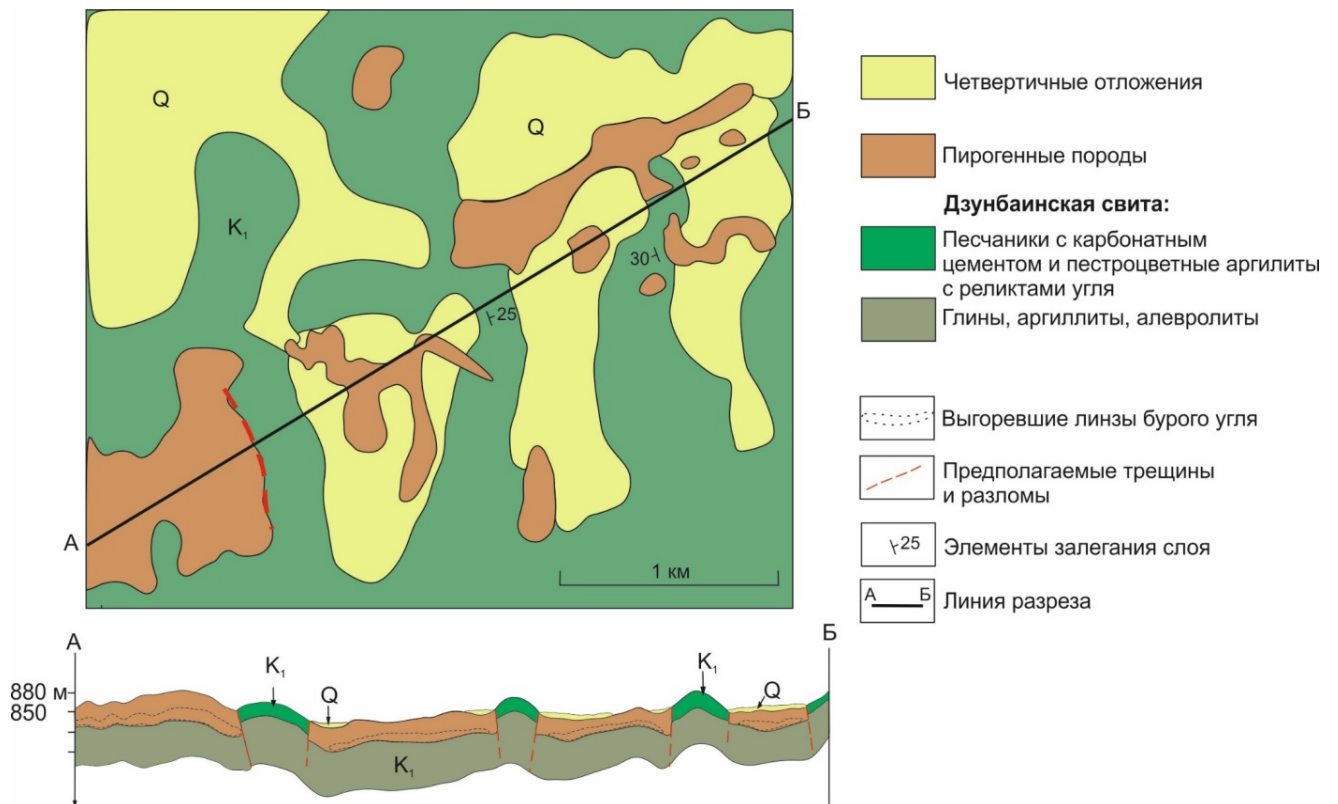


Рисунок 5.1. Схематическая геологическая карта и разрез от центральной до северо-восточной частей комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

5.2. Осадочные протолиты пирогенных пород

Большое разнообразие пород пирометаморфических комплексов Монголии обусловлено гетерогенностью состава осадочных толщ и локальными условиями их термических преобразований, частичного либо полного плавления. По валовому и минеральному составу породы обоих комплексов имеют ряд различий и общих особенностей. Среди пирогенных пород преобладают обожжённые пелиты (аргиллиты, алевролиты, алевропесчаники) и *клинкеры*,

содержащие фрагменты пелитов и стекло с включениями новообразованных минералов. Концентрации петрогенных оксидов и примесных элементов в пелитовых породах и клинкерах и имеют близкие значения, а стекловатый матрикс клинкеров содержит многочисленные реликтовые зёрна минералов и фрагменты ксенолитов в разной степени плавленных осадочных, преимущественно, пелитовых пород. Клинкеры Хамарин-Хурал-Хида характеризуются более кислым составом (67 – 75 мас.% SiO₂) по сравнению с таковыми в Нилгинском комплексе (64 – 66 мас.% SiO₂), имеют близкие значения суммы щелочей K₂O + Na₂O (3.5 – 6.1 мас.%) при соотношении K₂O > Na₂O.

В северо-восточной и центральной частях комплекса Хамарин-Хурал-Хид встречаются *железистые пирогенные породы и паралавы*, содержащие до 52 мас.% Fe₂O₃. Особенности их валого состава и наличие в них многочисленных реликтовых (детритовых) зёрен минералов осадочных пород свидетельствуют о том, что эти пирогенные породы образовались в процессе термических изменений и частичного либо полного плавления железистых пелитов, вероятно, аргиллитов и алевропесчаников. Железистые паралавы, вероятно, формировались из силикатно-железистого расплава после плавления таких пелитовых пород.

Тридимит-секанинаитовые паралавы сложены K-содержащим секанинаитом, тридимитом, Ti-магнетитом, ферросилитом, фаялитом, образующим структуру спинифекс матрикса, и кислым калиевым силикатным стеклом. Подобная минерально-фазовая ассоциация наблюдалась в пирогенных породах Кузнецкого угольного бассейна и района Раватского угольного пожара [Шарыгин и др., 2009; Grapes et al., 2011;], а некоторые наиболее железистые пирогенные породы Хамарин-Хурал-Хида (Рис. 4.5, в) по минеральному составу похожи на таковые из горельников Кендерлыкской впадины [Калугин и др., 1991].

Мелилит-нефелиновые паралавы содержат породообразующие минералы – зональные фенокристы Al-клинопироксена и мелилита, эволюция состава которых от центра к краевой зонам сопровождается снижением глиноземистости (Рис. 4.10, 4.12).

Клинопироксен в таких паралавах имеет состав диопсида-геденбергита со значительной примесью минала кушироита и большинство его фенокристов зональны: центральные зоны более магниальные и глиноземистые по сравнению с краевыми, обогащенными Fe и Mn (Рис. 4.10, Табл. 4.10, Приложения А9, А10). Клинопироксен близкого состава с общей формулой $(\text{CaNa})(\text{MgFe}^{2+}\text{AlFe}^{3+}\text{Ti})(\text{SiAl})_2\text{O}_6$ ранее назывался фассаитом. Этот минерал дискредитирован IMA [Morimoto, 1989] и теперь называется Al-содержащим диопсидом или авгитом. Такой клинопироксен часто встречается в метеоритах [Blander, Fuchs, 1975; Hazen, Finger, 1977], зонах контактового метаморфизма [Owens, 2000; Пушкарёв 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 самостоятельных минералов, относятся эссеинит $\text{CaFe}^{3+}\text{AlSiO}_6$ [Cosca, Peacor, 1987], гроссманит $\text{CaTi}^{3+}\text{AlSiO}_6$ [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], бухитах [Kruszewski et al., 2018] и пирометаллургических шлаках [Warchulski et al., 2016], но имеет характерную отличительную особенность в пирогенных породах – высокую глиноземистость и количество минала кушироита, достигающее 49 мол.% (~ 20 мас.% Al_2O_3).

Минералы группы мелилита из мелилит-нефелиновых паралав разнообразны по составу (Приложения А11, А12). Паралавы содержат железистый акерманит–алюмоакерманит с небольшой примесью минала геленита ($\text{Si} > 1.5 - 1.6$ ф. ед., 3 – 18 мол.% *Gh*, Рис. 4.12). Иногда встречаются зональные фенокристы, в центральном (реликтовом) ядре которых содержится до 40 – 47 мол.% *Gh*. Геленит (> 70 мол.% *Gh*) в ассоциации с Al-диопсидом,

монтчеллитом-кирштейнитом, перовскитом, кальцитом и другими минералами встречается только в реликтах ксенолитов мергелистого известняка.

Известно, что минералы ряда геленит $\text{Ca}_2\text{AlAlSiO}_7$ – акерманит $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ кристаллизуются в мелитолитах [Stoppa, 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; Девятиярова, 2022]. Акерманит и железистый акерманит $\text{Ca}_2\text{MgFe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_7$ являются породообразующими в ультраосновных вулканических породах [Melluso et al., 2010; Николаева, 2014; Lustrino et al., 2020] и в пирометаллургических шлаках [Warchulski et al., 2016]. Алюмоакерманит $\text{CaNaAlSi}_2\text{O}_7$ обнаружен в мелилит-нефелиновых туфах вулкана Олдоиньо Ленгаи [Wiedenmann et al., 2009]. Мелилит, содержащий более 40 мас.% Fe_2O_3 , встречается в породах пирометаморфического комплекса Баффало [Foit et al., 1987], а бариевый мелилит – беннешерит, $\text{Ba}_2\text{Fe}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_7$ открыт в пирогенных породах комплекса Хатрурим [Krzatała et al., 2022].

Большое разнообразие состава минералов группы мелилита пирометаморфического и контактово-метаморфического генезиса отличает их от таковых в магматических и техногенных породах. Мелилит из вулканических пород и пирометаллургических шлаков обычно содержит ~ 2 ф. ед. Si и точки его состава на диаграмме $\text{Si}^{4+} - \text{Al}^{3+}$ располагаются между миналами $\text{CaNaRSi}_2\text{O}_7$, где $\text{R} = \text{Mg} + \text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$, и алюмоакерманита $\text{CaNaAlSi}_2\text{O}_7$ (Рис. 5.2). Для мелилита пирометаморфических и контактово-метаморфических пород характерна эволюция состава от геленита до железистого акерманита–алюмоакерманита. Только в образце паралавы MN-1133 (Нилгинский комплекс) встречаются фенокристы мелилита с примесью Ba и Sr (Табл. 4.11, ан. 6), состав которых относится к изоморфному ряду между железистым акерманитом и Sr-содержащим беннешеритом.

Хорошо проявленные тренды изменения составов мелилита и диопсида-геденбергита, содержащего до 49 мол.% минала *Ks*, направленные от центра к

краевым зонам фенокристов при значительном снижении их глиноземистости (Рис. 4.10, б; 4.12, б; 5.2), а также наличие реликтов ксенолитов карбонатно-силикатных осадочных пород с геленитом, содержащим до 92 мол.% *Gh*, отличают породообразующие минеральные ассоциации монгольских паралав от таковых из других пирометаморфических комплексов [Глушкова и др., 2023 б].

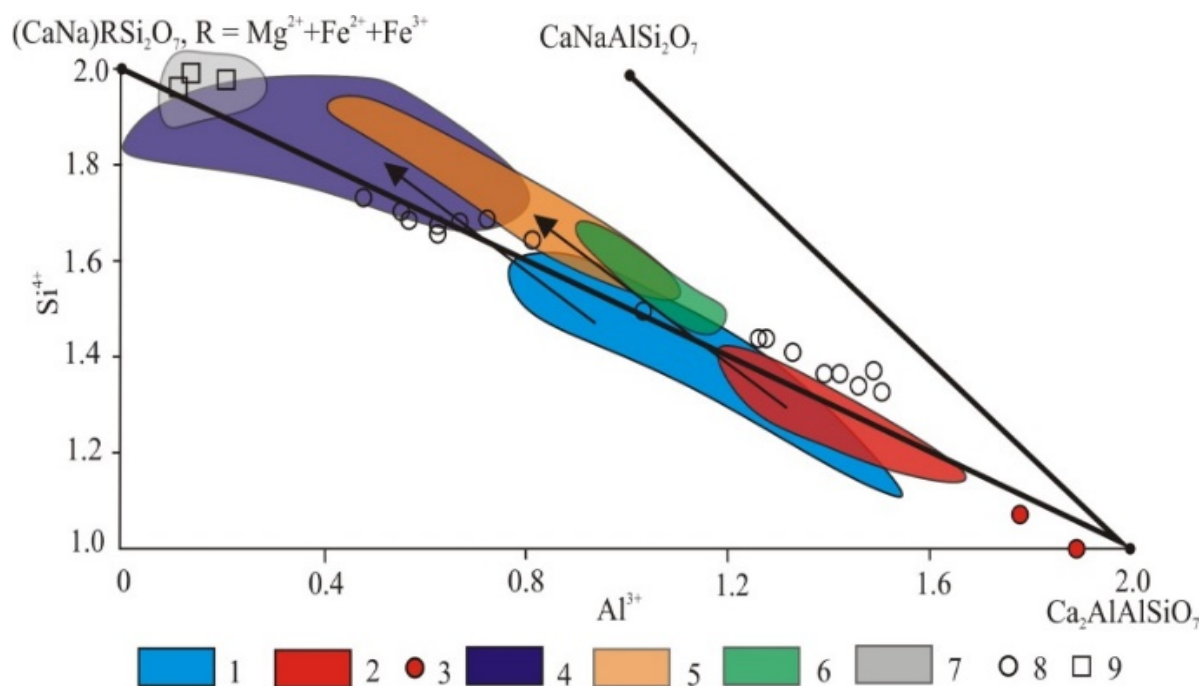


Рисунок 5.2. Эволюция состава мелилита в паралавах.

(1 и 2) Геленит из центральной зоны фенокристов: Нилгинский комплекс (1), Хамарин-Хурал-Хид (2). 3 – Геленит, содержащий 88–92 мол.% *Gh*, из реликта ксенолита мергелистого известняка, Хамарин-Хурал-Хид. (4 и 5) Фенокристы: Нилгинский комплекс (4), Хамарин-Хурал-Хида (5). 6 – Мелилит из вулканических пород, по [Lustrino et al., 2020] и [Николаева, 2014]. 7 – Мелилит из мелитолитов, по [Stoppa, Sharygin, 2009]. 8 – Мелилит из мраморизованных мергелистых известняков в зоне контакта с базальтами, по [Девятярова, 2022]. 9 – Мелилит из пирометаллургических шлаков, по [Warchulski et al., 2016]. $(CaNa)RSi_2O_7$ – сумма миалов $Ca_2MgSi_2O_7$, $Ca_2Fe^{2+}Si_2O_7$ и $CaNaFe^{3+}Si_2O_7$.

Особенности эволюции состава породообразующих минералов мелилит-нефелиновых паралав и результаты детального изучения минеральных ассоциаций реликтов ксенолитов карбонатно-силикатных осадочных пород, позволили сделать вывод, что протолитом для таких паралав были мергелистые известняки, претерпевшие стадию высокотемпературного низкобарического метаморфизма [Peretyazhko et al., 2021].

5.3. Условия кристаллизации минералов пирогенных пород

Новообразованными минералами в *клинкерах* являются К-содержащие минералы группы кордиерита, представленные индиалитом с каймой ферроиндиалита (Нилгинский комплекс), а также кордиеритом-секанинаитом и индиалитом-ферроиндиалитом (Хамарин-Хурал-Хид). Наличие в клинкерах минералов группы кордиерита в гексагональной модификации позволяют предположить, что температура частичного плавления пелитовых пород превышала 1050 °С (по данным [Haefeker et al., 2012]).

В клинкере Хамарин-Хурал-Хида кристобалит является породообразующим минералом. Наличие оплавленных зёрен детритового кварца и кристобалита в этой породе свидетельствует, что температура пирогенных изменений пелитов локально превышала 1300–1400 °С и, предположительно, достигала поля устойчивости стабильной фазы β-кристобалита (> 1470 °С), по [Peretyazhko, Savina, 2023].

В *железистых пирогенных породах*, сложенных агрегатом магнетита-якобсита, и *паралавах* (тридимит-секанинаитовой и кристобалит-фаялитовой) соотношение FeO/Fe_2O_3 варьирует значительно (от 0.3 до 3.5), что свидетельствует о больших вариациях фугитивности кислорода в пирогенных процессах изменений пород осадочных протолитов. Такие окислительно-восстановительные условия наблюдались также при формировании плавящихся железистых пирогенных пород, в т.ч. паралав, на “горельниках“ Кендерлыкской впадины [Калугин и др., 1991].

В результате твердофазовых термических преобразований и частичного плавления мергелистых известняков формировались мафические расплавы, исходные для *мелилит-нефелиновых паралав* (Рис. 5.3). По качественной петрологической модели, впервые представленной в [Peretyazhko et al., 2021], на стадии высокотемпературного и низкобарического метаморфизма в *P-T* условиях стабильности кальцита в мергелистом известняке кристаллизовались Al-клинопироксен и мелилит (геленит).

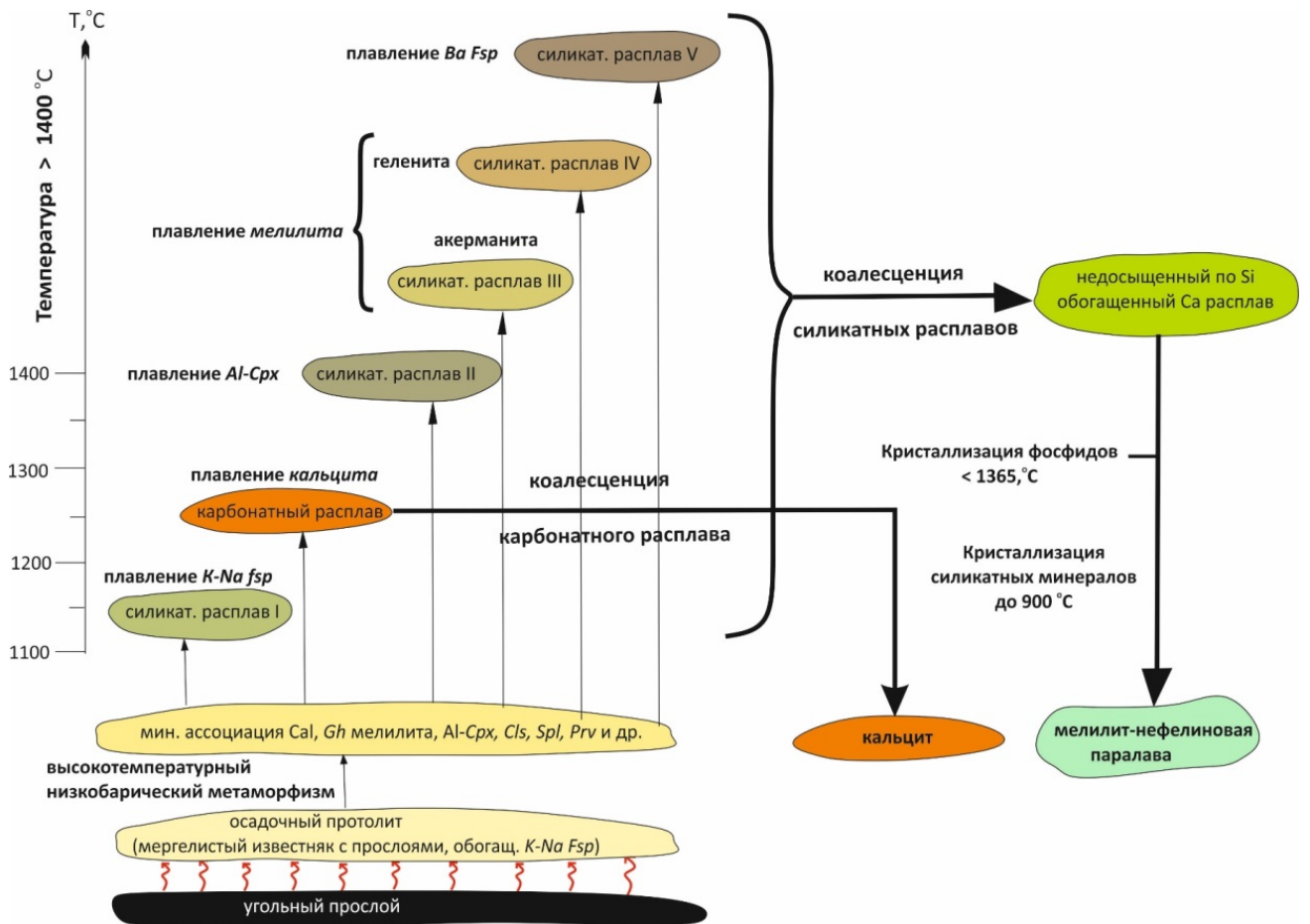


Рисунок 5.3. Качественная модель формирования мелилит-нефелиновых паралав.

Экспериментальные данные по температуре плавления минералов, по [Peretyazhko et al., 2021]. *Ba Fsp* – Ba-содержащий полево шпат, *K-Na Fsp* – K-Na полево шпат. Остальные обозначения см. Рис. 4.8 и 4.11.

Твердофазовые минеральные трансформации (пирогенный метаморфизм) мергелистого известняка происходили до температуры ~ 1100 °C, при которой началось плавление K-Na полевых шпатов (Рис. 5.3). В более высокотемпературных условиях (> 1250 °C) последовательно плавилась кальцит, мелилит, Al-клинопироксен и другие тугоплавкие силикатные минералы с образованием несмесимых расплавов – карбонатного (нестехиометрического $\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$ либо стехиометрического кальцитового) и нескольких алюмосиликатных с большими вариациями состава. Этот вывод подтверждается находками кальцитовых глобул в матрице паралав и в первичных расплавных включениях, захваченных в процессе роста фенокристов породообразующих минералов (Рис. 4.19, б), а также детальным изучением минерально-фазовых

особенностей образца термически измененного и частично плавного мергелистого известняка (обр. MN-1423), содержащего фрагменты закристаллизованного кальцитового расплава и многочисленные глобулы силикатных стёкол с большими вариациями состава, в т.ч. близкого к гелениту и Al-клинопироксену [Peretyazhko et al., 2021].

В результате слияния расплавов, образованных при плавлении силикатных минералов мергелистого известняка, формировался недосыщенный по кремнезёму и обогащенный Са расплав, из которого в дальнейшем кристаллизовалась мелилит-нефелиновая паралава. В матриксе паралав сохранились зональные фенокристы мелилита с ядром геленита, а также реликты ксенолитов мергелистого известняка, сложенные геленитом, Al-диопсидом, монтichelлитом и другими более редкими минералами (Рис. 4.11, в, г; 4.15, б, г).

Фосфиды железа обнаружены в двух образцах мелилит-нефелиновой паралавы комплекса Хамарин-Хурал-Хид (Рис. 4.19, г). Известно, что фосфиды встречаются в метеоритах и, крайне редко, в породах земного происхождения [Britvin et al., 2015, 2017, 2019a, 2019b]. Согласно фазовой диаграмме системы Fe-P [Диаграммы состояния ..., 1986], баррингерит Fe_2P , шрейберзит Fe_3P и стеадит (эвтектика α -Fe и Fe_3P) в условиях атмосферного давления кристаллизуется при температурах $< 1365, 1166$ и $1050 - 945$ °С, соответственно. С учётом этих экспериментальных данных предполагается, что капли Fe-P расплава переменного состава находились в кислом силикатном расплаве, образованном при полном плавлении аргиллита (обр. MN-1420), а также захватывались фенокристами плагиоклаза (Рис. 4.19, г, обр. MN-1412) в температурном интервале от 1365 до 945 °С. Находки сростаний фосфидов железа и самородного железа указывают на крайне восстановительные условия, существовавшие на высокотемпературной стадии кристаллизации недосыщенных по кремнезёму и обогащенных Са расплавов мелилит-нефелиновых паралав. Источником фосфора, вероятно, были фосфаты из осадочных пород, преобразование которых в Fe-P расплав и его дальнейшая кристаллизация в виде фосфидов могли происходить при участии метана [Burs et al., 2007].

В мелилит-нефелиновых паралавах Хамарин-Хурал-Хида встречаются зональные микролиты рёнита с каймой куратита и низкотитановый куратит (X_{Mg} , $Mg/(Mg + Fe^{2+})$, 0.5 – 0.94), а в Нилгинских паралавах – преимущественно, куратит (X_{Mg} 0.03 – 0.45) (Рис. 5.16, Приложение А15). Из анализа экспериментальных данных в [Peretyazhko et al., 2017] следует, что рёнит-куратит Хамарин-Хурал-Хида кристаллизовался в восстановительных условиях при $T \sim 1100$ °С. Образование рёнита, содержащего до 5 – 6 ф. ед. Fe^{3+} , происходило в более окислительных условиях при фугитивности кислорода около QFM буфера. Куратит из мелилит-нефелиновых паралав Нилгинского комплекса также кристаллизовался при $T \sim 1100$ °С, в большом диапазоне фугитивности кислорода от IW, WM до QFM буфера (Рис. 4.17, б).

Минералы группы оливина в мелилит-нефелиновых паралавах представлены, в основном, продуктами распада твердого раствора Fe-Са оливина на Са-фаялит и кирштейнит. Обособления Са-фаялита и кирштейнита в пиропородах Монголии отличаются структурно от таковых в метеорите-ангрите [Mikouchi et al., 1995] и парабазальтах Челябинского угольного бассейна [Sokol et al., 2002], а также по составу от Fe-Са оливинов вулканического происхождения [Melluso et al., 2010; Шарыгин, 2011]. Са-фаялит и кирштейнит могли образоваться как при распаде твердого раствора оливина, так и в результате кристаллизации оливинов контрастного Fe-Са состава из мафических расплавов в локальных фрагментах матрикса паралав. В мелилит-нефелиновых паралавах Нилгинского комплекса и Хамарин-Хурал-Хида температурный диапазон кристаллизации Fe-Са оливинов согласно экспериментально определенной поверхности сольвуса составляет 1050–800 и 1000–800 °С соответственно, а в парабазальтах Челябинского угольного бассейна – от 950 до 800 °С [Sokol et al., 2002] (Рис. 5.4).

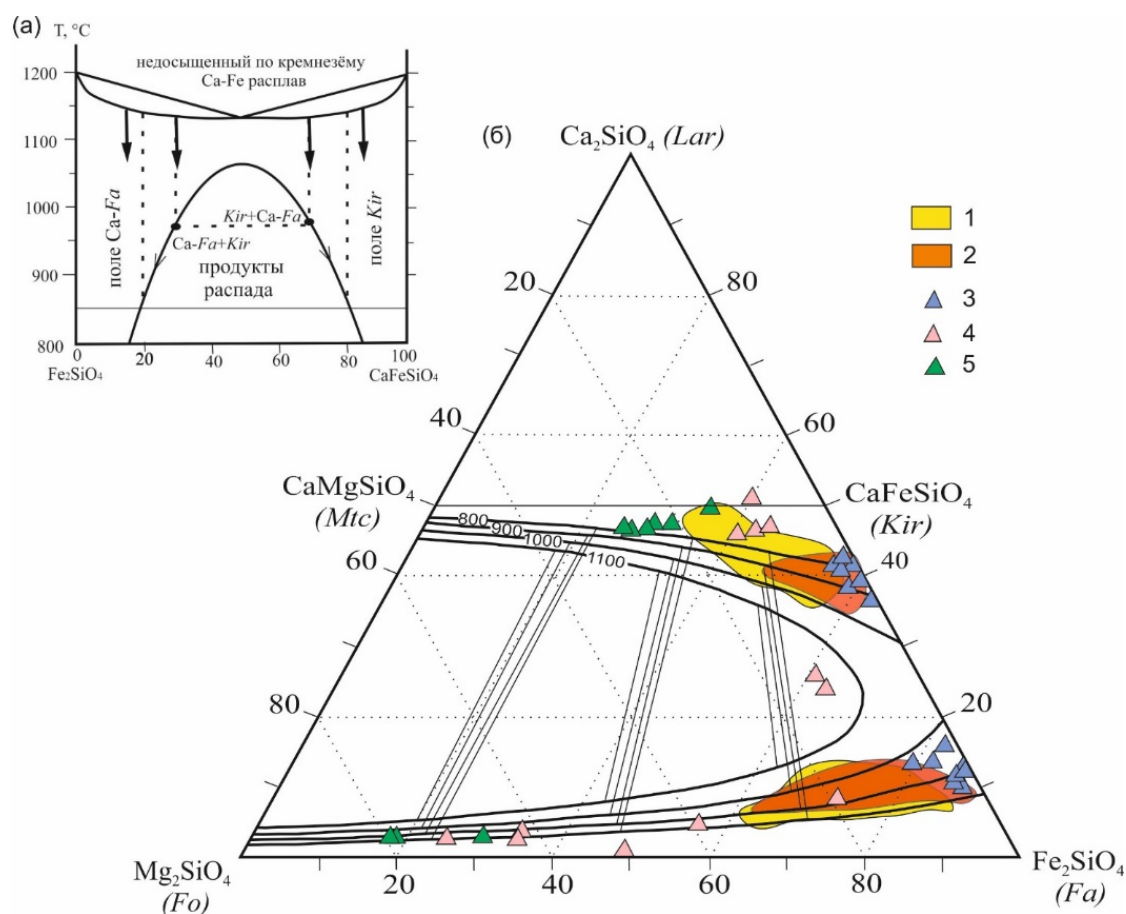


Рисунок 5.4. Схема распада твердого раствора Fe-Ca оливина (а), по [Sokol et al., 2002], поля и точки состава оливина из мелилит-нефелиновых паралав, вулканических пород и парабазальтов (б). Изотермы в области несмесимости твердого раствора оливина, составы сосуществующих фаз (тонкие линии между изотермами), по [Davindson, Mukhopadhyay, 1984].

Поля состава продуктов распада твердого раствора оливина на Ca-фаялит и кирштейнит в мелилит-нефелиновых паралавах комплекса Нилгинского (1) и Хамарин-Хурал-Хид (2). Точки состава оливинов из (3) парабазальтов Челябинского угольного бассейна, по [Sokol et al., 2002], мелилитолитов (4) вулканического комплекса Capo di Bove, по [Melluso et al., 2010] и (5) вулкана Пьян ди Челле, по [Шарыгин, 2011].

В некоторых образцах мелилит-нефелиновых паралав встречаются обособления Ca-Mg-Fe оливинов – кирштейнита и монтичеллита. Такие оливины имеют разную распространенность в породах земного и внеземного происхождения. Несколько находок кирштейнита было описано в метеоритах: хондритах [MacPherson et al., 2017], ахондритах [Mikouchi et al., 1995; Jambon et al., 2008] и железных метеоритах [Folco, Melini, 1997]. Кирштейнит иногда встречается в скарнах [Конев, Самойлов, 1974], ультраосновных вулканических [Melluso et al., 2010; Шарыгин, 2011] и щелочных вулканических породах [Andersen et al., 2012], кимберлитах [Chalapathi et al., 1996] и габбро-долеритах

[Олейников, 1995], а также может кристаллизоваться в техногенных породах, образующихся при подземных ядерных взрывах [Kahn, Smith, 1966], и в парабазальтах Челябинского угольного бассейна [Sokol et al., 2002]. Монтичеллит часто является породообразующим минералом скарнов [Синяков и др., 1961; Конев, Самойлов, 1974; Иванюк и др., 2002; Сокол и др., 2019], встречается в карбонатитах [Stoppa, Lupini, 1993; D’Orazio et al., 2007; Зайцев, Петров, 2008; Tarpe et al., 2009], кимберлитах [Abersteiner et al., 2018, 2020; Dongre, Tarpe, 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 монтичеллитом и кирштейнитом описаны в пирогенных породах «пёстрой зоны» бассейна Хатрурим [Burg et al., 1991], в терриконах Челябинского угольного бассейна [Пирогенный ..., 2005], а также в пирометаллургических шлаках [Warchulski et al., 2016].

Обособления Са-фаялита и кирштейнита в пиропородах Монголии отличаются от ориентированных выделений данных минералов (структур распада твердого раствора), описанных в метеорите-ангрите [Mikouchi et al., 1995] и парабазальтах Челябинского угольного бассейна [Sokol et al., 2002]. Fe-Са оливины паралав отличаются от таковых магматического происхождения. В мелилититовых лавах Италии [Melluso et al., 2010; Шарыгин, 2011] кирштейнит заполняет интерстиции между минералами матрикса и образует краевые зоны фенокристов оливина (Fo_{85-80}), в котором содержание минала *Caol*, как правило, не превышает 3 мол.% (Рис. 5.4, б). В паралавах Монголии и парабазальтах Челябинского угольного бассейна кирштейнит и Са-фаялит, содержащий более 6 мол.% Ca_2SiO_4 , образуют совместные сростания – вероятно, структуры распада твёрдого раствора.

Монтичеллит пирометаморфического генезиса отличается по составу от такового в магматических породах. Так, в кимберлитах и карбонатитах Са-Мг оливин содержит не более 20 мол.% минала *Kir*, а в серпентинизированных перидотитах минералы ряда монтичеллит-кирштейнит характеризуются содержанием *Kir* 40 – 60 мол.% (Рис. 5.5). В паралавах Монголии встречаются

монтichelлит и монтichelлит-кирштейнит. Такие оливины в ассоциации с геленитом, перовскитом, кальцитом, магнетитом, пирротинном и другими минералами обнаружены только в реликтах ксенолитов мергелистого известняка (Рис. 4.15, б, г) [Глушкова и др., 2023а].

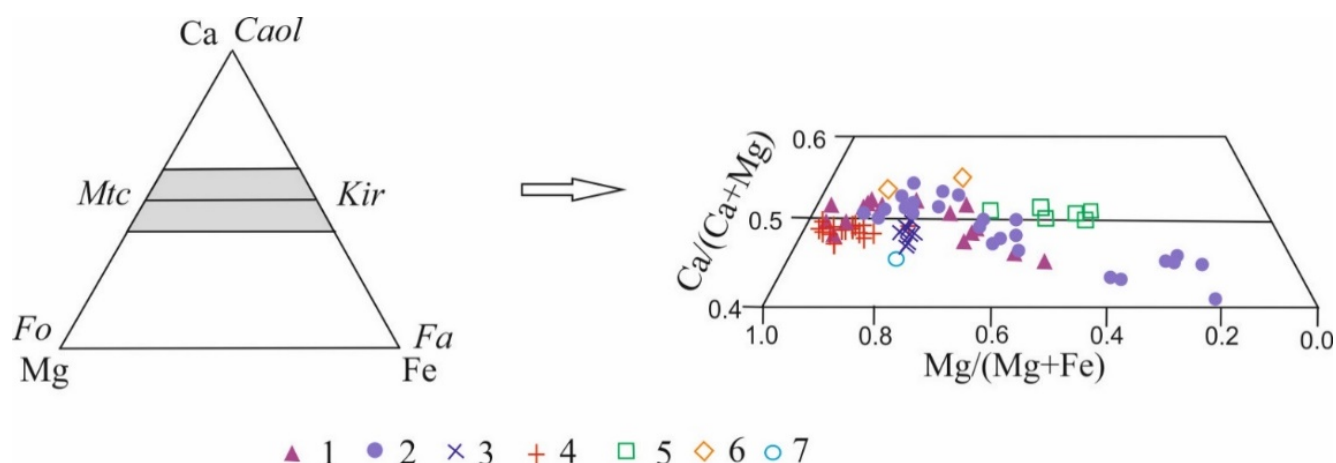


Рисунок 5.5. Фрагмент диаграммы *Caol-Fa-Fo* с составами монтichelлита и монтichelлит-кирштейнита из минеральных ассоциаций кимберлитов, карбонатитов, метаморфизованных известняков, магматических пород и шлаков, а также из реликтов ксенолитов мергелистого известняка в мелилит-нефелиновых паралавах Монголии.

1 – паралавы Монголии; 2 – обр. MN-1234-1 (Нилгинский комплекс); 3 – карбонатиты, по [Stoppa, Lupini, 1993; D’Orazio et al., 2007]; 4 – кимберлиты, по [Abersteiner et al., 2017; Donge, 2019; Korylova, 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].

На завершающей стадии кристаллизации расплава мелилит-нефелиновых паралав в интерстициях образовались минералы группы нефелина, а остаточные расплавы закалились в стёкла различного состава (Рис. 4.20, Табл. 4.15, 4.17). В паралавах Нилгинского комплекса межзерновое пространство заполнено нефелином, иногда кальсилитом, а для паралав Хамарин-Хурал-Хида характерно наличие редкого минерала – давидсмитита [Савина и др., 2020]. Ранее давидсмитит, содержащий до 3.2 мас.% СаО, описывался только в эклогитах Норвегии [Kechid et al., 2017]. В давидсмитите из паралав Хамарин-Хурал-Хида содержание СаО достигает 6 мас.% и точки его состава на диаграмме Na – K – Са□ смещаются к лисетиту $\text{CaNa}_2\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ (Рис. 4.18). Увеличение Si и Са в

формуле давидсмитита происходит за счет снижения Al, Na и возрастания доли вакансии по следующей схеме: $\text{Si}^{4+} + \text{Ca}^{2+} + \square \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{Na}^+$.

Анализ качественной петрологической модели формирования мелилит-нефелиновых паралав, описанной в [Peretyazhko et al., 2021], требует верификации методами физико-химического моделирования. Целью данного моделирования должна быть реконструкция P - T условий последовательных стадий пирогенных трансформаций карбонатно-силикатных пород, в частности, мергелистого известняка: высокотемпературного низкобарического пирогенного метаморфизма и инконгруэнтного плавления кальцита и новообразованных минералов (Al-клинопироксена, геленита и др.), при котором образуются несмешиваемые расплавы – кальцитовый и несколько силикатных различного состава (Рис. 5.3).

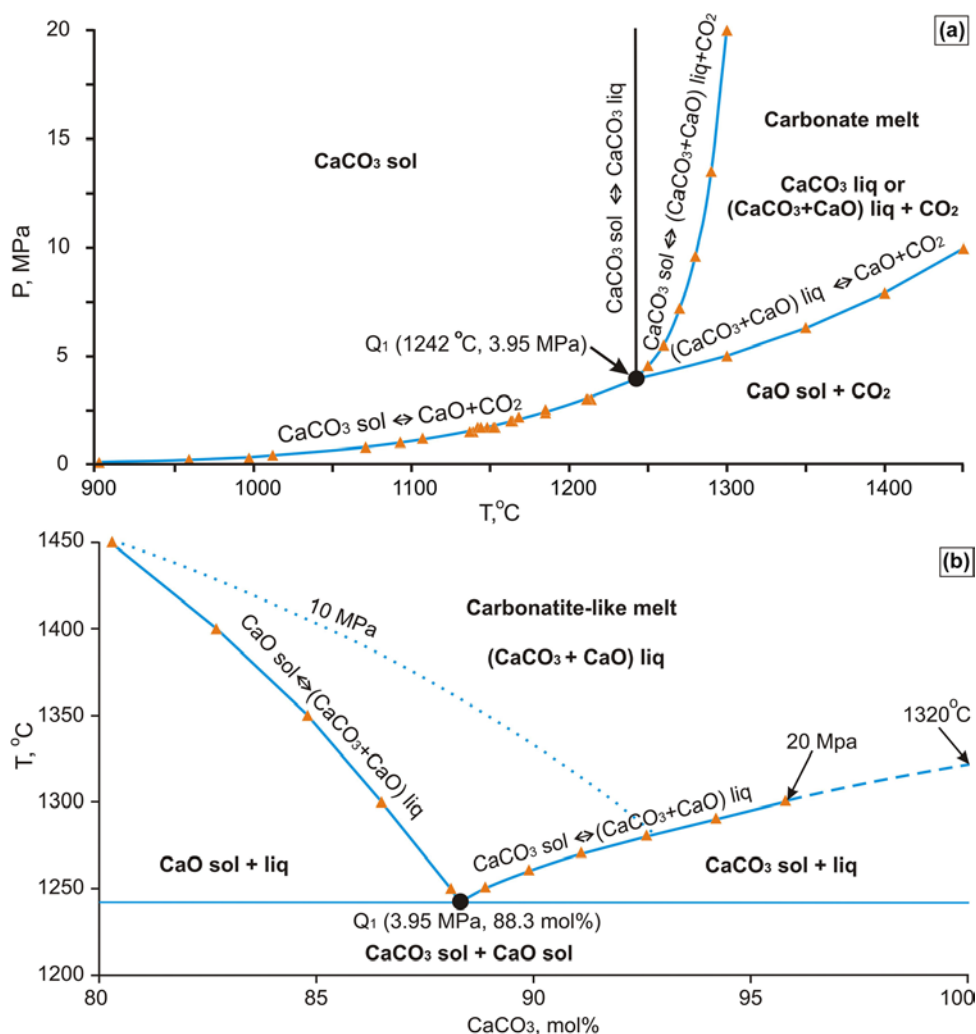


Рисунок 5.6. Низкобарическая область фазовой диаграммы CaCO_3 по экспериментальным данным [Baker, 1962] и термодинамическим расчётам, по [Kerley, 1989; Ivanov, Deutsch, 2002; Lindberg, Chartrand, 2009] в координатах P - T (a) и T -мольный состав (b), по [Peretyazhko et al., 2021].

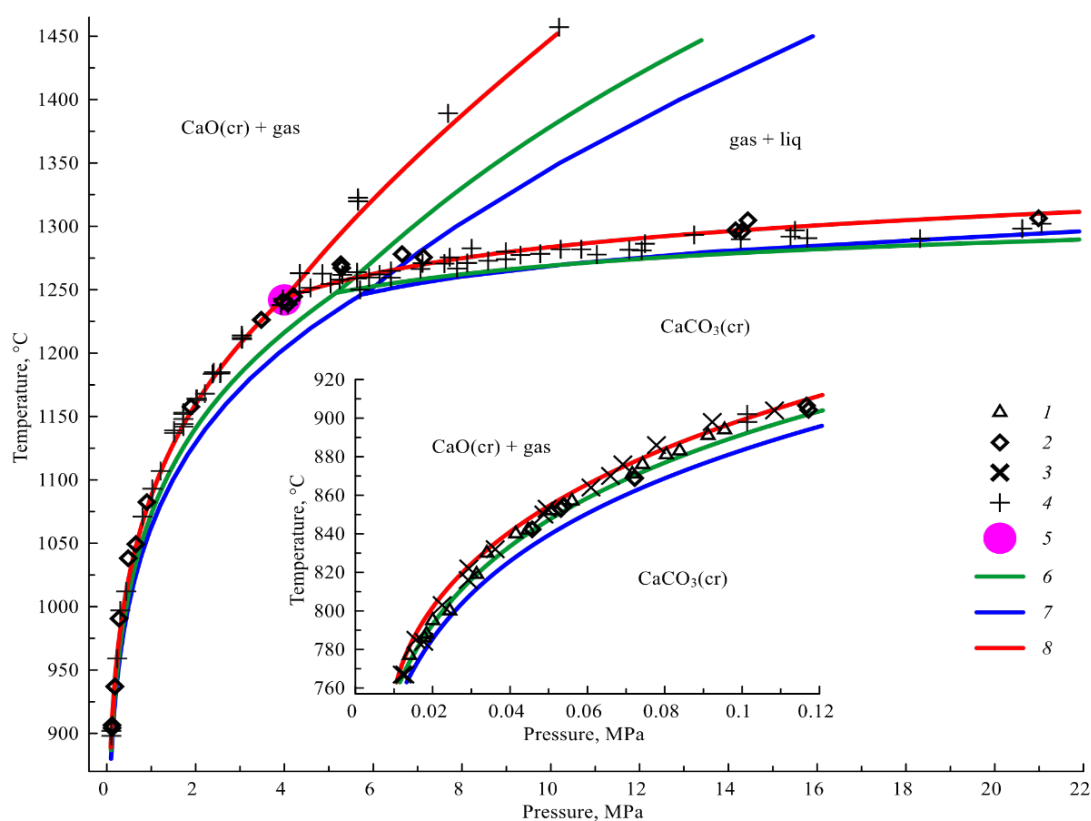


Рисунок 5.7. Низкобарическая область фазовой диаграммы CaCO_3 в координатах P – T , по [Tupitsyn et al., 2024]. 1-4 – экспериментальные данные, по [Jonston, 1910; Smith, Adams, 1923; Hill, Winter, 1956; Baker, 1962]; 5 – инвариантная точка Q_1 . 6 – Расчётные данные, по [Lindberg, Chartrand, 2009]. Результаты моделирования в программном комплексе «Селектор»: 7 – без учёта и 8 – с учётом давления.

При таком моделировании необходимо учитывать фазовые переходы кальцита в низкобарической (< 100 МПа) высокотемпературной ($> 900^\circ\text{C}$) области. На основе экспериментальных данных [Baker, 1962] была построена фазовая диаграмма кальцита для низкобарической области в координатах P – T и T – мольный состав (Рис. 5.6, а, б). По этой диаграмме в определённых P – T условиях происходит разложение кальцита с образованием CaO и CO_2 . В инвариантивной точке Q_1 (1242 ± 3 °C, 3.95 ± 0.5 МПа) в равновесии находятся CaO , CaCO_3 , CO_2 и карбонатный расплав, имеющий состав 88.3 мол.% CaCO_3 и 11.7 мол.% CaO . При температуре 1300 °C и парциальном давлении CO_2 20 МПа расплав содержит 95.8 мол.% CaCO_3 . Из термодинамических расчётов [Kerley, 1989; Ivanov, Deutsch, 2002] следует, что плавление кальцита может происходить

как конгруэнтно с образованием стехиометрического кальцитового расплава (кальцит \leftrightarrow CaCO_3 расплав), так и инконгруэнтно с образованием нестехиометрического карбонатного расплава ($\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$) (Рис. 5.6, а).

Используя программный комплекс «Селектор», были уточнены термодинамические свойства кальцита и кальцитового расплава, учитывающие влияние давления [Turpitsyn et al., 2024]. В результате моделирования была построена фазовая диаграмма кальцита в низкобарической области, хорошо воспроизводящая экспериментальные данные (Рис. 5.7). В дальнейшем, мы надеемся, это позволит моделировать намного более сложные процессы пирометаморфизма и плавления карбонатно-силикатных осадочных пород (известняков, мергелистых известняков и др.) с участием карбонатного расплава и водно-углекислотного флюида, в результате которых образуются силикатные расплавы, в т.ч. недосыщенные по кремнезему и обогащенные Са, исходные для мелилит-нефелиновых и других паралав.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории Монголии широко развиты угленосные бассейны, но при этом пирогенные изменения осадочных толщ, вызванные горением угля, обнаружены только на двух объектах – пирометаморфических комплексах Нилгинском и Хамарин-Хурал-Хид. Эти комплексы образовались в результате многократных природных древних (четвертичных) и современных угольных пожаров в осадочных толщах. Процессы пирометаморфических преобразований пород и последующая эрозия раннемеловых осадочных пород дзунбаинской свиты сформировали здесь своеобразные формы рельефа и характера местности – типичный ландшафт “горельников” и останцы, сложенные осадочными и пирогенными породами.

При подземных пожарах мощных (до 30 – 40 м, судя по особенностям рельефа северо-восточной части комплекса Хамарин-Хурал-Хид, Рис. 5.1) линзовидных пластов угля локальный нагрев вышележащей осадочной толщи в эпицентрах горения достигал 1300 – 1400 °С. Многочисленные находки оплавленных зёрен детритового кварца в паралавах и клинкерах подтверждают это заключение.

Температура термических преобразований карбонатно-силикатных осадочных пород (мергелистых известняков) превышала 1365 °С (оценка по условиям кристаллизации фосфида Fe – баррингерита в ранней зоне фенокристов основного плагиоклаза из мелилит-нефелиновых паралав). Фугитивность кислорода при формировании стекловатых клинкеров и кристаллизации расплавов паралав изменялась значительно – от ультравосстановительных до сильно окислительных значений.

Термические трансформации пелитовых пород (аргиллитов, алевролитов, алевропесчаников) и мергелистых известняков сопровождались процессами частичного плавления метаморфизованного осадочного протолита и образованием плавленых пород (клинкеров и паралав) с уникальными минерально-фазовыми ассоциациями. Породообразующие, второстепенные и

акцессорные минералы паралав (групп оливина, пироксена, мелилита, нефелина, рёнита-куратита и др.) значительно отличаются по составу и особенностям эволюции от таковых в магматических, вулканических и метаморфических породах.

Разнообразие типов пирогенных пород и состава слагающих их минералов было вызвано гетерогенным строением и вариациями состава пород осадочных толщ, локальными условиями их плавления и кристаллизации пирогенных расплавов. Полистадийное преобразование осадочных карбонатно-силикатных пород (мергелистых известняков) в процессе формирования расплавов мелилит-нефелиновых паралав происходило при повышенном парциальном давлении CO_2 без разложения кальцита. Такие условия являются уникальными и не описывались ранее на других пирометаморфических комплексах в мире.

Необходимо продолжить изучение пирометаморфических комплексов Монголии и условий образования чрезвычайно разнообразных пирогенно изменённых и в разной степени плавленых пород. Перспективным направлением дальнейших исследований также будет термодинамическое (физико-химическое) моделирование процессов пирометаморфических трансформаций пород осадочных протолитов, в частности, железистых пелитов и мергелистых известняков, с целью установления P - T условий и реконструкции процессов высокотемпературного низкобарического пирометаморфизма, вызванных природными угольными пожарами. Такое моделирование предполагает изучение процессов пирометаморфизма угленосных карбонатно-силикатных осадочных пород как в «сухой» системе, так и при участии водно-углекислотного флюида, который, согласно экспериментальным данным [Wyllie, Tuttle 1960; Персиков, Бухтияров, 2004; Durand et al., 2015] значительно влияет на P - T параметры плавления кальцита и образования карбонатного расплава в низкобарических и высокотемпературных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев А.Н., Петров С.В. Карбонатиты вулкана Олдоньи Ленгаи, Северная Танзания // Щелочной магматизм, его источники и плюмы. Иркутск: Неаполь. – 2008. С. 59-70.
2. Глушкова В.Е., Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Минералы группы оливина в мелилит-нефелиновых паралавах пирометаморфических комплексов Монголии // Зап. РМО. – 2023 а. – № 1. – С. 61-77.
3. Глушкова В.Е., Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Главные породообразующие минералы паралав пирометаморфических комплексов Монголии // Зап. РМО. – 2023 б. – № 4. С. 65-83.
4. Девятярова А.С. Кочумдекский контактовый ореол спуррит-мервинитового метаморфизма: минералогия, геохимические особенности, история становления. Автореф. дисс. ... канд. г.-м. н. Нск, 2022. – 22 с.
5. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа // Под ред. О.А. Банных, П.Б. Будберг, С.П. Алисова и др. Справочник. М.: Металлургия, 1986. 440 с.
6. Калашникова Т.В., Соловьева Л.В., Костровицкий С.И. Сравнительная характеристика состава минералов из ксенолитов кимберлитовых трубок «Обнаженная» и «Удачная» // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2015. – Т. 53. – № 4. – С. 7-20.
7. Калугин И.А., Третьяков Г.А., Бобров В.А. Железорудные базальты в горелых породах Восточного Казахстана. Новосибирск: Наука, 1991. – 80 с.
8. Карпенко В.Ю., Паутов Л.А., Мираков М.А., Сийдра О.Й., Махмадшариф С., Шодибеков М.А., Плечов П.Ю. Находка бонанциита и алакранита в возгонах природного подземного угольного пожара в урочище Кухи-Малик, Таджикистан // Новые данные о минералах. – 2021. – Т.55. – № 4. – С. 82-93.

9. Ковдор / Ред. Г.Ю. Иванюк, В.Н. Яковенчук, Я.А. Пахомовский; Минер.-хим. компания "ЕвроХим" [и др.]. Апатиты : Минералы Лапландии, 2002. 320 с.
10. Конев А.А., Самойлов В.С. Контактный метаморфизм и метасоматоз в ореоле Тажеранской щелочной интрузии. Новосибирск: Наука, 1974. – 246 с.
11. Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В. Электронно-зондовое определение состава минералов: микроанализатор или сканирующий микроскоп? // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 8. – С. 1473–1482.
12. Нигматулина Е.Н., Нигматулина Е.А. Пирогенные железные руды древних угольных пожаров Кузбасса // Зап. РМО. – 2009. – № 1. – С. 52-68.
13. Николаева А.Т. Петрология мелилитсодержащих пород вулканов Купаэлло и Колле Фаббри (Центральная Италия). Автореф. дисс. ... канд. г.-м. н. Нск, 2014. – 23 с.
14. Олейников Б.В. Кирштейнит – вероятный продукт симплектического распада раннемагматического кальцийсодержащего гиалосидерита// ДАН. 1995. – Т. 342. – № 1. – С. 80-81.
15. Поздняков Г.Г. Новые данные по геологии и полезным ископаемым Западной Сибири. – Томск: Изд-во ТГУ, 1968. – Вып. 3. – С. 64-69.
16. Пирогенный метаморфизм / Ред. Э.В. Сокол, Н.В. Максимова, Е.Н. Нигматулина, В.В. Шарыгин, В.М. Калугин. Новосибирск: СО РАН, 2005. 284 с.
17. Перетяжко И.С. CRYSTAL – прикладное программное обеспечение для минералогов, петрологов, геохимиков // Зап. ВМО. – 1996. – № 3. – С. 141-148.
18. 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.

19. Персиков Э. С., Бухтияров П.Г. Экспериментальное исследование механизмов плавления кальцита и доломита при высоких давлениях флюида // Электронный научно-информационный журнал «Вестник Отделения наук о Земле РАН». – 2004. – № 1. URL: http://www.scgis.ru/russian/cp1251/h_dgggms/1-2004/informbul-1/term-13.pdf
20. Покровский П.В. Нашатырь из месторождения бурых углей Хамарин-Хурал-Хид в Монгольской Народной Республике // Зап. ВМО. – 1949. – № 3. – С. 38-45.
21. Пушкарев Е.В., Бирюзова А.П., Гуляева Т.Я. Фассаит из метаморфических пород Хабаровинского габбро-ультрамафитового массива на Южном Урале // Вест. УрО. РМО. – 2004. – № 3. – С. 89-97.
22. Покровский П.В. Нашатырь из месторождения бурых углей Хамарин-Хурал-Хид в Монгольской Народной Республике // Зап. ВМО. – 1949. – № 3. – С. 38-45.
23. Савина Е.А., Перетяжко И.С., Хромова Е.А., Глушкова В.Е. Плавленые породы (клинкеры и паралавы) пирометаморфического комплекса Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия: минералогия, геохимия, процессы образования // Петрология. – 2020. – Т. 28. – № 5. – С. 482-510.
24. Савина Е.А., Перетяжко И.С. Условия и процессы формирования кристобалитового клинкера, железистых и мелилит-нефелиновых паралав в пирометаморфическом комплексе Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64. – № 12. – С. 1690-1715.
25. Синяков В.И., Синякова Н.М. Монтичеллитовые скарны Горной Шории // Зап. ВМО. – 1961. – № 6. – С. 720-727.
26. Сокол Э.В., Новикова С.А., Алексеев Д.В., Травин А.В. Природные угольные пожары Кузбасса: геологические предпосылки, климатические обстановки, возраст // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 9. – С. 1319-1343.
27. Сокол Э.В., Полянский О.П., Семенов А.Н., Ревердатто В.В., Кох С.Н., Девятярова А.С., Колобов 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.
28. Чесноков Б.В., Щербакова Е.П., Нишанбаев Т.П. Минералы горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. Миасс: ИМин УрО РАН, 2008. – 139 с.
29. Шарыгин В.В. Магнезиальный кирштейнит в мелилитолитах вулкана Пьянди Челле, Италия http://alkaline2011.web.ru/2012/abstracts/SharyginV_rus.htm
30. Шарыгин В.В., Сокол Э.В., Белаковский Д.И. Фаялит-секанинаитовые паралавы Раватского угольного пожара (Центральный Таджикистан) // Геология и геофизика. – 2009. – № 8. – С. 910-932.
31. Шипулин Ф.Н. Отчёт о геолого-разведочных работах на Хамарин-Хурал-Хидском угольном месторождении в 1940 г. Рукописные фонды Восточной экспедиции, Улан-Батор, 1940. – 23 с.
32. Agashev A.M., Pokhilenko L.N., Pokhilenko N.P., Shchukina E.V. Geochemistry of eclogite xenoliths from the Udachnaya Kimberlite Pipe. // Lithos. – 2018. – V. 314–315. – P. 187-200.
33. 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. – V. 478. – P. 76-88.
34. 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. – V. 372-373: 105690.
35. 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. – V. 152. – P. 105-121.
36. Baker E.H. The Calcium Oxide-Carbon Dioxide System in the Pressure Range 1–300 Atmospheres // J. Chem. Soc. – 1962. – P. 464 – 468.

37. Barin I., Knacke O., Kubaschewski O. Thermochemical Properties of Inorganic Substances, Suppl. Springer-Verlag, Berlin, 1977. – 861 p.
38. Bendor Y.K., Gross S., Heller L. High-temperature minerals in non-metamorphosed sediments in Israel // *Nature*. – 1963. – V. 199. – P. 478-479.
39. Bendor Y.K., Kastner M., Perlman I., Yellin L. Combustion metamorphism of bituminous sediments and the formation of melts of granitic and sedimentary composition // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1981. – V. 45. – P. 2229-2255.
40. Bendor Y.K. Combustion metamorphic glasses // *J. Non-Cryst. Solids*. – 1984. – V. 67. – P. 433-448.
41. Berman R., Brown T. Heat capacity of minerals in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$: representation, estimation, and high temperature extrapolation // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1985. – V. 89. – P. 168-183.
42. Blander M., Fuchs I. Calcium–aluminium-rich inclusions in the Allende meteorite: evidence for a liquid origin // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1975. – V. 39. – P. 1605-1619.
43. 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 // *Can. Miner.* – 2007. – V. 45. – P. 1443-1469.
44. Britvin S.N., Murashko M.N., Vapnik Y. et al. Earth's Phosphides in Levant and insights into the source of Archean prebiotic phosphorus // *Sci. Reports*. – 2015. – V. 5. – N 8355. – P. 1-5.
45. Britvin S.N., Murashko M.N., Vapnik E., Polekhovskya Yu. S., Krivovichev S. V. Barringerite Fe_2P from pyrometamorphic rocks of the Hatrurim Formation, Israel // *Miner. Miner. Assembl.* – 2017. – V. 59. – N 7. – P. 619-625.
46. Britvin S.N., Murashko M.N., Vapnik Ye., Polekhovskiy Yu.S., Krivovichev S.V., Vereshchagin O. S., Vlasenko N. S., Shilovskikh V. V., Zaitsev A. N. Zuktamrurite, FeP_2 , a new mineral, the phosphide analogue of löllingite, FeAs_2 // *Phys. Chem. Mineral.* – 2019a. – V. 46. – P. 361-369.

47. Britvin S.N., Vapnik Y., Polekhovsky Y.S., Krivovichev S.V., Krzhizhanovskaya M. G., Gorelova L.A. Vereshchagin O. S., Shilovskikh V.V., Zaitsev A.N. Murashkoite, FeP, a new terrestrial phosphide from pyrometamorphic rocks of the Hatrurim Formation, South Levant // *Mineral. Petrol.* – 2019b. – V. 113. – P. 237-248.
48. Britvin S.N., Murashko M.N., Krzhizhanovskaya M.G., Vapnik Y., Vlasenko N.S., Vereshchagin O.S., Pankin D.V., Zaitsev A.N., Zolotarev A.A. Yakubovichite, $\text{CaNi}_2\text{Fe}^{3+}(\text{PO}_4)_3$, a new nickel phosphate mineral of non-meteoritic origin. // *Amer. Miner.* – 2023. – V. 108. – N 11. – P. 2142-2150.
49. Burg A., Stravinsky A., Bartov Y., Kolodny Y. Geology of the Hatrurim formation («Mottled Zone») in the Hatrurim basin. // *Isr. J. Earth Sci.* – 1991. – V. 40. – P. 107-124.
50. Burg A., Starinsky A., Bartov Y., Kolodny Y. Hatrurim – 2000: «Mottled Zone» revisited forty years later // *Isr. J. Earth Sci.* – 1999. – V. 48. – P. 209-223.
51. Burns S., Hargreaves J.S.J., Hunter S.M. On the use methane as a reductant in the synthesis of transition metal phosphides // *Catal. Communicat.* – 2007. – V. 8. – P. 931-935.
52. 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. – V. 60. – P. 513-516.
53. Coal and Peat Fires: a global perspective // Eds. G.B. Stracher, A. Prakash, E.V. Sokol Case Studies and Coal Fires. Amsterdam: Elsevier, 2015. – V. 3. – 786 p.
54. Cosca M., Peacor D. Chemistry and structure of esseneite, $(\text{CaFe}^{3+}\text{AlSiO}_6)$. A new pyroxene produced by pyrometamorphism // *Amer. Mineral.* – 1987. – V. 72. – P. 148-156.
55. Cosca M.A., Rouse R.R., Essene E.J. Dorrite $[\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{3+}_4)(\text{Al}_4\text{Si}_2)\text{O}_{20}]$, a new member of the aenigmatite group from a pyrometamorphic melt-rock // *Amer. Mineral.* – 1988. – V.73. – P. 1440-1448.

56. Cosca M.A., Essene E.J., Geissman J.G. Simmons W.B., Coates D.A. Pyrometamorphic rocks associated with naturally burned coal beds, Powder River Basin, Wyoming // *Amer. Mineral.* – 1989. – V. 74. – P.85-100.
57. Cundari A. Petrology of clinopyroxenite ejecta from Somma–Vesuvius and their genetic implications. // *Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt.* – 1982. – V. 30. –P. 17-35.
58. Davidson P. M., Mukhopadhyay D.K. Ca-Fe-Mg olivines: Phase relations and a solution model // *Contrib. Miner. Petrol.* – 1984. – V. 86. – P. 256-263.
59. 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. // *Lithos.* – 2019. – V. 338-339. – P. 155-173.
60. Durand C., Baumgartner L. P., Marquer D. Low melting temperature for calcite at 1000 bars on the join CaCO₃–H₂O–some geological implications // *Terra Nova.* – 2015. – V. 27. – P. 364-369
61. D’Orazio M., Innocenti F., Tonarini S., Doglioni C. Carbonatites in a subduction system: The Pleistocene alvikites from Mt. Vulture (southern Italy) // *Lithos.* – 2007. – V. 98. – P. 313-334.
62. Durand C., Baumgartner L.P., Marquer D. Low melting temperature for calcite at 1000 bars on the join CaCO₃ – H₂O – some geological implications // *Terra Nova.* – 2015. – V. 27. – P. 364-369.
63. 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. – V. 80. – P. 87-104.
64. 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. Mineral.* – 1987. – V. 72. –P.137-147.
65. Folco L., Mellini M. Crystal chemistry of meteoritic kirschsteinite // *Eur. J. Miner.* – 1997. – V. 9. – P. 969-973.

66. Gnos E., Armbruster T., Nyfeler D. Kanoite, donpeacorite and tirodite: Mn-Mg-silicates from a manganiferous quartzite in the United Arab Emirates. // *Eur. J. Mineral.* – 1996. – V. 8. – P. 251-262.
67. Grapes R., Zhang K., Peng Z. Paralava and clinker products of coal combustion, Yellow River, Shanxi Province, China. // *Lithos.* – 2009. – V. 113. – P. 831-843.
68. Grapes R. *Pyrometamorphism*. Berlin: Springer, 2011. 2nd ed. 377 p.
69. Grapes R., Korzhova S., Sokol E., Seryotkin Yu. Paragenesis of unusual Fe-cordierite (sekaninaite)-bearing paralava and clinker from the Kuznetsk coal basin, Siberia, Russia // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 2011. – V. 162. – P. 253-273.
70. Gross S. The mineralogy of the Hatrurim Formation, Israel // *Geol. Surv. Israel Bull.* – 1977. – V.70. – P.180.
71. Haefeker U., Kaindl R., Tropper P. Semi-quantitative determination of the Fe/Mg ratio in synthetic cordierite using Raman spectroscopy// *Amer. Mineral.* – 2012. – V. 97. – P. 1662-1669.
72. Hazen R., Finger, I. Crystal structure and compositional variation of Angra Dos Reis fassaite // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1977. – V. 35. – P. 357-362.
73. Heffern E.L., Reiners P.W., Naeser C.W., Coates D.A. Geochronology of clinker and implications for evolution of the Powder River Basin landscape, Wyoming and Montana// *Geol. Soc. Amer. Rev. Eng. Geol.* – 2007. – P. 155-175.
74. Hill K. J., Winter E. R. S. Thermal Dissociation of Calcium Carbonate // *J. Phys. Chem.* – 1956. – N 60. – P. 1361-1362.
75. 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. – V .43. – N 11. – P. 1783-1795.
76. Jonston J. The Thermal Dissociation of Calcium Carbonate // *J. Am. Chem. Soc.* –N 32. – 1910. – P. 938-946.
77. Kahn J.S., Smith D.K. Mineralogical investigations in the debris of the Gnome event near Carlsbad, New Mexico // *Amer. Miner.* – 1966. – V. 51. – P. 1192-1199.

78. Kechid S., Parodi G.C., Pont S., Oberti R. Davidsmithite, $(\text{Ca}\square)_2\text{Na}_6\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}$: a new, Ca-bearing nepheline-group mineral from the Western Gneiss Region, Norway // *Eur. J. Mineral.* – 2017. – V. 29. – P. 1005-1013.
79. Kerley G. I. Equations of state for calcite minerals. I. Theoretical model for dry calcium carbonate // *High Press Res.* – 1989. – V. 2. – P. 29-47.
80. 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 // *Am. Miner.* – 2009. – V. 94. – P. 1479-1482.
81. 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. – V. 83. – N 8. – P. 537-542.
82. Kopylova M.G., Ma. F., Tso E. Constraining carbonation freezing and petrography of the carbonated cratonic mantle with natural samples // *Lithos.* 2021. – V. 388 – 389: 106045.
83. 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-Sévérac, France / In: *Coal and Peat Fires. A Global Perspective.* Amsterdam: Elsevier. – 2018. – V. 5. – P. 241-300.
84. Krzątała A., Krüger B., Galuskina I., Vapnik Y., 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. – V.107 – N1. – P. 138-146.
85. 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. – V. 208: 103256.
86. Lindberg D., Chartrand P. Thermodynamic evaluation and optimization of the (Ca + C + O + S) system // *J. Chem. Thermodyn.* – 2009. – V.41. – P. 1111–1124.

87. Ma C., Rossman R. Grossmanite, $\text{CaTi}^{3+}\text{AlSiO}_6$, a new pyroxene from the Allende meteorite // *Amer. Miner.* – 2009. – V. 94. – P. 1491-1494.
88. 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. – V. 201. – P. 260-274.
89. McDonough W.E., Sun S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* – 1995. – V. 120. – P. 223-253.
90. 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. // *Am. Miner.* – 2003. – V. 88. – P. 1287-1299.
91. Melluso L., Conticelli S., de' Gennaro R. Kirschsteinite in the Capo di Bove melilite leucitite lava (cecilite), Alban Hills, Italy // *Miner. Mag.* – 2010. – V. 74. P. 887-902.
92. 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. – V. 80. – P. 585-592.
93. Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes. // *Canad. Miner.* – 1989. – V. 27. – P. 143-156.
94. Nagata J. Magnessioferrite-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. – V. 77. – P. 23-31.
95. Novikova S., Sokol E., Khvorov P. Multiple combustion metamorphic events in the Goose Lake Coal Basin, Transbaikalia, Russia: First dating results // *Quat. Geoch.* – 2016. – V. 36. – P. 38-54.
96. Nozaka T. Fe-monticellite in serpentinites from the Happo ultramafic complex // *Lithos.* – 2020. – V. 374-375: 105686.
97. Owens B. High-temperature contact metamorphism of calc-silicate xenoliths in the Kiglapait Intrusion, Labrador // *Am. Miner.* – 2000. – V. 85. – P. 1595-1605.

98. Pascal M.-L., Katona I., Fonteilles M., Verkaeren J. Relics of high-temperature clinopyroxene on the join Di-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. – V. 43. – P. 857-881.
99. 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. – V. 81. – N 4. – P. 949-974.
100. 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. – V. 176:38.
101. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Melting processes of pelitic rocks in combustion metamorphic complexes of Mongolia: mineral chemistry, Raman spectroscopy, formation conditions of mullite, silicate spinel, silica polymorphs, and cordierite-group minerals. // *Geosci.* – 2023. – V. 13:377.
102. Sahama Th. G., Hytönen K. Kirschsteinite, a natural analogue of synthetic iron monticellite, from the Belgian Congo // *Miner. Mag.* – 1957. – V. 31. – P. 698-699.
103. 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. – V. 49. – N 1. – P.1-15.
104. Shi Z., Chen B., Wang Y., Hou M., Jin X., Song H., Wang X. A linkage between uranium mineralization and high diagenetic temperature caused by coal self-ignition in the southern Yili Basin, northwestern China // *Ore Geol. Rev.* – 2020. – V. 121: 103443. Smith F.H., Adams L.H. The system calcium oxide–carbon dioxide // *J. Am. Chem. Soc.* – 1923. – N 45. – P. 1167–1184.

105. 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. – V. 14. – P. 795-807.
106. Sokol E., Seryotkin Y., Kokh S., Vapnik Y, Nigmatulina E., Goryainov S., Belogub E., Sharygin V. Flamite, $(Ca,Na,K)_2(Si,P)O_4$, a new mineral from ultrahigh-temperature combustion metamorphic rocks, Hatrurim Basin, Negev Desert, Israel // *Miner. Mag.* – 2015. – V. 79. – Is. 3. – P. 583-596.
107. Stoppa F., Lupini L. Mineralogy and petrology of the Polino monticellite calicocarbonatite (Cental Italy) // *Miner. Petrol.* – 1993. – V. 49. – P. 213-231.
108. Stoppa F., Sharygin, V. V. Melilitolite intrusion and pelite digestion by high temperature kamafugitic magma at Colle Fabbri, Spoleto, Italy // *Lithos.* – 2009. – V. 112. – P. 306-320.
109. Tappe S., Steenfelt A., Heaman L.M., Simonetti A. The newly discovered Jurassic Tikiussaqa carbonatite-aillikite occurrence, West Greenland, and some remarks on carbonatite-kimberlite relationships. // *Lithos.* – 2009. – V. 112S. – P. 385-399.
110. Tupitsyn A.A., Yas'ko S.V., Bychinsky V.A., Peretyazhko I.S., Glushkova V.E. Thermodynamic assessment of the phase diagrams of calcite and CaO-CaCO₃ system // *Materialia* (направлена в редакцию журнала).
111. Warchulski R., Gawęda A., Janeczek J., Kądziołka-Gaweł M. Mineralogy and origin of coarse-grained segregations in the pyrometallurgical Zn-Pb slags from Katowice-Wielnowiec (Poland) // *Miner. Petrol.* – 2016. – V.110 – P. 681-692.
112. Wiedenmann D., Zaitsev A.N., Britvin S.N., Krivovichev S.V., Keller J. Alumoäkermanite, $(Ca,Na)_2(Al,Mg,Fe^{2+})(Si_2O_7)$, a new mineral from the active carbonatite-nepheline-phonolite volcano Oldoinyo Lengai, northern Tanzania // *Mineral. Mag.* – 2009. – V. 73. – N 3. – P. 373-384.

113. Wolf K.-H., Bruining H. Modelling the interaction between underground coal fires and their roof rocks // *Fuel*. – 2007. – V. 86. – P. 2761-2777.
114. Wyllie P.J., Tuttle O.F. The system $\text{CaO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ and the origin of carbonatites // *J. Petrol.* – 1960. – P. 1-46.
115. Yuan S., Sun Q., Geng J., Wang S., Xue S., Ding X. Distribution pattern and geological evolution of combustion metamorphic rocks in the northeast margin of Ordos Basin // *Env. Ear. Sci.* – 2023. – V. 82: 497.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1. Геохимическая характеристика терригенных пород, пирогенно измененных аргиллитов и клинкеров пирометаморфических комплексов

Компоненты	Хамарин-Хурал-Хид								Нилгинский комплекс					
	1424	1418	1422	1364	1401	1402	1408	1415	1278	1125	1188	1233	1268	1273
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	81.31	63.25	68.95	75.00	69.66	69.33	67.71	68.98	63.96	66.29	64.08	64.34	61.05	60.36
TiO ₂	0.25	0.92	1.43	0.95	0.81	0.86	1.03	0.92	1.10	1.05	1.02	1.03	1.29	1.16
Al ₂ O ₃	9.38	17.48	23.10	13.41	15.56	15.40	17.81	14.17	20.11	19.65	18.59	18.81	23.43	22.96
Fe ₂ O ₃	0.98	4.27	0.82	3.36	0.11	0.38	1.65	3.19	4.24	0.48	0.22	0.56	3.24	4.46
FeO	0.45	0.16	0.44	0.35	3.47	3.16	3.12	0.18	1.26	4.13	4.53	3.66	4.49	3.95
MnO	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.06	0.06	0.06	0.08	0.04	0.07
MgO	0.36	0.94	0.70	0.73	1.03	1.04	1.24	0.87	1.65	1.45	1.49	1.45	1.81	2.48
CaO	1.11	0.87	1.64	0.64	0.63	0.76	0.65	2.27	1.24	0.97	1.61	1.27	1.80	2.79
Na ₂ O	2.17	2.16	1.42	1.59	2.47	2.55	1.70	1.67	1.98	1.59	2.33	2.75	0.80	0.21
K ₂ O	3.28	2.16	0.56	2.03	2.83	2.56	2.08	2.14	3.17	3.22	3.26	3.37	1.39	1.38
P ₂ O ₅	0.06	0.07	0.11	0.07	0.08	0.09	0.05	0.07	0.20	0.15	0.15	0.17	0.12	0.08
CO ₂	0.13	0.07	0.43	0.13	<0.01	0.06	<0.01	1.18	1.04	0.17	1.76	1.54	1.10	0.50
H ₂ O ⁺	1.27	4.66	1.37	1.07	1.81	1.87	1.80	2.51	0.28	0.53	0.37	0.26	0.32	0.22
H ₂ O ⁻	0.17	2.43	0.19	0.24	0.29	0.22	0.17	0.67	0.38	0.20	0.28	0.09	0.09	0.09
Собщ	<0.10	0.11	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10		<0.02				
Сумма	100.97	99.56	101.17	99.60	98.77	98.31	99.05	98.83	100.67	99.96	99.80	99.40	100.97	100.71
Li	20	83	71	26	23	27	32	20	72.8	101	74.8	69	50.8	36.51
Be	1.6	2.8	3.4	2.0	2.1	2.1	2.6	2.4	3.31	3.44	3.3	4.08	2.59	2.69
Rb	131	107	33	98	107	104	112	112	138	187	135	146	62.4	90
Cs	3.4	8.9	8.5	7.0	7.5	7.5	8.7	8.7	19	23.1	17.1	17.8	8.8	7.45
Ba	713	454	179	377	469	492	440	440	1024	644	1022	955	266	251
Sr	194	319	313	142	317	262	316	316	194	224	211	197	297	442
Zr	35	74	87	64	96	109	85	85	118	139	119	148	194	233
Hf	0.91	2.1	2.3	1.9	2.8	3.1	2.2	2.2	3.19	3.68	3.32	4.15	5.36	6.28
Ta	0.45	1.1	2.1	0.7	1.1	1.2	1.1	1.1	1.59	1.60	1.76	1.91	1.47	1.26
Nb	5.2	13	25	10	14	15	15	15	18.6	20.1	20.2	22.4	19.4	17.8
Ni	7.9	33	22	23	23	18	19	19	18.6	19.7	23	16.5	60.9	111.0
Co	4.8	8.4	3.2	18	14	12	9.4	9.4	13.8	11.6	13.7	10.9	10.3	23.6

Окончание таблицы А1

Cr	17	56	66	51	77	71	58	58	41.2	41.7	36	38.4	131	132
V	26	196	75	94	91	88	105	105	89.5	86.7	69.6	80.3	142	185
Ga	11	20	39	15	19	19	18	18	26.6	28.9	23.6	25.4	26.8	30.3
Ge	1.4	15	0.56	0.24	1	0.49	1.5	1.5	0.7	1.56	3.15	1.93	0.69	1.29
Sc	3	15	11	11	11	12	12	12	12.2	12.5	10	11.4	20.2	22.3
Cu	11	34	34	31	32	30	30	30	41.9	31.3	31.4	30.6	87.1	70.6
Zn	19	88	74	35	80	82	77	77	162	175	122	127	60.1	97.9
Mo	0.93	4.7	1.9	0.87	1.3	0.94	0.86	0.86	2.75	1.93	1.34	1.22	2	2.84
Sn	98	2.6	2.4	1.2	1.4	0.73	2.4	2.4	1.81	6.44	8.88	6.99	1.05	1.23
Sb	0.5	0.92	0.7	0.89	1.5	0.97	1.8	1.8	0.62	1.22	1.46	1.09	0.44	0.87
W	0.75	2	3.7	1.5	1.8	1.7	2.7	2.7	9.64	8.7	11.3	10.54	6.78	3.69
Tl	0.54	0.49	1.2	0.81	0.53	0.64	0.67	0.67	0.77	1.07	0.81	0.79	0.38	0.42
Pb	17	16	27	5.7	16	14	32	32	8.72	28.5	22.2	22.1	4.69	3.62
Th	4.4	8.2	13	10	10	10	10	10	20.4	20.5	17.7	20.4	18.5	14.6
U	4.4	8.2	13	1.9	2.1	10	10	10	6.61	10.84	5.45	4.75	4.51	2.99
Y	8.6	11	16	17	18	20	18	18	29.4	31.7	26.2	31.2	27.5	30.5
La	15	23	32	33	31	33	35	35	58	56.4	40.4	51.2	53.4	51.3
Ce	29	50	65	69	66	70	91	91	116	119	83	102	115	111
Pr	3.5	5.6	7.3	7.8	7.7	8.1	9.2	9.2	14.5	13.3	10.3	12.9	14.1	13.4
Nd	13	21	27	29	30	32	38	38	54.9	52.6	38.6	48.1	52.6	50.9
Sm	2.5	3.9	5	5.6	5.8	6.3	8	8	10.8	10	7.7	9.7	10.2	9.8
Eu	0.61	0.76	0.87	1.1	1.2	1.3	1.6	1.6	1.81	1.48	1.34	1.6	1.9	2.03
Gd	2.2	3.2	4	4.6	5.1	5.4	6.8	6.8	10.6	9.58	7.43	9.3	9.81	9.7
Tb	0.3	0.43	0.53	0.64	0.71	0.77	0.92	0.92	1.33	1.07	1.01	1.25	1.26	1.27
Dy	1.7	2.2	2.8	3.6	3.8	4.2	4.5	4.5	6.34	6.36	5.05	6.18	5.99	6.04
Ho	0.32	0.43	0.55	0.65	0.70	0.77	0.77	0.77	1.14	1.15	0.97	1.18	1.1	1.16
Er	0.9	1.2	1.5	1.8	1.9	2.2	2	2	2.94	3.11	2.7	3.24	3.04	3.25
Tm	0.13	0.19	0.22	0.25	0.28	0.31	0.27	0.27	0.39	0.43	0.37	0.46	0.42	0.47
Yb	0.83	1.3	1.5	1.6	1.8	2	1.7	1.7	2.49	2.83	2.37	2.88	2.66	3.01
Lu	0.13	0.18	0.21	0.24	0.25	0.29	0.23	0.23	0.35	0.4	0.35	0.43	0.4	0.46

Здесь и далее номера образцов имеют префикс «MN-». Концентрации оксидов – мас.%. примесных элементов – ppm. Прочерк – ниже предела обнаружения ICP-MS анализа.

1 – 8 породы комплекса Хамарин-Хурал-Хид: 1 – алевропесчаник; 2 – аргиллит; 3 – пирогенно изменённый аргиллит; 4 – 8 – клинкер. 9 – 14 – породы Нилгинского комплекса: 9 – пирогенно изменённый аргиллит; 10 – 12 – клинкер на останцах; 13, 14 – пирогенно изменённый аргиллит и клинкер вблизи карьера Тугруг.

Таблица А2. Геохимическая характеристика железистых пирогенных пород и паралав комплекса Хамарин-Хурал-Хид

Компоненты	1363	1368	1370	1369	1416	1423	1367	1407	1410	1411	1412	1413	1419	1420	1425
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	56.04	54.60	39.17	42.89	27.30	16.31	42.18	45.06	45.37	39.72	42.75	43.63	39.37	41.18	43.35
TiO ₂	1.02	0.63	0.52	0.51	0.44	0.34	0.71	0.92	0.66	0.77	0.75	0.77	0.83	0.79	0.79
Al ₂ O ₃	18.20	15.04	11.97	8.44	8.35	9.07	20.62	17.16	18.30	20.76	20.21	17.50	19.30	19.85	21.11
Fe ₂ O ₃	3.88	5.02	18.99	29.96	51.59	0.84	0.93	0.49	0.08	4.07	0.68	1.30	2.60	<0.01	1.19
FeO	13.65	16.16	19.58	8.26	-	0.44	3.63	3.75	3.35	2.85	3.45	4.31	4.35	2.21	4.06
MnO	0.40	1.05	1.40	0.48	5.19	0.10	0.26	0.22	0.21	0.23	0.29	0.29	0.32	0.19	0.18
MgO	1.37	1.25	0.92	0.68	0.85	1.94	3.74	5.26	3.49	3.89	4.35	4.09	3.73	4.16	3.55
CaO	1.27	1.75	2.80	3.78	2.71	39.94	19.15	19.13	19.01	19.18	18.56	19.51	20.37	23.51	17.49
Na ₂ O	0.34	0.48	0.37	1.20	1.00	2.62	5.80	5.18	4.74	6.45	5.50	5.17	5.48	4.45	5.69
K ₂ O	1.45	1.75	0.94	1.23	1.15	0.33	0.72	0.32	0.62	0.58	0.54	0.57	0.36	0.27	0.63
P ₂ O ₅	0.23	0.35	1.01	0.93	0.85	0.23	0.17	0.80	0.64	0.17	0.40	0.30	1.28	0.93	0.23
CO ₂						26.16	0.45	0.67	1.94	0.37	0.90	0.68	0.36	1.13	0.57
H ₂ O ⁺						1.50	0.51	0.57	0.40	0.16	0.37	0.45	0.20	0.26	0.60
H ₂ O ⁻						0.45	0.20	0.27	0.25	0.12	0.29	0.21	0.13	0.25	0.21
ППП	1.64	1.39	1.79	1.19	0.85										
Собщ						0.17	0.14	0.19	0.17	<0.01	0.14	0.13	0.12	0.39	0.10
Сумма	99.62	99.08	99.10	99.55	100.28	100.46	99.21	99.98	99.22	99.31	99.18	98.91	98.81	99.57	99.75
Li	14	9	8	He опр.	29	24	48	75	56	34	68	56	103	109	54
Be	3.3	3.2	2.9		4.0	2.6	4.2	5.4	4.0	3.3	4.2	3.8	4.3	4.8	4.6
Rb	138	116	59		70	20	38	13	25	25	21	25	23	16	37
Cs	14.0	9.6	5.3		5.4	2.4	3.3	1.3	1.7	2.7	2.5	2.0	3.2	1.9	3.7
Ba	663	855	1308		572	255	1368	3702	3144	2125	2152	2695	4689	2623	2745
Sr	491	462	614		312	1505	2991	3950	3766	2800	3475	3599	5081	5538	3214
Zr	221	145	174		66	99	207	239	201	196	231	231	224	222	250
Hf	5.6	3.8	4.7		1.5	2.6	5.6	6.0	5.2	5.2	6.1	6.1	5.9	5.9	6.6
Ta	1.2	0.9	0.7		0.7	0.6	1.2	1.6	1.1	1.1	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4
Nb	20	14	11		8.5	8	16	20	15	15	17	18	19	17	19
Ni	56	40	40		33	33	31	14	19	42	18	22	30	7.2	26
Co	26	25	23		50	11	16	9	9.4	25	9.9	12	15	3.6	16
Cr	78	78	26		42	43	88	82	65	63	65	71	84	54	86
V	165	150	66		112	74	160	99	103	120	122	116	114	100	152
Ga	24	20	19		12	6	27	18	18	52	24	22	26	19	30
Ge	1.0	1.6	1.3		0.9	0.5	1.3	0.9	2.0	0.4	1.5	0.7	0.8	0.3	1.1

Окончание таблицы А2

Sc	20	15	13	14	12	24	23	19	19	22	19	20	21	25
Cu	23	22	27	27	56	62	20	23	62	31	28	50	11	42
Zn	52	94	83	105	18	15	18	13	16	13	16	22	10	20
Mo	0.6	1.2	0.2	2.2	1.1	3.6	4.5	3.5	4	3.1	3	3.2	1	3.5
Sn	2	3	3	2	0.17	0.86	0.28	1.2	0.33	0.31	0.42	0.41	0.1	0.6
Sb	1.0	1.4	0.7	0.9	0.24	0.73	0.15	0.73	0.36	0.23	0.38	0.38	0.050	0.59
W	0.6	1.2	0.1	0.4	1.1	2.7	1.7	1.6	2.4	2.1	2.6	3	2.2	6.8
Tl	0.4	0.5	0.1	0.3	0.11	0.05	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03
Pb	7.6	39.0	17.0	5.6	0.99	2.4	0.67	0.83	1.4	0.88	0.96	1.1	-	1.58
Th	15	12	11	6.6	7.8	17	17	13	13	15	14	15	15	17
U	8.0	17.0	9.0	3.9	7.8	4.5	5.4	4.1	3.7	5.2	4.4	5.1	5.5	4.7
Y	39.0	26.0	35.0	35.0	21	33	56	33	28	36	34	40	44	38
La	52	29	39	27	19	40	71	46	34	46	44	52	55	46
Ce	108.0	59.0	70.0	50.0	35	81	136	85	70	90	87	97	104	92
Pr	14.0	6.3	8.4	5.5	4.1	8.9	15	10.0	7.8	10	9.7	11	12.0	11.0
Nd	52.0	23.0	34.0	22.0	16	34	57	39	30	39	37	43	48	41
Sm	10.0	4.6	6.7	4.7	3.3	6.7	11	7.6	6	8	7.4	8.6	9.5	8.1
Eu	1.9	0.8	1.5	1.0	0.71	1.2	2.5	1.8	1.3	1.7	1.7	2	2.1	1.9
Gd	8.8	4.4	6.4	5.1	3.3	6	11	7	5.7	7.6	7	8.1	9	7.8
Tb	1.3	0.7	1.0	0.8	0.5	0.9	1.7	1	0.85	1.1	1.1	1.2	1.3	1.1
Dy	7.7	4.5	6.1	5.0	3.2	6	9.5	5.8	4.8	6.4	6	6.8	7.5	6.9
Ho	1.5	1.0	1.2	1.2	0.68	1.2	1.9	1.2	1	1.3	1.2	1.4	1.5	1.4
Er	4.4	3.0	3.6	3.7	2.1	3.7	5.3	3.4	3	3.8	3.6	4.0	4.3	4.1
Tm	0.6	0.5	0.5	0.6	0.34	0.55	0.75	0.49	0.44	0.55	0.52	0.57	0.61	0.61
Yb	4.5	3.1	3.4	4.1	2.2	3.9	4.7	3.3	3	3.7	3.5	3.8	4.1	4.0
Lu	0.7	0.5	0.5	0.7	0.35	0.59	0.69	0.48	0.47	0.58	0.54	0.57	0.62	0.63

Концентрации оксидов – мас.%, примесных элементов – ppm. Прочерк – ниже предела обнаружения ICP-MS анализа.

1, 2 – тридимит-секанинитовая паралава; 3 – кристобалит-фаялитовая паралава; 4, 5 – железистые пирогенные породы; 6 – карбонатно-силикатная порода (реликт мергелистого известняка); 7 – 15 – мелилит-нефелиновые паралавы.

Таблица А3. Геохимическая характеристика паралав и карбонатно-силикатных пород Нилгинского комплекса

Компоненты	1127	1133	1185	1261	1320	1319	1321	1310	1317	1276	1277
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	38.18	38.89	38.02	40.55	38.85	42.36	51.43	46.14	50.35	54.02	54.17
TiO ₂	1.03	1.04	1.03	0.90	0.92	0.83	0.96	0.91	1.03	1.02	1.07
Al ₂ O ₃	15.97	15.45	15.71	13.68	19.02	21.82	26.58	21.41	23.05	26.05	23.89
Fe ₂ O ₃	1.85	1.37	0.62	1.66	13.87	15.71	7.45	2.23	0.21	3.81	0.18
FeO	10.06	8.62	8.08	7.00	5.75	0.90	1.97	5.21	5.75	6.11	7.9
MnO	0.21	0.22	0.19	0.44	0.19	0.26	0.07	0.22	0.15	0.09	0.12
MgO	7.03	7.83	8.91	7.20	3.74	5.14	2.47	5.28	4.83	2.76	3.09
CaO	22.55	22.55	24.05	23.88	11.76	8.37	5.60	15.29	11.90	4	6.32
Na ₂ O	1.52	1.56	0.42	0.73	0.42	0.88	0.38	0.72	0.52	0.07	0.36
K ₂ O	0.48	0.61	0.50	0.83	0.76	0.66	0.94	0.63	0.69	0.9	1.3
P ₂ O ₅	0.08	0.06	0.06	0.05	0.24	0.19	0.14	0.16	0.13	0.11	0.15
H ₂ O ⁺	0.29	0.59	0.75	0.84						0.68	0.92
H ₂ O ⁻	0.23	0.35	0.32	0.45						0.25	0.24
CO ₂	0.20	0.42	0.76	0.59						-	-
S общ.	0.14	0.25	0.13	0.17						-	0.04
П.п.п.	0.83	1.38	2.40	2.10	2.98	2.81	2.57	1.43	1.38	1.26	1.51
Сумма	99.82	99.81	99.55	98.87	98.50	99.91	100.55	99.63	100.00	99.93	99.8
F	240	240	530	520	380	290	190	180	220	70	250
Li	55.20	41.10	41.80	35.40	26.80	53.00	52.00	46.80	58.40	48.5	58.9
Be	9.08	6.55	7.09	3.32	2.93	5.83	4.36	5.79	6.16	4.39	5.15
Rb	25.80	26.20	20.50	31.30	48.70	48.80	76.40	36.90	45.40	62.1	63.4
Cs	2.88	2.65	2.08	2.26	6.16	6.60	7.69	4.47	5.48	5.41	5.52
Ba	1854	1771	13644	10276	1069	187	277	1889	316	1064	973
Sr	2126	2385	1817	2065	1745	1488	614	2402	1840	647	761
Zr	276	263	303	271	177	188	233	221	225	252	255
Hf	7.23	6.78	8.67	7.33	4.80	5.53	6.46	5.76	5.74	6.64	6.67
Ta	1.57	1.44	1.93	1.56	0.96	1.64	1.69	1.16	1.18	1.46	1.32
Nb	21.10	19.90	21.60	18.80	15.90	19.60	25.50	17.40	17.80	20.1	19.3
Ni	19.70	17.60	23.10	24.50	48.50	66.30	74.90	54.80	106.80	62.2	53.1
Co	6.60	6.50	10.10	13.50	26.00	47.30	43.60	28.90	34.50	27.8	29.7

Окончание таблицы А3

Cr	62.30	49.80	56.20	41.10	121	164	159	158	165	162	146
V	112	102	102	77.80	246.00	161	197	211	224	186	201
Ga	21.80	18.20	16.10	16.90	28.80	31.20	38.70	28.70	25.60	36.3	29
Ge	2.05	0.70	0.86	1.07	0.51	1.37	0.71	0.22	0.46	2.24	1.32
Sc	17.60	14.80	13.90	10.80	24.70	29.90	30.70	29.60	32.60	25.5	26.6
Cu	27.70	27.70	46.80	43.60	69.00	86.50	74.80	36.50	59.00	56.3	45.4
Zn	26.80	24.30	31.00	39.70	20.00	34.70	96.20	11.70	28.20	116	60.5
Mo	43.60	20	123	24.10	2.26	1.94	3.01	3.66	3.62	5.87	4.36
Sn	0.42	0.51	0.33	0.74	0.34	1.51	0.26	0.19	0.65	4.78	1.88
Sb	0.32	0.23	0.82	0.95	0.50	2.30	0.25	0.31	0.43	1.56	0.96
W	31.00	17.90	24.10	13.80	1.60	3.08	2.52	5.56	4.38	4.78	4.71
Tl	0.03	0.04	0.02	0.04	0.09	0.20	0.30	0.04	0.14	0.39	0.22
Pb	0.85	1.17	0.41	2.33	1.13	6.80	1.44	0.32	2.54	24	7.42
Th	18.70	16.80	15.90	12.30	16.50	27.60	25.50	17.50	17.70	15.8	14.6
U	7.02	5.42	9.82	7.06	3.34	6.84	6.55	4.78	5.76	3.55	3.99
Y	49.90	42.00	43.20	28.10	36.60	54.30	49.70	55.80	64.80	42.3	48.5
La	63	58.60	49.70	41.60	50.60	75.70	80.50	64	78	52.1	48.8
Ce	121	113	95.90	79	121	182	184	143	171	118	110
Pr	13.80	12.60	11.50	9.10	13.10	21.30	20.30	16	19.20	14.5	13.4
Nd	53.60	48.30	44.00	33.70	49.70	83.20	77.20	63.40	78	57.5	53.9
Sm	10.30	9.13	8.56	6.27	9.60	15.80	14.20	12.30	14.90	11.3	10.7
Eu	1.49	1.31	3.19	2.42	1.92	2.72	2.37	2.36	2.89	2.15	2.23
Gd	10.60	9.39	9.19	6.72	8.59	13.00	11.90	11.20	13.30	10.9	10.7
Tb	1.33	1.16	1.32	0.91	1.14	1.76	1.53	1.51	1.77	1.48	1.52
Dy	8.31	7.35	7.14	4.71	6.72	10.80	9.37	9.52	11.21	7.53	8.15
Ho	1.70	1.46	1.49	0.97	1.32	2.10	1.77	1.94	2.25	1.53	1.71
Er	4.95	4.11	4.41	2.77	3.80	5.94	5.10	5.69	6.50	4.47	5.05
Tm	0.71	0.57	0.63	0.40	0.54	0.87	0.73	0.82	0.92	0.64	0.73
Yb	4.71	3.76	4.11	2.54	3.74	5.81	4.89	5.52	6.20	4.27	4.8
Lu	0.74	0.56	0.66	0.43	0.54	0.86	0.72	0.85	0.93	0.66	0.77

Концентрации оксидов – мас.%, примесных элементов – ppm. Прочерк – ниже предела обнаружения ICP-MS анализа.

1 – 4 – мелилит-нефелиновые паралавы; 5 – 7 – карбонатно-силикатные осадочные породы вблизи карьера Тугруг; 8, 9 – плагиоклаз-пироксеновая паралава; 10, 11 – идиалит-плагиоклаз-пироксеновая паралава.

Таблица А4. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы кордиерита

Хамарин-Хурал-Хид										Нилгинский комплекс						
клинкер					железистые паралавы					прожилки паралавы в клинкере				плаггиоклаз-пироксен-индиалитовая паралава		
1365			1403		1363	1368	1370		1136		1129		1276	1275		
1 (ц)	2 (к)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 (ц)	13 (к)	14	15	16	
SiO ₂	47.43	48.29	49.01	47.75	48.52	46	45.95	47.96	46.4	48.54	47.41	46.74	47.11	49.57	49.48	50.34
TiO ₂	-	-	-	-	0.18	-	-	0.38	-	-	0.48	0.17	0.2	0.15	0.35	-
Al ₂ O ₃	32.9	32.54	33.29	32.88	30.93	31.86	31.63	35.22	32.31	30.86	35.67	33.77	33.54	32.9	31.72	33.2
FeO	13.06	13.21	9.82	9.65	14.27	18.38	15.5	10.27	15.91	7.56	7.4	7.29	8.39	7.65	10.74	5.54
MnO	-	-	-	-	-	0.83	2.54	0.5	1.3	5.41	0.31	-	-	9.6	-	-
MgO	5.72	5.04	7.31	7.08	4.71	2.52	2.74	5.32	3.3	5.64	7.84	9.07	8.06	0	6.1	10.63
K ₂ O	0.46	0.52	0.53	-	0.23	0.53	0.4	1.17	0.6	0.77	0.47	0.54	0.54	0.27	0.52	-
Сумма	99.56	99.59	99.96	97.36	98.84	100.12	98.76	100.82	99.82	98.78	99.58	97.58	97.84	100.14	98.91	99.71
Формульные коэффициенты, ф. ед.																
Si	4.942	5.024	5.003	4.990	5.102	4.914	4.945	4.893	4.924	5.096	4.820	4.852	4.896	5.001	5.120	5.038
Ti					0.014			0.029			0.037	0.013	0.016	0.011	0.027	
Al	4.040	3.990	4.005	4.050	3.833	4.011	4.012	4.235	4.041	3.819	4.274	4.132	4.108	3.912	3.868	3.916
Fe ²⁺	1.138	1.149	0.838	0.843	1.255	1.642	1.395	0.876	1.412	0.664	0.629	0.633	0.729	0.646	0.929	0.464
Mn								0.043	0.117	0.481	0.027					
Mg	0.888	0.782	1.113	1.103	0.738	0.075	0.232	0.809	0.522	0.883	1.188	1.404	1.249	1.444	0.941	1.586
K	0.061	0.069	0.069		0.031	0.401	0.440	0.152	0.081	0.103	0.061	0.072	0.072	0.035	0.069	
Сумма	11.069	11.015	11.029	10.986	10.973	11.044	11.022	11.037	11.097	11.046	11.036	11.106	11.070	11.049	10.954	11.004
#Mg	0.44	0.40	0.57	0.57	0.37	0.19	0.21	0.47	0.25	0.44	0.64	0.69	0.63	0.69	0.50	0.77

Формулы рассчитаны на 18 атомов кислорода.

1, 2, 6, 7, 10 – секанинаит; 3, 11 – кордиерит; 4, 13, 14, 16 – индиалит; 5, 9 – ферроиндиалит; 8, 15 – индиалит-ферроиндиалит.

Mg#, Mg/(Mg + Fe + Mn)

ц – центр, к - край. Диагностика и названия минералов группы кордиерита – с учётом КР-спектроскопии.

Таблица А5. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы оливина в паралавах Хамарин-Хурал-Хида

	Железистые паралавы						Пл.-пироксен. паралава	Мелилит-нефелиновые паралавы									
	1370			1363	1368			1406	1410	1425						1410	
	1	2	3	4	5	6		7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	34.53	31.9	27.9	29.57	29.29	28.6	34.96	40.03	30.81	30.85	29.31	31.38	29.37	30.83	32.67	33.1	
Al ₂ O ₃	0.87	-	0.26	0.25	-	-	-	1.78	-	-	0.38	-	-	-	-	-	
FeO	29.15	36.76	60.79	66.09	60.76	63.6	41.58	4.41	55.29	39.61	58.15	41.13	57.27	39.79	26.99	25.25	
MnO	6.08	10.6	4.78	2.35	8.63	3.41	0.93	0.52	2.61	2.25	2.84	1.95	2.7	1.63	1.51	1.61	
MgO	26.53	18.26	4	2.04	2.12	3.18	22.12	51.46	7.45	2.06	3.93	2.07	3.58	1.92	6.57	7.81	
CaO	-	-	-	-	-	-	0.56	-	4.24	24.72	5.92	24.04	6.1	24.67	30.54	30.43	
P ₂ O ₅	2.09	1.51	3.25	0.34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Сумма	99.25	99.03	100.98	100.64	100.8	98.79	100.15	98.2	100.4	99.49	100.53	100.57	99.02	98.84	98.28	98.2	
	Формульные коэффициенты, ф. ед.																
Si	0.959	0.953	0.900	0.981	0.977	0.969	1.006	0.987	0.98	0.977	0.957	0.983	0.973	0.982	0.990	0.996	
Al	0.029		0.010	0.010							0.015						
Fe ²⁺	0.677	0.918	1.640	1.833	1.696	1.803	0.093	0.091	1.471	1.049	1.588	1.078	1.586	1.06	0.684	0.635	
Mn	0.143	0.268	0.131	0.066	0.244	0.098	0.001	0.011	0.07	0.06	0.079	0.052	0.076	0.044	0.039	0.041	
Mg	1.098	0.813	0.192	0.101	0.105	0.161	0.023	1.892	0.353	0.097	0.191	0.097	0.177	0.091	0.297	0.350	
Ca							0.949	0.019	0.145	0.839	0.207	0.807	0.216	0.842	0.991	0.981	
P	0.049	0.038	0.089	0.010													
Сумма	2.954	2.990	2.962	3.000	3.022	3.031	3.071	3.000	3.019	3.022	3.037	3.017	3.028	3.019	3.000	3.004	
Mg#	0.57	0.41	0.10	0.05	0.05	0.08	0.48	0.95	0.19	0.08	0.43	0.84	0.10	0.08	0.29	0.34	
Caol, мол.%	-	-	-	-	-	-	-	-	6.76	41.39	9.54	39.93	10.11	41.64	49.41	48.96	
Fo	42.96	27.83	5.75	2.89	2.96	4.53	34.23	91.26	17.16	4.29	8.74	4.43	8.16	4.09	14.71	17.41	
Fa	47.20	56.02	87.38	93.77	84.97	90.61	64.34	7.82	73.06	51.89	78.59	53.48	78.61	52.54	34.06	31.66	
Tph	9.84	16.15	6.87	3.33	12.07	4.86	1.44	0.92	3.01	2.44	3.14	2.18	3.11	1.74	1.81	1.96	
Fo									17.16	4.29	8.74	4.43	8.16	4.09	0	0	
Fa									66.30	10.50	69.05	13.55	68.50	10.90	34.06	31.66	
Tph									3.01	2.44	3.14	2.18	3.11	1.74	1.81	1.96	
Kir									13.53	82.78	19.08	79.85	20.23	83.28	-	-	
Mtc									-	-	-	-	-	-	64.13	66.38	

Формулы рассчитаны на 4 атомов кислорода.

Mg#, Mg/(Fe + Mg)

1,2, 7 – гортонолит, 3-6 – фаялит, 8 – форстерит, 9, 11, 13 – Са-фаялит, 10, 12, 14 – кирштейнит, 15, 16 – монтичеллит-кирштейнит

Таблица А6. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы шпинели в паралавах Хамарин-Хурал-Хида

	клинкер		железистые паралавы							железистая пироген. порода		мелилит-нефелиновые паралавы				
	1403		1370			1368				1416		1411		1420	1425	
	1 (ц)	2 (к)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12 (ц)	13 (к)	14	15	16
SiO ₂			0.58	1.41	0.3					1.75	0.17					
TiO ₂	1.27	18.3	2.47	1	0.37	24.49	20.95	9.57	2	5.54	5.59	0	0.55	1.18	1.92	1.93
Al ₂ O ₃	40.43	7.86	13	29.21	39.3	5.73	6.14	5.59	48.96	3.65	0.93	19.06	25.89	66.93	11.37	45.03
FeO	37.47	50.62	34.77	35.11	34.73	51.52	48.36	39.98	39.21	28.88	23.98	19.92	18.48		28.405	16.26
Fe ₂ O ₃	14.99	21.65	49.49	33.69	23.59	14.55	18.48	42.74	6.75	49.35	54.91	50.77	44.22		52.761	19.98
MnO		0.41	1.08	1.52	1.32	3.4	2.96	1.01	2.36	8.26	10.98	1.5	1.73		0.34	
MgO				0.5	1.63					0.85	0.23	9.55	10.6	27.83	3.62	15.67
CaO										0.13	0.24				0.08	
V ₂ O ₃	0.4	0.94				0.71	2.16	1.31	0.97							
Cr ₂ O ₃	0.58	0.53														
ZnO	1.61													0.59		
Сумма	96.762	99.789	100.81	101.03	100.93	100.4	99.052	100.2	100.25	96.654	96.861	100.81	101.47	96.53	98.496	98.87
	Формульные коэффициенты, ф. ед.															
Si			0.065	0.024	0.009	0.669	0.579	0.266	0.045	0.066	0.007					
Ti	0.031	0.499	0.065	0.024	0.009	0.669	0.579	0.266	0.045	0.156	0.164	0.000	0.013	0.022	0.052	0.041
Al	1.537	0.336	0.539	1.098	1.427	0.245	0.266	0.243	1.734	0.162	0.043	0.730	0.944	1.948	0.478	1.495
Fe ²⁺	1.011	1.535	1.023	0.937	0.895	1.564	1.487	1.234	0.985	0.907	0.784	0.541	0.478		0.848	0.383
Fe ³⁺	0.364	0.591	1.310	0.809	0.547	0.397	0.512	1.187	0.153	1.394	1.615	1.241	1.030		1.417	0.424
Mn		0.013	0.032	0.041	0.034	0.105	0.092	0.032	0.060	0.263	0.364	0.041	0.045		0.010	
Mg				0.024	0.075	0.000				0.048	0.013	0.462	0.489	1.024	0.193	0.658
Ca										0.005	0.010				0.003	
V	0.010	0.027				0.021	0.064	0.039	0.023							
Cr	0.038	0.015														
Zn	0.015															
Сумма	3.006	3.016	2.990	2.978	2.995	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.015	3.0000	3.005	3.001	3.000

Формулы рассчитаны на 4 атома кислорода.

1, 9 – герцинит, 2 – ульвошпинель, 3, 15 – Al-магнетит, 4, 12, 13 – Fe-пикотит, 5 – герцинит, 6 - 8 – Ti - магнетит, 10, 11 – магнетит-якобсит, 14 – шпинель, 16 – Fe-плеонаст.

ц – центр, к - край

Таблица А7. Составы (мас.%) стекла в клинкерах и железистых паралавах

	Хамарин-Хурал-Хид											Нилгинский комплекс								
	клинкер						железистые паралавы					клинкер								
	1402		1403		1365		1363			1370		1125		1126		1136		1137		
SiO ₂	67.33	62.79	69.4	69.25	72.7	69.51	72.89	72.16	72.76	72.65	72.33	71.8	70.36	62.51	71.03	66.64	71.39	70.71	70.19	68.57
TiO ₂		8.62	0.55	0.78	2.04	1.62			0.68				1.22	0.85	0.98	0.00	0.63	0.60	0.93	0.42
Al ₂ O ₃	17.38	14.83	12.47	14.3	13.19	12.17	11.92	12.28	11.62	12.53	11.81	12.98	15.00	17.78	12.58	19.61	15.30	14.62	13.04	13.57
FeO	0.49	3.34	4.63	3.37	1.92	2.42	1.47	1.98	1.58	1.75	2.19	2.06	2.69	5.04	1.69	2.52	0.89	1.00	2.70	2.97
MnO												0.19								0.53
MgO													0.78		0.93				0.32	0.00
CaO	4.07	0.25			0.83	0.36	0.53	0.57	0.41		0.88	0.78	1.37	2.27	0.69	1.34	0.57	0.74	0.41	0.56
Na ₂ O	5.14	2.44	1.85	3.15	1.98	1.87	0.51	0.85	1.37	2.55	0.85	0.63	3.03	2.86	3.05	2.70	2.36	2.33	2.64	2.24
K ₂ O	1.79	3.55	6.13	8.26	6.5	5.83	9.83	8.24	7.55	7.55	10.03	9.65	4.57	3.91	5.19	3.78	6.13	5.81	5.14	5.22
P ₂ O ₅							0.73	0.82	0.66			1.33								
Сумма	96.2	95.82	95.03	99.11	99.16	93.78	97.88	96.9	96.63	97.03	98.09	99.42	98.24	96	95.21	97.52	97.27	95.81	95.37	94.08
A/CNK	0.98	1.67	1.29	1.01	1.12	1.21	0.96	1.08	1.04	1.01	0.85	1.01	1.21	1.51	1.06	1.79	1.32	1.27	1.22	1.31
A/NK	1.78	1.89	1.29	1.01	1.28	1.30	1.04	1.19	1.11	1.01	0.96	1.13	1.36	1.99	1.18	2.30	1.45	1.44	1.32	1.45

Мольные отношения: $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$ и $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$.

Таблица А8. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты полевых шпатов в паралавах

	Хамарин-Хурал-Хид								Нилгинский комплекс							
	Мелилит-нефелиновые паралавы						Плагиоклаз-пироксен-паралава		Мелилит-нефелиновые паралавы						Пл.-пироксен-индиалит. паралава	
	1410				1420		1406		1236				1177		1277	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	47.37	54.25	51.73	51.69	44.73	47.73	42.44	55.28	44.28	50.72	40.65	52.97	44.73	57.14	47.62	55.41
TiO ₂												0.72				0.75
Al ₂ O ₃	31.65	27.89	22.71	22.28	33.78	31.08	34.94	26.68	35.98	22.41	24.41	27.74	35.07	26.43	34.03	26.62
FeO	0.14								0.33			1.7		0.6	0.94	1.94
Fe ₂ O ₃	0.24					0.53				0.711			1.067			
CaO	16.43	11.21	5.04	1.79	18.19	16.02	20.41	10.76	18.54	0.52	1.22	15.49	19.71	10.27	17.06	11.57
Na ₂ O	2.49	4.99	4.88	4.33	1.43	2.47	0.38	5.24	0.63	1.01	0.00	1.02	0.54	5.12	0.98	1.13
K ₂ O		0.34	3.67	2.93				0.42	0.00	8.64	3.84	0.65	0.00	1.01	0.23	1.37
BaO			11.49	15.25						13.01	26.18					
SrO			1.44	0	1.38	1.8	1.16			2.42	2.91					
Сумма	98.32	98.68	100.96	98.27	99.51	99.63	99.33	98.38	99.76	99.441	99.21	100.29	101.12	100.57	100.86	98.79
	Формульные коэффициенты, ф. ед.															
Si	2.211	2.476	2.502	2.630	2.078	2.215	1.985	2.537	2.049	2.611	2.32	2.415	2.053	2.566	2.185	2.624
Ti												0.025				0.027
Al	1.741	1.501	1.295	1.336	1.850	1.700	1.926	1.443	1.962	1.36	1.642	1.49	1.897	1.399	1.840	1.486
Fe ⁺³	0.005					0.019				0.028			0.037			
Fe ⁺²	0.008			0.016					0.013			0.065		0.023	0.036	0.077
Ca	0.822	0.548	0.261	0.098	0.906	0.796	1.023	0.529	0.919	0.029	0.075	0.757	0.969	0.494	0.839	0.587
Na	0.225	0.442	0.458	0.427	0.129	0.222	0.035	0.466	0.057	0.101		0.090	0.048	0.446	0.087	0.104
K		0.020	0.227	0.190				0.025		0.567	0.28	0.038		0.058	0.014	0.083
Ba			0.218	0.304						0.262	0.586					
Sr			0.040	0.000	0.037	0.048				0.072	0.096					
Сумма	5.013	4.987	5.000	5.000	5.000	5.000	4.969	5.000	5.000	5.030	4.999	4.880	5.004	4.986	5.001	5.000
<i>An</i> , мол.%	78.48	54.30	37.02	16.49	87.55	78.19	96.74	51.87	94.16	3.38	7.97	85.54	95.28	49.50	89.23	75.87
<i>Ab</i>	21.52	43.74			12.45	21.81	3.26	45.72	5.84			10.17	4.72	44.69	9.28	13.40
<i>Or</i>	0.00	1.96	32.10	32.14	0.00	0.00	0.00	2.41	0.00	66.08	29.76	4.29	0.00	5.81	1.49	10.73
<i>Cls</i>			30.87	51.37						30.54	62.27					

Формулы рассчитаны на 6 атомов кислорода.

1, 5, 6, 12, 15, 16 – битовнит, 2, 8 – лабрадор, 3, 10 – гиаллофан, 4, 11 – цельзиан, 7, 13 – анортит, 14 – андезин.

Таблица А9. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы пироксена в паралавах Хамарин-Хурал-Хид

	железистые паралавы		мелилит-нефелиновые паралавы													плагиоклаз-пироксеновая паралава	
	1368	1370	1411		1412					1425						1406	
	1	2	3 (ц)	4 (к)	5 (ц)	6 (сп)	7 (к)	8 (ц)	9 (к)	10 (ц)	11 (к)	12 (ц)	13 (ц)	14 (ц)	15 (к)	16	17
SiO ₂	43.02	44.37	34.85	34.47	44.88	46.64	48.76	35.04	38.64	43.84	44.26	41.25	40.75	43.24	45.53	48.97	49.91
TiO ₂	0.75	0.17	4.12	5.42	1.93	1.08	1.33	9.64	5.60	2.77	2.14	3.02	3.80	2.15	1.38	1.10	1.25
Al ₂ O ₃	5.9	4.48	16.68	15.51	9.71	8.79	3.53	15.57	13.93	9.86	7.86	10.47	6.82	9.20	4.70	1.17	3.70
FeO	41.66	35.29	-	-	-	-	3.83	-	-	-	13.18	0.29	8.92	7.35	13.48	28.39	22.39
Fe ₂ O ₃	-	3.09	12.52	13.64	6.16	5.63	6.11	6.40	6.38	10.64	6.86	12.54	14.18	7.26	7.89	2.74	2.30
MnO	7.54	3.12	-	0.00	0.57	0.68	0.80	-	-	0.00	0.41	0.40	0.75	0.39	0.61	0.93	0.54
MgO	1.19	8.09	6.67	6.63	11.14	12.32	11.87	7.55	9.22	9.60	3.53	7.28	1.77	6.52	4.01	15.02	19.62
CaO	0.48	0.35	25.62	25.37	22.99	23.34	22.54	23.66	24.08	23.93	23.13	23.62	22.18	23.35	23.11	0.95	0.28
Na ₂ O	-	-	0.61		0.77	0.67	0.46	0.67	0.49	0.47	-	0.43	0.69	-	0.44	-	-
Сумма	100.54	98.90	101.07	101.04	98.15	99.15	99.23	98.53	98.34	101.11	101.37	99.31	99.86	99.47	101.15	99.26	99.99
Формульные коэффициенты, ф. ед.																	
Si	1.8296	1.837	1.347	1.338	1.703	1.740	1.851	1.391	1.502	1.643	1.720	1.595	1.649	1.683	1.791	1.932	1.885
Ti	0.024	0.005	0.150	0.198	0.069	0.038	0.048	0.360	0.205	0.098	0.078	0.110	0.145	0.079	0.051	0.041	0.044
Al	0.296	0.219	0.760	0.710	0.434	0.387	0.158	0.729	0.638	0.435	0.360	0.477	0.325	0.422	0.218	0.054	0.165
Fe ²⁺	1.482	1.222					0.122				0.361	0.009	0.302	0.239	0.443	0.937	0.707
Fe ³⁺	-	0.096	0.364	0.398	0.176	0.158	0.175	0.191	0.187	0.300	0.201	0.365	0.432	0.213	0.234	0.081	0.065
Mn	0.272	0.109			0.018	0.022	0.026				0.014	0.013	0.026	0.013	0.020	0.031	0.017
Mg	0.075	0.496	0.385	0.384	0.630	0.685	0.672	0.447	0.534	0.536	0.205	0.420	0.107	0.378	0.235	0.884	1.105
Ca	0.022	0.016	1.061	1.055	0.934	0.933	0.917	1.006	1.003	0.961	0.963	0.979	0.961	0.974	0.974	0.040	0.011
Na			0.046		0.057	0.049	0.034	0.052	0.037	0.034		0.032	0.054		0.034		
Сумма	4.000	4.000	4.113	4.083	4.021	4.011	4.000	4.175	4.105	4.007	3.900	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
Wo, мол.%	1.39	0.8	28.28	28.78	35.40	36.54	41.46	28.94	31.41	35.22	37.79	34.78	38.03	36.62	42.06	2.07	0.60
En	4.78	27.10	15.40	15.23	31.92	34.53	33.93	21.44	25.49	26.15	9.78	20.29	5.31	18.35	11.52	45.50	58.50
Fs	93.84	72.10	14.40	15.96	9.21	8.17	15.16	8.66	8.10	14.33	32.62	18.02	36.65	22.04	33.62	52.43	40.91
Kush	-	-	41.93	40.04	23.48	20.76	9.44	40.96	35.00	24.30	19.82	26.91	20.02	23.00	12.80	-	-

Формулы рассчитаны на 6 атомов кислорода.

1 – ферросилит, 2, 16, 17 – энстатит-ферросилит, 3 – 15 – зональные микрофенокристы обогащенного Al диопсида-геденбергита.

Таблица А10. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы пироксена в паралавах Нилгинского комплекса

	мелилит-нефелиновые паралавы												плаггиоклаз-пироксеновая паралава		прожилки паралав в клинкере		
	1172				1234		1193			1287		1133	1310		1129		1136
	1 (ц)	2 (к)	3	4	5 (ц)	6 (к)	7 (ц)	8 (сп)	9 (к)	10 (ц)	11 (к)	12	13 (ц)	14 (к)	15	16	17
SiO ₂	42.89	44.97	39.28	35.04	41.93	43.17	41.27	42.38	44.39	44.73	46.98	44.58	48.58	47.75	50.98	49.53	46.57
TiO ₂	2	0.88	3.6	9.26	2.65	0.87	1.17	1.32	1.42	1.97	0.98	1.78	1.9	2.15	0.87	1.37	-
Al ₂ O ₃	15.7	9.26	19.03	19.1	15.78	10.6	14.68	13.98	11.88	13.08	5.9	12.96	6.39	3.02	2.97	5.03	2.82
FeO	2.30	13.11	-	3.82	3.23	7.87	5.55	4.14	2.14	6.89	17.01	3.15	6.15	17.33	26.96	29.06	22.46
Fe ₂ O ₃	1.38	2.33	2.90	-	1.64	4.28	2.80	2.43	3.38	0.98	1.26	2.88	0.40	1.09	-	-	2.29
MnO	-	0.43	0.3	0.4	0.3	0.67	-	-	-	-	-	-	-	0.61	-	-	15.02
MgO	10.96	6.38	9.6	7.93	10.05	7.79	7.53	9.14	11.16	9.57	5.79	11.08	13.25	8.06	16.75	14.26	9.68
CaO	24.39	23.14	24.43	24.78	24.25	23.39	24.53	24.53	25.23	24.44	23.2	24.98	23.44	20.85	1.8	0.67	0.59
Na ₂ O	-	-	0.47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	99.62	100.50	99.61	100.33	99.83	98.64	97.53	97.92	99.60	101.66	101.13	101.41	100.11	100.86	100.33	99.92	99.43
Формульные коэффициенты, ф. ед.																	
Si	1.584	1.731	1.454	1.317	1.558	1.671	1.592	1.614	1.652	1.648	1.819	1.632	1.802	1.852	1.936	1.901	1.897
Ti	0.056	0.025	0.1	0.262	0.074	0.025	0.034	0.038	0.04	0.055	0.029	0.049	0.053	0.063	0.025	0.04	
Al	0.683	0.42	0.83	0.846	0.69	0.483	0.667	0.627	0.522	0.568	0.269	0.559	0.2794	0.1381	0.133	0.228	0.136
Fe ²⁺	0.071	0.422		0.12	0.1	0.255	0.179	0.132	0.067	0.212	0.551	0.097	0.191	0.562	0.856	0.933	0.765
Fe ³⁺	0.038	0.068	0.081		0.046	0.125	0.081	0.07	0.095	0.027	0.037	0.079	0.011	0.032			0.07
Mn		0.014	0.009	0.013	0.009	0.022							0.000	0.020			0.518
Mg	0.603	0.366	0.53	0.444	0.557	0.449	0.433	0.519	0.619	0.526	0.334	0.605	0.733	0.466	0.948	0.816	0.588
Ca	0.965	0.954	0.969	0.998	0.965	0.97	1.014	1.001	1.006	0.965	0.962	0.98	0.931	0.867	0.073	0.028	0.026
Na			0.034														
Сумма	4	4	4.007	4	3.999	4	4	4.001	4.001	4.001	4.001	4.001	4.000	4.000	3.971	3.946	4
Wo, мол.%	30.01	36.21	26.13	25.69	29.63	34.83	32.59	33.03	35.56	33.03	40.56	33.41	38.78	36.36	3.89	1.58	1.79
En	29.63	17.80	26.17	21.62	27.34	21.54	20.78	25.17	29.93	25.87	16.27	29.34	38.95	23.13	50.51	45.92	40.58
Fs	4.93	24.00	3.72	5.42	6.79	18.09	12.13	9.32	7.08	11.52	28.97	7.89	35.60	33.07	45.60	52.50	57.63
Kush	35.43	21.98	43.99	47.27	36.24	25.54	34.49	32.49	27.43	29.59	14.21	29.36	39.34	26.34	-	-	-

Формулы рассчитаны на 6 атомов кислорода.

1, 2, 5-11, 13, 14 - зональные микрофенокристы обогащенного Al диоксида-геденбергита, 3, 4, 12 – Al-диопсид, 15, 16 – энстатит-ферросилит, 17 – обогащенный Mn энстатит-ферросилит

Таблица А11. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы мелилита в паралавах Хамарин-Хурал-Хида

	1411			1412		1419						1420				1367		
	1(ц)	2(к)	3	4(ц)	5(к)	6(ц)	7(к)	8(ц)	9(к)	10(ц)	11(к)	12(ц)	13(к)	14	15	16	17(ц)	18(к)
SiO ₂	38.53	41.2	27.94	42.02	43.77	38.08	40.11	39.71	41.61	39.49	41.93	39.79	42.85	26.44	27.45	25.39	36.54	40.67
Al ₂ O ₃	13.51	8.16	24.87	10.24	9.09	14.47	9.58	13	8.94	13.7	11.03	14.21	11.26	29.08	25.92	27.95	17.78	13.81
FeO	0.00	0.00	0.00	0.18	0.52	0.94	4.83	0.46	5.92	1.08	4.22	0.00	0.00	0.00			1.18	1.27
Fe ₂ O ₃	3.39	4.40	1.68	2.15	1.13	1.37	3.26	2.76	1.41	1.79	3.88	0.51	0.56	0.56			0.49	0.68
MnO							0.37				0.71							
MgO	5.12	8.11	3.73	7.06	7.76	5.12	4.15	6.05	4.51	5.46	3.05	5.75	7.08	2.74	3.62	2.89	5.36	6.27
CaO	36.11	35.88	41.68	35.65	34.29	35.83	32.99	35.85	33.86	34.36	30.95	34.66	34.48	42.13	41.75	41.75	35.82	34.53
Na ₂ O	3.92	3.79	0.84	4.03	4.54	3.4	4.06	3.69	3.98	4.07	5.74	4.61	4.7	0.42	0.58		2.93	4.08
Сумма	100.58	101.54	100.74	101.33	101.09	99.21	99.36	101.53	100.23	99.95	101.51	99.53	100.93	101.37	99.32	97.98	100.10	101.31
	Формульные коэффициенты, ф. ед.																	
Si	1.741	1.849	1.280	1.869	1.939	1.738	1.863	1.771	1.911	1.783	1.892	1.792	1.895	1.197	1.269	1.191	1.647	1.803
Al	0.720	0.432	1.343	0.537	0.475	0.778	0.525	0.684	0.484	0.729	0.587	0.754	0.587	1.553	1.413	1.545	0.945	0.722
Fe ²⁺				0.007	0.019	0.036	0.188	0.017	0.227	0.041	0.159						0.045	0.047
Fe ³⁺	0.115	0.149	0.058	0.072	0.038	0.047	0.114	0.093	0.049	0.061	0.132	0.017	0.018	0.019			0.016	0.023
Mn							0.015				0.027							0.000
Mg	0.345	0.542	0.255	0.468	0.512	0.348	0.287	0.402	0.309	0.367	0.205	0.386	0.467	0.185	0.249	0.202	0.360	0.414
Ca	1.749	1.725	2.046	1.699	1.628	1.752	1.642	1.714	1.666	1.662	1.496	1.672	1.634	2.044	2.068	2.098	1.730	1.640
Na	0.343	0.330	0.075	0.348	0.390	0.301	0.366	0.319	0.354	0.356	0.502	0.402	0.403	0.037	0.052		0.256	0.351
Сумма	5.013	5.026	5.057	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.000	5.024	5.004	5.035	5.051	5.036	5.000	5.000
<i>Ak, мол.%</i>	38.08	54.77	26.86	49.23	52.13	37.54	29.72	41.91	31.92	37.70	21.49	40.34	48.22	19.67	26.70	21.02	35.32	40.97
<i>Aak</i>	18.40	14.76	0.00	25.58	34.50	23.15	24.78	21.25	29.69	28.75	37.02	34.41	36.74	0.00	0.00	0.00	24.54	33.18
<i>Gh</i>	27.32	14.50	68.41	14.35	6.59	27.67	14.00	23.75	9.48	22.20	11.02	20.93	11.20	78.39	71.48	78.17	34.90	19.45
<i>Fe2-Ak</i>	3.59	0.53	1.39	3.08	2.81	6.31	19.77	3.41	23.79	5.03	16.89	1.76	1.56	1.17	1.76	0.82	3.76	4.24
<i>Fe3-Ak</i>	12.60	15.45	3.34	7.76	3.97	5.33	11.72	9.67	5.13	6.32	13.58	2.57	2.28	0.77	0.06	0.00	1.48	2.16

Формулы рассчитаны на 7 атомов кислорода.

1, 2, 4 -13, 17, 18 – зональные зерна акерманита с ядром существенно глинозёмистого состава; 3,14-16 – геленит.

Миналы: *Ak* – акерманит Ca₂MgSiO₇; *Aak* – алюмоакерманит CaNaAlSi₂O₇; *Gh* – геленит, Ca₂AlAlSiO₇; *Fe2-Ak* = Ca₂Fe²⁺Si₂O₇; *Fe3-Ak* = CaNaFe³⁺Si₂O₇.

Таблица А12. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы мелилита в паралавах Нилгинского комплекса

	1133		1127		1128		1180		1179		1279			1234		1185		
	1 (ц)	2 (к)	3(ц)	4(к)	5(ц)	6(к)	7(ц)	8(к)	9(ц)	10(к)	11(ц)	12(к)	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	36.97	41.1	39.66	40.1	40.5	41.27	39.7	41.31	37.89	41.57	39.64	41.74	31.32	31.66	34.7	23.66	24.37	24.77
Al ₂ O ₃	11.9	7.33	10.11	8.75	8.28	8.28	8.05	6.33	13.04	6.31	10.75	8.99	25.56	18.03	16.51	27.44	26.64	26.09
FeO	2.77	2.65	4.55	4.69	6.03	10.83	3.38	3.89	-	1.29	2.61	7.15	0.89	-	1.70	-	0.25	0.77
Fe ₂ O ₃	-	-	-	0.54	-	-	-	-	0.57	-	-	-	0.60	2.11	-	5.46	6.79	5.58
MnO	-	-	-	-	-	-	-	0.25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	8.36	9.87	6.83	6.67	6.77	2.19	9.67	9.54	6.24	10.36	8.26	4.91	2.21	6.24	7.69	1.72	1.94	2.27
CaO	39.25	37.8	36.72	36.2	36.7	32.34	38.3	35.72	37.53	39.11	36.87	33.25	35.08	39.5	40.97	39.92	39.74	39.07
Na ₂ O	-	1.05	2.04	2.32	1.82	3.83	0.65	1.47	2.71	1.21	1.6	3.49	2.98	0.54	-	-	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	0.16	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сумма	99.25	99.8	99.91	99.2	100.18	98.74	98.7	98.71	99.85	99.85	99.73	99.55	98.64	98.08	101.57	98.20	99.73	98.55
	Формульные коэффициенты, ф. ед.																	
Si	1.698	1.873	1.819	1.863	1.871	1.948	1.821	1.911	1.749	1.891	1.804	1.926	1.433	1.48	1.563	1.124	1.144	1.173
Al	0.657	0.387	0.548	0.480	0.452	0.462	0.435	0.345	0.71	0.338	0.577	0.489	1.378	0.993	0.877	1.537	1.473	1.456
Fe ²⁺	0.110	0.104	0.173	0.180	0.227	0.430	0.130	0.15	0	0.049	0.099	0.276	0.034		0.064	0	0.01	0.031
Fe ³⁺				0.017					0.02				0.021	0.074		0.195	0.24	0.199
Mn								0.01										
Mg	0.569	0.673	0.470	0.460	0.460	0.150	0.661	0.658	0.429	0.702	0.56	0.338	0.151	0.435	0.516	0.122	0.136	0.16
Ca	1.944	1.854	1.811	1.800	1.811	1.644	1.880	1.77	1.857	1.906	1.798	1.644	1.719	1.979	1.978	2.032	1.998	1.982
Na		0.088	0.178	0.212	0.159	0.345	0.058	0.132	0.243	0.107	0.141	0.312	0.264	0.049				
K							0.009	0.012										
Сумма	4.978	4.979	4.999	5.012	4.980	4.979	4.994	4.988	5.008	4.993	4.979	4.985	5.000	5.010	4.998	5.010	5.001	5.001
<i>Ak</i> , мол. %	56.2	66.0	46.7	46.4	45.9	15.5	63.8	62.8	47.4	71.5	54.6	32.7	14.2	44.1	50.6	13.5	14.1	15.6
<i>Aak</i>	3.0	11.8	18.5	18.8	17.6	35.6	8.2	17.1	17.8	10.4	16.9	33.2	25.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0
<i>Gh</i>	30.7	13.3	18.2	14.5	13.5	5.3	17.3	8.1	27.2	11.8	20.0	7.6	56.3	50.2	43.3	79.3	76.1	74.7
<i>Fe2-Ak</i>	10.2	9.0	16.7	18.4	22.9	43.5	10.7	12.0	4.5	6.2	8.5	26.5	2.5	0.6	5.4	1.3	1.5	2.7
<i>Fe3-Ak</i>	0.0	0.0	0.0	1.9	0.0	0.1	0.0	0.0	3.2	0.2	0.0	0.0	1.9	5.0	0.0	5.9	8.2	7.1

Формулы рассчитаны на 7 атомов кислорода.

1 – 12 – зональные зерна акерманита с ядром существенно глинозёмистого состава; 13, 16-18 – геленит.

Миналы: *Ak* – акерманит Ca₂MgSiO₇; *Aak* – алюмоакерманит CaNaAlSi₂O₇; *Gh* – геленит, Ca₂AlAlSiO₇; *Fe2-Ak* = Ca₂Fe²⁺Si₂O₇; *Fe3-Ak* = CaNaFe³⁺Si₂O₇.

Таблица А13. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы оливина в паралавах Нилгинского комплекса

	1133					1127		1128		1180		1193		1234				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	29.80	31.23	37.55	36.37	37.46	30.10	31.28	31.38	31.73	29.91	28.41	30.55	29.93	36.2	31.58	32.75	37.44	36.71
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.28	-	0.48	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	-	-	-	-	-	0.38	0.51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
FeO	61.70	40.54	1.47	5.39	1.52	56.68	39.17	56.85	39.35	37.31	55.45	42.31	58.24	12	32.93	31.15	6.1	7.8
MnO	1.78	1.37	-	-	0.43	1.72	1.06	1.47	1.20	4.13	6.95	2.49	3.11	2.88	3.54	4.47	1.14	1.83
MgO	2.29	2.09	23.58	20.98	24.11	5.75	3.66	6.42	3.20	1.97	4.06	2.35	4.81	15.19	4.16	5.21	20.89	17.99
CaO	3.71	22.72	36.38	35.58	35.40	4.48	23.37	5.02	23.81	25.41	3.65	22.02	5.05	35.44	26.04	26.49	35.16	37.19
Сумма	99.28	98.16	98.97	98.76	98.92	99.11	99.05	101.15	99.30	98.73	98.80	99.73	101.63	101.71	98.25	100.06	100.73	101.52
Формульные коэффициенты, ф. ед.																		
Si	0.990	0.987	1.003	1.006	1.000	0.983	0.987	0.999	0.990	0.960	0.950	0.967	0.960	0.983	0.992	1.002	0.987	0.990
Ti												0.007	0.010					
Al						0.010	0.020											
Fe ²⁺	1.723	1.089	0.030	0.120	0.030	1.540	1.030	1.500	1.030	1.000	1.544	1.130	1.560	0.276	0.862	0.790	0.140	0.180
Mg	0.112	0.102	0.930	0.850	0.960	0.280	0.170	0.300	0.155	0.090	0.173	0.110	0.230	0.620	0.186	0.240	0.835	0.714
Mn	0.050	0.040	0.000	0.000	0.010	0.050	0.030	0.040	0.037	0.110	0.210	0.069	0.080	0.071	0.090	0.120	0.028	0.036
Ca	0.130	0.784	1.040	1.040	1.010	0.160	0.780	0.170	0.751	0.870	0.130	0.750	0.170	1.045	0.870	0.860	1.010	1.080
Сумма	3.005	3.002	3.003	3.016	3.010	3.023	3.017	3.009	2.963	3.030	3.014	3.026	3.010	2.995	3.000	3.012	3.000	3.000
<i>Caol</i> , мол. %	6.38	38.88	52.00	51.83	50.38	7.63	38.88	8.38	39.88	42.63	5.50	36.75	8.00	51.88	43.38	42.88	50.38	53.75
<i>Fo</i>	5.38	4.88	46.50	42.33	47.88	13.63	8.38	14.88	7.38	3.63	9.00	4.75	11.00	30.88	9.38	11.88	41.38	35.75
<i>Fa</i>	85.88	54.38	1.50	5.83	1.38	76.63	51.38	74.88	51.38	49.13	76.50	55.75	77.50	13.88	42.88	39.38	6.88	8.75
<i>Trh</i>	2.38	1.88	0.00	0.00	0.38	2.13	1.38	1.88	1.38	4.63	9.00	2.75	3.50	3.38	4.38	5.88	1.38	1.75
<i>Fo</i>	5.38	4.88	0.00	0.00	0.00	13.63	8.38	14.88	7.38	3.63	9.00	4.75	11.00	0.00	8.88	8.38	0.00	0.00
<i>Trh</i>	2.38	1.88	0.00	0.00	0.27	2.13	1.38	1.88	1.38	4.63	9.00	2.75	3.50	2.73	4.38	5.88	1.18	0.91
<i>Kir</i>	12.75	77.75	5.00	13.50	3.36	15.25	77.75	16.75	79.75	85.25	11.00	73.50	16.00	31.64	85.75	78.75	14.91	22.55
<i>Fa</i>	79.50	15.50	-	-	-	69.00	12.50	66.50	11.50	6.50	71.00	19.00	69.50	-	-	-	-	-
<i>Mtc</i>	-	-	95.00	86.50	96.36	-	-	-	-	-	-	-	-	65.64	1.00	7.00	83.91	76.55

Формулы рассчитаны на 4 атомов кислорода.

1, 6, 8, 11, 13 – Са-фаялит, 2,7, 9,10, 12 15, 16 – кирштейнит, 3-5, 14, 17, 18 – монтичеллит.

Таблица А14. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы шпинели в паралавах Нилгинского комплекса

	1279					1185			1133		1129		1136		1137	
	1	2	3 (ц)	4 (к)	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO ₂	-										0.77					
TiO ₂	0.42	0.52	0.00	0.42	0.00	0.00	0.00	1.22	0.00		1.62	8.21	0.38	4.70	2.99	12.81
Al ₂ O ₃	2.74	8.28	52.64	53.43	4.52	60.22	58.44	17.14	66.38		19.06	3.74	19.63	23.98	44.16	20.54
FeO	10.45	15.93	7.30	17.14	26.18	15.52	29.96	12.49	8.48	8.41	35.82	37.80	24.73	34.13	36.62	43.30
Fe ₂ O ₃	72.17	64.16	19.52	12.98	65.78	5.86	5.31	51.71	3.04	76.38	41.42	49.23	46.45	32.33	12.32	20.92
MnO	1.37	0.83	0.44	1.08	0.35	0.66	0.39	1.50	0.00		0.99	0.00	8.30	5.69	2.92	3.58
MgO	13.08	10.58	21.39	14.59	3.50	16.20	7.41	13.20	22.25	14.56		0.98	1.28		1.38	
Сумма	100.23	100.30	101.30	99.64	100.33	98.46	101.51	97.26	100.14	99.35	98.91	99.96	100.76	100.83	100.38	101.15
Формульные коэффициенты, ф. ед.																
Si											0.03					
Ti	0.011	0.013	0	0.009	0	0	0	0.03			0.04	0.23	0.01	0.118	0.068	0.325
Al	0.111	0.332	1.617	1.717	1.883	1.883	1.89	0.663	1.943		0.78	0.16	0.789	0.947	1.582	0.818
Fe ³⁺	1.867	1.642	0.383	0.266	0.117	0.117	0.11	1.277	0.057	2	1.08	1.38	1.192	0.816	0.282	0.532
Fe ²⁺	0.301	0.453	0.159	0.391	0.344	0.344	0.688	0.343	0.176	0.245	1.04	1.18	0.705	0.957	0.931	1.223
Mn	0.04	0.024	0.01	0.025	0.015	0.015	0.009	0.042	0		0.03	0	0.24	0.162	0.075	0.102
Mg	0.67	0.536	0.831	0.593	0.641	0.641	0.303	0.646	0.824	0.755		0.05	0.065		0.063	
Сумма	3.000	3.000	3.000	3.001	3.000	3.000	3.000	3.001	3.000	3.000	3.000	3.000	3.001	3.000	3.001	3.000

Формулы рассчитаны на 4 атома кислорода.

1, 2, 10 – магнезиоферрит, 3, 6, 7 – плеонаст, 4, 9 – шпинель, 5 – магнетит, 8 – Fe плеонаст, 11 – Al магнетит, 12 – магнетит, 13-16 – магнетит-якобит.

ц – центр, к - край

Таблица А15. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы рёнита-куратита в паралавах

	Хамарин-Хурал-Хид								Нилгинский комплекс									
	1411		1412		1419		1420		1176	1175		1287			1133			
	1	2	3 ц	4 к	5 ц	6 к	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO ₂	17.91	16.19	29.61	29.59	26.25	23.98	23.66	25.72	27.53	25.67	25.63	23.45	23.98	23.19	28.05	26.34	25.29	27.32
TiO ₂	5.4	4.77	9.49	11.04	11.21	11.69	9.56	6.64	10.91	6.92	7.32	9.12	9.71	8.52	3.92	5.1	8.19	6.71
Al ₂ O ₃	20.44	22.28	15.85	9.84	15.91	15.15	16.99	16.57	16.31	15.55	17.87	15.36	13.28	16.61	17.91	17.4	14.98	15.74
FeO	6.75	1.46	11.07	25.47	19.64	28.63	18.07	17.85	20.08	26.88	25.78	31.02	32.95	32.08	28.74	26.95	32.10	31.90
Fe ₂ O ₃	25.89	31.73	2.99	4.44	3.13	1.354	8.80	10.74	0.00	6.71	2.69	4.64	3.22	4.19	5.22	6.851	3.75	1.76
MnO	0.71	0.87	0.7	1.29	0.58	1.34	-	0.62		0.62	-	-	-	-	0.65	0.41	0.66	0.43
MgO	10.66	12.14	15.31	7.1	10.33	5.57	8.37	7.91	12.40	4.01	6.8	3.10	2.87	2.35	3.95	3.78	3.42	2.64
CaO	13.46	11.42	12.1	9.72	12.83	12.56	12.94	14.34	13.29	11.99	12.75	12.55	12.03	12.06	11.87	12.38	11.99	11.24
Na ₂ O	-	0.58	1.63	2.29	0.88	-	0.98	0.7	-	0.77	-	-	-	-	0.55	0.65	-	0.82
Сумма	101.21	101.44	98.74	100.79	100.75	100.28	99.37	101.10	100.52	99.11	98.84	99.25	98.04	99.00	100.86	99.86	100.38	98.53
	Формульные коэффициенты, ф. ед.																	
Si	4.912	4.387	7.787	8.230	7.098	6.818	6.569	7.04	7.350	7.366	7.206	6.846	7.136	6.794	7.83	7.458	7.28	7.9
Ti	1.114	0.972	1.877	2.309	2.280	2.499	1.996	1.367	2.19	1.494	1.548	2.002	2.174	1.876	0.822	1.086	1.772	1.46
Al	6.607	7.116	4.913	3.226	5.070	5.077	5.56	5.346	5.132	5.26	5.922	5.284	4.658	5.734	5.894	5.808	5.082	5.364
Fe ²⁺	1.547	0.330	2.434	5.925	4.441	6.808	4.196	4.087	4.484	6.45	6.064	7.574	8.2	7.858	6.71	6.38	7.726	7.714
Fe ³⁺	5.342	6.471	0.59	0.930	0.636	0.290	1.838	2.213		1.448	0.568	1.02	0.722	0.924	1.096	1.46	0.812	0.378
Mn	0.165	0.200	0.156	0.304	0.133	0.322		0.144		0.15					0.154	0.098	0.16	0.106
Mg	4.358	4.904	6.002	2.944	4.164	2.361	3.464	3.228	4.936	1.716	2.85	1.35	1.274	1.026	1.644	1.596	1.468	1.138
Ca	3.955	3.316	3.41	2.897	3.717	3.826	3.849	4.205	3.802	3.686	3.842	3.926	3.836	3.786	3.55	3.756	3.698	3.482
Na		0.305	0.831	1.235	0.461		0.528	0.372		0.214					0.149	0.178		0.23
Сумма	28.000	28.000	28.000	28.000	28.000	28.000	28.000	28.000	27.894	27.784	28.000	28.002	28.000	27.998	27.849	27.820	27.998	27.772
Mg#	0.39	0.42	0.66	0.30	0.45	0.25	0.36	0.34	0.52	0.18	0.30	0.14	0.12	0.10	0.17	0.17	0.15	0.12

Формулы рассчитаны 40 атомов кислорода.

1, 2, 4 - 8, 10-18 – рёнит, 3, 9 – куратит.

Mg#, Mg/(Mg + Fe²⁺ + Fe³⁺)

ц – центр, к – край

Таблица А16. Составы (мас.%) и формульные коэффициенты минералов группы нефелина и кальсилита в паралавах

	Хамарин-Хурал-Хид								Нилгинский комплекс						
	1411		1412		1419			1425	1180			1133	1128		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO ₂	41.59	41.61	43.19	43.39	46.32	44.20	44.22	42.81	41.46	41.87	39.24	43.86	43.84	39	38.34
Al ₂ O ₃	33.73	34.63	33.84	27.74	32.52	32.86	33.65	32.76	34.56	34.56	32.63	31.95	32.4	29.97	29.27
FeO	1.54	1.33	0.58	1.29	0.60	0.62	0.84	0.58	0.37	0.33	0.19	0.8	1.13	1.08	0.76
CaO	5.14	6.42	3.55	7.15	3.69	4.79	5.04	4.97	2.34	1.99	-	1.22	1.6	0.34	2.43
Na ₂ O	15.00	15.14	15.56	14.69	15.02	15.11	15.31	14.81	13.51	13.98	1.54	13.49	13.61	0.81	1.27
K ₂ O	2.49	1.89	2.78	1.95	1.48	1.22	1.22	2.02	8.11	7.53	26.56	7.99	7.36	29.13	26.41
Сумма	99.49	101	99.5	96.21	99.63	98.8	100.28	97.95	100.35	100.26	100.16	99.31	99.94	100.33	98.48
	Формульные коэффициенты, ф. ед.														
Si	8.030	7.911	8.259	8.676	8.714	8.441	8.341	8.303	1.004	1.011	1.014	1.067	1.060	1.029	1.025
Al	7.676	7.760	7.626	6.537	7.211	7.396	7.481	7.489	0.987	0.984	0.994	0.916	0.923	0.932	0.922
Fe ²⁺	0.249	0.212	0.093	0.216	0.094	0.099	0.133	0.094	0.007	0.007	0.004	0.016	0.023	0.024	0.017
Ca	1.063	1.308	0.727	1.532	0.744	0.980	1.019	1.033	0.061	0.051		0.032	0.041	0.010	0.067
Na	5.615	5.581	5.769	5.695	5.479	5.595	5.599	5.569	0.635	0.655	0.077	0.637	0.638	0.041	0.066
K	0.613	0.458	0.678	0.497	0.355	0.297	0.294	0.500	0.251	0.232	0.876	0.248	0.227	0.980	0.901
Сумма	23.246	23.229	23.152	23.152	22.597	22.807	22.865	22.987	2.945	2.94	2.965	2.916	2.912	3.016	2.998
<i>An</i> , мол.%	14.58	17.80	10.14	19.83	11.31	14.26	14.74	14.54	6.44	5.44	0.00	3.49	4.53	0.97	6.48
<i>Kfs</i>	8.41	6.24	9.45	6.44	5.40	4.32	4.25	7.04	26.50	24.73	91.92	27.04	25.06	95.05	87.14
<i>Nph</i>	77.01	75.96	80.41	73.73	83.29	81.41	81.02	78.42	67.05	69.83	8.08	69.47	70.42	3.98	6.38

Формулы рассчитаны на 32 (ан. 1-8) и 8 (ан. 9-15) атомов кислорода.

1-8 – давидсмитит; 9, 10, 12, 13 – нефелин; 11, 14, 15 – кальсилит.

Таблица А17. Составы фосфидов железа

Компоненты	1420			1412		
	1	2	3	4	5	6
Fe	84.42	85.46	85.04	75.17	88.98	88.91
P	15.98	16.12	15.52	22.89	12.69	12.57
Сумма	100.4	101.58	100.56	98.06	101.67	101.48
	Формульные коэффициенты, ф. ед.					
Fe ⁰⁺	2.982	2.985	3.010	1.937	3.977	3.984
P	1.018	1.015	0.990	1.063	1.023	1.016
Сумма атомов	4.00	4.00	4.00	3.00	5.00	5.00

Формулы фосфидов Fe₂P, Fe₃P и Fe₄P рассчитаны на 3, 4 и 5 атомов (Fe + P) соответственно
 1, 2, 3 – шрейберзит, 4 - баррингерит, 5, 6 – стеадит.

Таблица А18. Составы (мас.%) стекла в паралавах

	Хамарин-Хурал-Хид								Нилгинский комплекс									
	1410				1406		1420		1175		1177		1185				1236	
SiO ₂	56.78	58.85	51.39	58.6	64.33	63.11	60.86	59.62	30.74	37.93	69.38	67.97	28.05	26.83	32.2	26.66	28.05	66.68
TiO ₂			1.15	0.57	1.18	1.18	0.83	0.93	1.1	0.72	2.44	2.05						
Al ₂ O ₃	24.11	21.33	24.83	22.35	9.67	12.38	21.33	20.5	18.4	22.07	13.13	14.1	16.31	14.59	18.46	14.79	16.06	11.41
FeO					4.25	2.89	0.51	0.5	27.27	15.44	1.67	2.97	24.24	13.5	8.26	12.41	12.57	2.79
MnO									1.03	0.68			0.44	0.63		0.65	0.44	
MgO					0.38						0.4			0.6			0.48	
CaO	7.26	3.64	0	4.83	1.8	3.3			8.8	6.1	2.42	3.46	6.87	9.57	9.98	13.75	13.74	1.2
Na ₂ O	6.5	7.47	5.24	7.91	1.95	2.71	7.56	6.65	1.6	3.84	2.41	3.01	2.45	2.62	2.67	2.59	2.32	1.98
K ₂ O	0.39	1.02	4	0.67	3.14	2.65	5.11	4.93	5.35	8.95	4.78	3.6	6.4	5.82	6.94	4.98	5.25	7.42
BaO					1.17	0.82							3.95	3.81	4.3	2.81	2.94	
SrO													2.54	3.04	3.1	3.82	3.87	
P ₂ O ₅					1.17	0.82							0.46	0	0.78	0.78		
Сумма	95.04	92.31	86.61	94.93	89.04	89.86			94.29	95.73	96.63	97.16	91.25	81.47	85.91	83.24	86.50	91.48
A/CNK	0.99	1.07	1.92	0.99	0.98	0.93	1.19	1.26	0.75	0.81	0.97	0.93	0.70	0.52	0.61	0.43	0.47	0.85
NK/A	2.17	1.59	1.92	1.63	1.46	1.69	1.19	1.26	0.46	1.38	1.44	1.59	1.49	1.38	1.55	1.53	1.69	1.01

Мольные отношения: $A/CNK = Al_2O_3 / (CaO + Na_2O + K_2O)$, $A/NK = Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O)$.