

На правах рукописи



**Глушкова Вероника Евгеньевна**

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

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

Иркутск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской Академии Наук (ИГХ СО РАН), г. Иркутск

**Научный руководитель:**

**Перетяжко Игорь Сергеевич**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией генетической минералогии и физико-химической петрологии, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск

**Официальные оппоненты:**

**Плечов Павел Юрьевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, директор Минералогического Музея РАН им. А.Е. Ферсмана, г. Москва

**Дорошкевич Анна Геннадьевна**, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией рудоносности щелочного магматизма, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс

Защита диссертации состоится «18» июня 2024 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета 24.1.053.01 в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, стр.1а.

e-mail: amosova@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГХ СО РАН и на сайте <http://www.igc.irk.ru/ru/zashchita>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.1.053.01  
кандидат химических наук



А.А. Амосова

## **Актуальность исследований**

Пирометаморфизм, вызванный горением органического вещества в осадочных толщах или горных отвалах, относится к высокотемпературному ( $< 3000$  °C) и низкобарическому ( $< 170$  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]. 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 в горных выработках [Wolf, Bruining, 2007]. Пирогенные породы привлекают внимание исследователей как объекты, содержащие новые и редкие минералы [Чесноков и др., 2008; Sokol et al., 2015; Britvin et al., 2018; Krz̄ała et al., 2022; Britvin et al., 2023], а также могут представлять практический интерес как источники нашатыря, квасцов, железных и урановых руд [Калугин, 1991; Пирогенный ..., 2005; Shi et al., 2020].

В Монголии известно много угленосных бассейнов [Erdenetsogt et al., 2009], которые могут рассматриваться как потенциальные области развития процессов пирометаморфизма. Первые детальные минералого-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 исследований**

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 исследований:**

(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 исследования**

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 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). Использовали следующие методы: рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) на флуоресцентном спектрометре Bruker AXS S4 Pioneer и многоканальном X-Ray спектрометре СРМ-25 (породообразующие оксиды), масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме (ICP MS, примесные элементы) на масс-спектрометре NexION 300D (ИГХ СО РАН). Пробы сплавляли для РФА и растворяли для ICP MS анализов путем открытого кислотного разложения. Качество аналитических результатов контролировали по UGS-стандартам и другим аттестованным стандартным образцам.

Петрографическое изучение шлифов пород проводили на оптическом поляризационном микроскопе Olympus BX-51 (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 минералов, металлов и синтетических соединений. Предел обнаружения оксидов был 0.2–0.3 мас.% при средней случайной погрешности в зависимости от их содержаний (мас.%):  $> 10 \pm 0.9$  отн.%,  $1-10 \pm 3.0$  отн.% и  $0.3-1 \pm 13$  отн.% [Лаврентьев и др., 2015]. Методом СЭМ ЭДС выполнено около 10000 анализов минералов и фаз.

Диагностику минералов в породах проводили с помощью рентгенофазового анализа и конфокальной спектроскопии (КР-спектроскопии). Растертые пробы пород анализировали на дифрактометре D8 ADVANCE Bruker, оснащённом детектором VANTEC-1 PSD (ИГХ СО РАН). Диагностику фаз проводили с помощью базы данных PDP-2 (ICDD) и программного обеспечения Bruker EVA. КР-спектроскопию минералов изучали на конфокальном микро-Рамановском спектрометре WITec alpha 300R (WITec GmbH), оснащённом лазером 532 нм Nd:YAG (ИЗК СО РАН). Для идентификации минералов использовали базу RRUFF. 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, аксессуарных и редких минералов пирогенных пород и их сравнение с таковыми из пород иного генезиса (метеориты, магматические, 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 синклинальных 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 направлена в журнал *Materialia*, индексируемый 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), XIX 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.

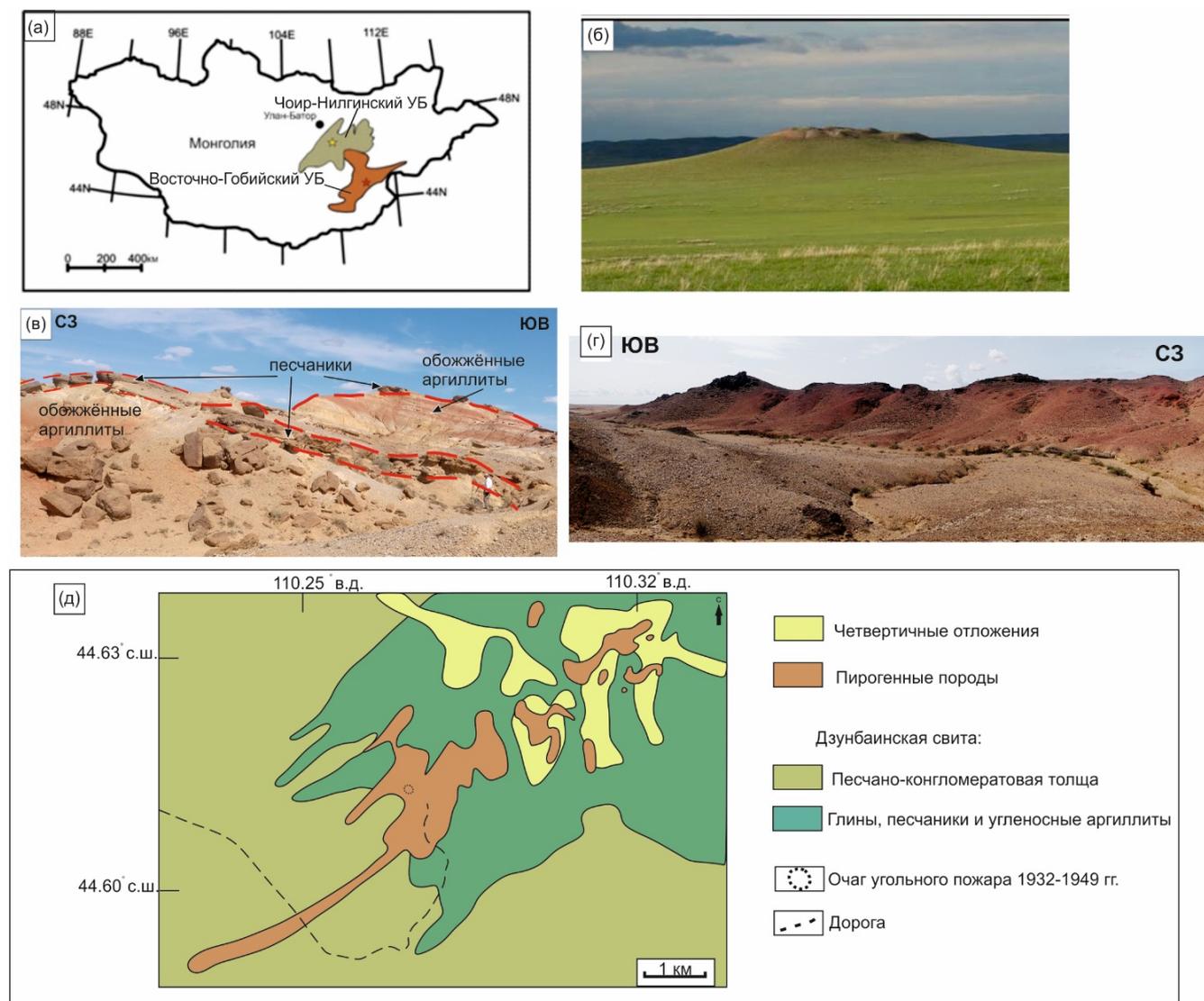
## **Геологическая характеристика пирометаморфических комплексов**

Пирометаморфические комплексы Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид расположены на расстоянии около 300 км друг от друга (Рис. 1, а). Пирогенные породы формировались при подземном горении слоёв бурого угля в осадочных толщах раннемеловой дзунбаинской свиты.

Нилгинский комплекс находится в пределах Чойр-Нилгинского угольного бассейна. Пирогенные породы комплекса слагают вершины трёх останцов высотой до 40 м, а также вскрыты на стенках угольного карьера Тугруг (Рис. 1, б). В нижней части останцов обнажаются глины и алевропесчаники, а в средней и на вершине – обожжённые пелиты, стекловатый клинкер и мелилит-нефелиновая паралава (мощность пирогенной толщи до 10–15 м). Останцы формировались в результате эрозии осадочной толщи вокруг эпицентров (очагов горения) природных угольных пожаров, возраст которых по К-Аг данным < 2 млн лет [Перетяжко и др., 2018].

Комплекс Хамарин-Хурал-Хид расположен в пределах Восточно-Гобийского угольного бассейна (Рис. 1, д). 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. В центральной части комплекса проводилась разведка на проявлении бурого угля вблизи эпицентра подземного угольного пожара 1932-1937 гг. [Шипулин, 1940]. Эрозионные процессы сформировали здесь типичный ландшафт “горельника” (Рис. 1, г). В основании разрезов пирогенной толщи залегают пелиты (глины, алевропесчаники), а выше них – обожжённые и частично плавленые пелиты, а также редкие выходы железистых паралав. На некоторых участках вскрыт слой пирогенных пород мощностью 3–5 м, сложенный спекшимися блоками обожжённого пелита, стекловатого клинкера и мелилит-нефелиновой паралавы. Мощность пирогенных пород центральной зоны достигает 30–50 м. На северо-восточном фланге комплекса 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. В бортах депрессий находятся останцы слоистой осадочной толщи мощностью 30–40 м, сложенной песчаником с карбонатным цементом, глиной и обожжённым пелитом (Рис. 1, в).

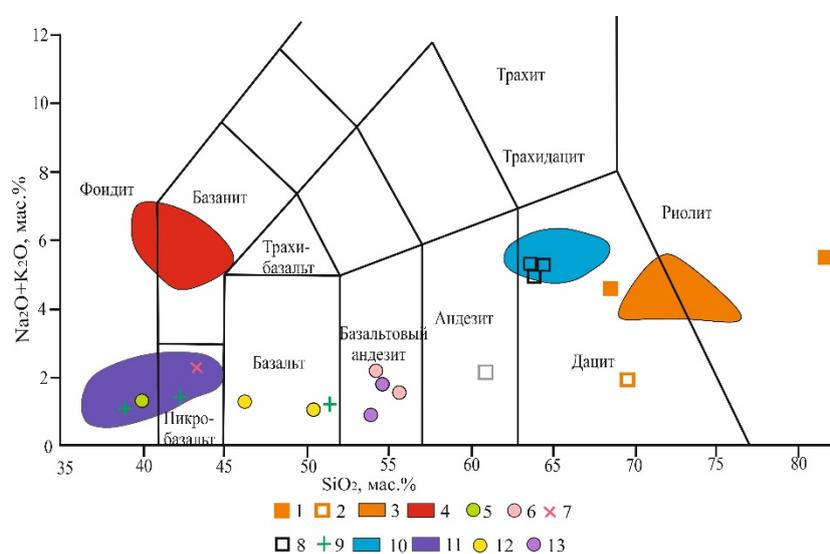


**Рисунок 1.** Угленосные бассейны (УБ) Монголии (а), фрагменты рельефа пирометаморфических комплексов (б-г), схематическая геологическая карта комплекса Хамарин-Хурал-Хид (д).

## Геохимическая характеристика пород

Клинкеры и паралавы формируются в процессе плавления различных типов дегидратированного и декарбонатизированного осадочного протолита под воздействием высоких температур, вызванных пожарами каустобиолитов (угля, битумов, природного газа). Фазовый состав плавящихся 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/заковки расплавов и другими параметрами. До настоящего времени нет общепринятой классификации пирогенных пород. Термин клинкер обычно используют для частично плавящихся метапелитов, содержащих кислородное силикатное стекло [Cosca et al., 1989; Grapes, 2011; Coal and Peat Fires..., 2015]. 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].

Породы пирометаморфических комплексов Монголии демонстрируют широкие вариации концентраций петрогенных оксидов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ), 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, мультиэлементных нормированных к примитивной мантии и хондриту распределениях.

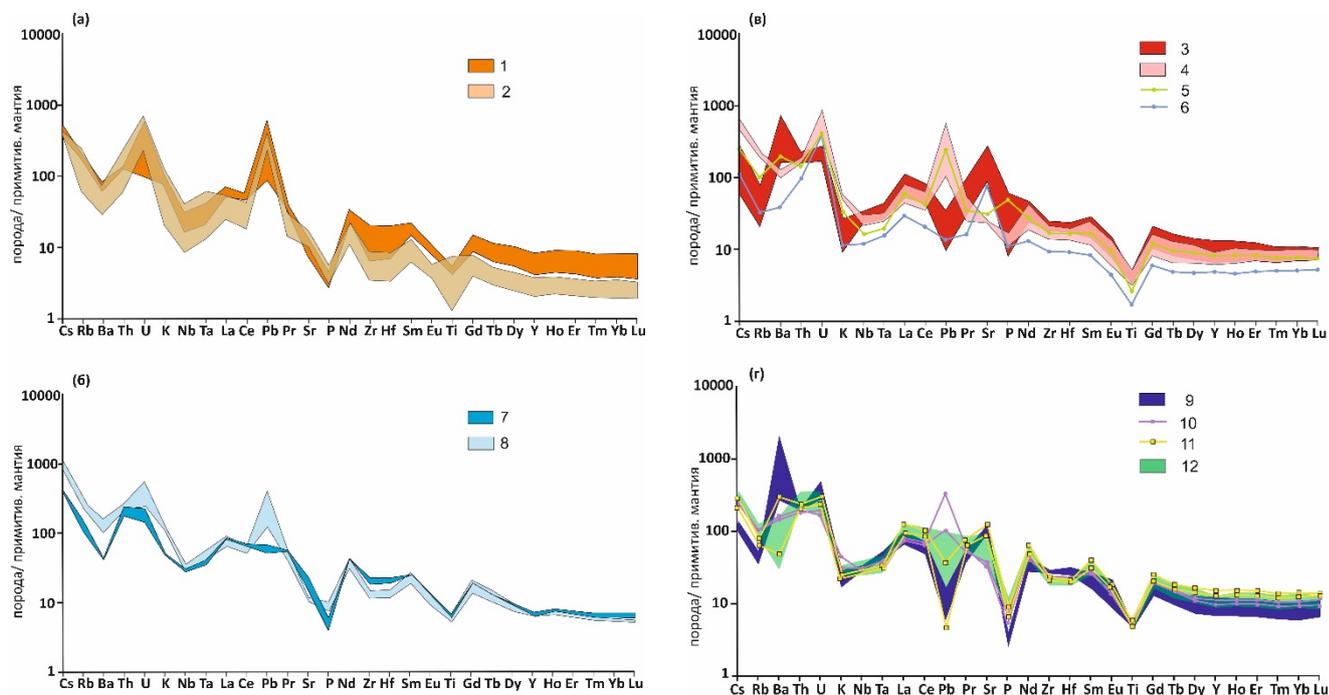


**Рисунок 2.** TAS диаграмма для пород пирометаморфических комплексов.

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.

Хамарин-Хурал-Хид. На TAS диаграмме точки состава пелитов (аргиллита, алевропесчаника), обожжённых пелитов и клинкера находятся в полях дацита и риолита (Рис. 2). Осадочные породы и клинкер имеют близкие формы нормированных к примитивной мантии мультиэлементных распределений с максимумами Cs, U, La, Pb, Nd, Sm, Gd и минимумами Ba, Nb, P, Zr, Hf, Ti, Y (Рис. 3, а). Мелилит-нефелиновые паралавы имеют недосыщенный по  $\text{SiO}_2$  и обогащенный Ca состав при  $\text{Na}_2\text{O}$  (4.5–6.5 мас.%) >  $\text{K}_2\text{O}$  (0.3–0.7 мас.%). Для их мультиэлементных распределений характерны максимумы Ba, U, La, Sr, Sm, Gd и минимумы Rb, K, Pb, P, Ti (Рис. 3, в). Карбонатно-силикатная порода (реликт мергелистого известняка) по сравнению с паралавами

содержит меньше элементов-примесей, имеет форму их распределения, близкую к таковой для паралав (Рис. 3, в). *Железистые паралавы* (тридимит-секанинаитовая и кристобалит-фаялитовая) содержат 17–38 мас.%  $FeO_{общ}$ , имеют близкие формы мультиэлементных распределений с максимумами U, La, Pb и минимумами Nb, Ta, Ti (Рис. 3, в). В более железистых пирогенных породах количество  $Fe_2O_3$  достигает 52 мас.%.



**Рисунок 3.** Мультиэлементные распределения пирометаморфических пород, нормированные к примитивной мантии, по [McDonough, Sun, 1995]. Комплекс Хамарин-Хурал-Хид (а, в): 1 – аргиллит и алевропесчаник; 2 – кристобалитовый клинкер; 3 – мелилит-нефелиновая паралава; 4 – тридимит-секанинаитовая паралава; 5 – кристобалит-фаялитовая паралава; 6 – карбонатно-силикатная порода (реликт мергелистого известняка). Нилгинский комплекс (б, г): 7 – клинкер; 8 – обожжённый аргиллит; 9 – мелилит-нефелиновая паралава; 10, 11 – плагиоклаз-пироксен ± индиалитовая паралава; 12 – карбонатно-силикатные осадочные породы.

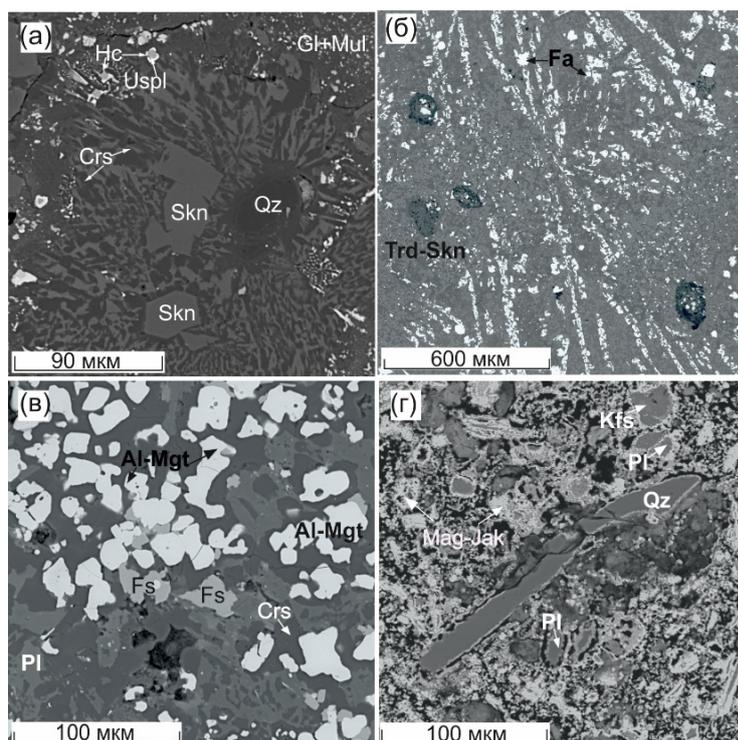
**Нилгинский комплекс.** Для пелитов (аргиллитов, алевропесчаников) и образованных по ним *клинкер*ов характерны близкие валовые составы, попадающие на TAS диаграмме, преимущественно, в поле дацита (Рис. 2). Мультиэлементные распределения пород имеют близкие формы с максимумами Cs, Nd, Pb, Sm, Gd и минимумами Ba, Nb, P, Zr, Hf, Ti (Рис. 3, б). Пиропороды вблизи карьера Тугруг отличаются по составу от таковых на останцах. Точки состава обожжённого аргиллита и клинкера на TAS диаграмме находятся в поле андезита, а на микроэлементных распределениях наблюдаются максимумы Cs, Nd, Sm, Gd и минимумы Ba, P, Zr, Hf, Ti (Рис. 3, б). *Мелилит-нефелиновые паралавы* по составу близки к таковым из комплекса Хамарин-Хурал-Хид, но содержат меньше  $Na_2O$  и  $K_2O$  (Рис. 2, 3, г). По TAS диаграмме *плагиоклаз-пироксеновая паралава* имеет состав базальта, а *плагиоклаз-пироксен-индиалитовая паралава* – базальтового андезита. Для микроэлементных распределений этих паралав характерны максимумы Cs, Nd, Sm, Gd и минимумы Ba, P, Zr, Hf, Ti (Рис. 3, б).

## Минерально-фазовые ассоциации пирогенных пород

### Клинкеры

В комплексе *Хамарин-Хурал-Хид* клинкер слагает кислое стекло (плюмазитовое, A/CNK 1–1.7, A/NK 1–1.8, 2–7 мас.% K<sub>2</sub>O), с включениями новообразованного кристобалита, минералов группы кордиерита, муллита, а также реликтовых зёрен минералов пелитовых пород – детритового кварца, циркона, монацита, ильменита, оксидов Fe и Ti (Рис. 4, а). Минералы группы кордиерита представлены кордиеритом и секанинаитом, встречаются также зональные кристаллы индиалита-ферроиндиалита. Для этих минералов характерна примесь K<sub>2</sub>O до 1.1 мас.%, а в микролитах проявлена ростовая зональность – индекс Mg#, Mg/(Mg+Fe) снижается от центральной (0.23–0.59) к краевой (0.18–0.54) зонам. Раскристаллизованные области матрикса сложены лабрадором-битовнитом *An*<sub>52–80</sub>, ферросилитом и фаялитом, встречаются также микролиты магнетита и герцинита с каймой ульвошпинели и тонкоигольчатые выделения муллита микронных размеров.

*Клинкер Нилгинского комплекса* содержит оплавленные ксенолиты обожжённого аргиллита, кислое стекло (плюмазитовое, A/CNK 1–2, A/NK 1.2–2.3, 2–6 мас.% K<sub>2</sub>O), реликтовые зёрна (детритового кварца, монацита, циркона, ильменита и др.) и новообразованные зональные микролиты индиалита-ферроиндиалита и кордиерита-индиалита [Перетяжко и др., 2018; Peretyazhko, Savina, 2023]. Минералы группы кордиерита содержат до 2.3 мас.% K<sub>2</sub>O и в некоторых образцах клинкера обогащены MnO до 5.4 мас.%.



**Рисунок 4.** Фрагменты матрикса клинкера (а), железистых паралав (б, в) и обогащенных железом пирогенных пород (г) комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

(а) Новообразованные микролиты секанинаита и оплавленное или частично растворённое зерно детритового кварца в матриксе с включениями муллита, кристобалита и герцинита с каймой ульвошпинели. (б) Скопления зёрен фаялита в тридимит-секанинаитовой паралаве. (в) Фрагмент кристобалит-фаялитовой паралавы с включениями Al-магнетита, ферросилита и плагиоклаза. (г) Зёрна кварца и полевых шпатов в агрегате магнетита-якобсита. Изображения BSE.

Crs – кристобалит, Qz – кварц, Skn – секанинаит, Gl – стекло, Mul – муллит, Fa – фаялит, Trd – тридимит, Al-Mag – Al-магнетит, Fs – ферросилит, Pl – плагиоклаз, Kfs – КПШ, Mag-Jak – магнетит-якобсит.

### Железистые паралавы и пирогенные породы комплекса Хамарин-Хурал-Хид

**Фаялит** – порообразующий минерал кристобалит-фаялитовой паралавы. Многочисленные изометричные зёрна фаялита *Fa*<sub>84–89</sub> и Al-магнетита на фоне скрытокристаллического либо стекловатого матрикса образуют структуру спинифекс. Фаялит содержит до 4 мас.% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и часто обогащен Mn (до 14 мол.% минала тефроита).

В тридимит-секанинаитовой паралаве фаялит  $Fa_{79-90}$  – второстепенный минерал. Его зёрна образуют нитевидные скопления длиной  $> 1$  мм (Рис. 4, б).

Полиморфы кремнезёма в железистых паралавах представлены как новообразованными фазами кристобалита и тридимита, так и реликтовыми зёрнами детритового кварца (Рис. 4, в, г). Для кристобалита характерна примесь  $Al_2O_3$  и  $FeO$  в сумме до 1.5 мас.%. В тридимит-секанинаитовой паралаве тридимит образует кайму вокруг оплавленных зёрен кварца и заполняет интерстиции между микролитами секанинаита. Тридимит имеет примеси  $Al_2O_3$  (2–5 мас.%),  $FeO$  (0.5– 2.0 мас.%) и  $K_2O$  ( $< 0.5$  мас.%).

Секанинаит – порообразующий минерал тридимит-секанинаитовой паралавы, содержит до 3.2 мас.%  $MnO$ .

Минералы группы шпинели – второстепенные минералы железистых паралав. В образце кристобалит-фаялитовой паралавы преобладают изометричные зёрна магнетита и  $Al$ -магнетита. В тридимит-секанинаитовой паралаве встречаются также  $Ti$ -магнетит и герцинит. В матриксе железистых паралав находятся микролиты ферросилита и энстатита-ферросилита совместно с лабрадором-битовнитом  $An_{60-80}$  (Рис. 4, в). Ферросилит содержит до 0.4 ф.ед.  $Al$  и до 0.3. ф.ед.  $Mn$ .

Стекло, содержащее 5.9–10.6 мас.%  $K_2O$ ,  $< 3.6$  мас.%  $Na_2O$ ,  $< 1.2$  мас.%  $P_2O_5$  и 3–7 мас.%  $H_2O$ , заполняет интерстиции между фенокристами минералов железистых паралав. В тридимит-секанинаитовой паралаве стекло имеет, преимущественно, плюмазитовый состав ( $A/CNK$  0.9–1.2,  $A/NK$  0.9–1.6), а в кристобалит-фаялитовой паралаве встречается редко и характеризуется метаглиноземисто-агпаитовым составом ( $A/CNK$  0.8–1.0,  $A/NK$  0.9–1.6).

Главными минералами *железистых пирогенных пород* являются гематит и промежуточные члены изоморфного ряда магнетит-якобсит  $MnFe_2O_4$ , содержащие до 17 мас.%  $MnO$  и образующие изометричные выделения размером до 50 мкм в матриксе и кайму вокруг реликтовых зёрен полевых шпатов (Рис. 4, г).

### **Мелилит-нефелиновые, плагиоклаз-пироксеновые ± индиалитовые паралавы**

В составе пирометаморфических комплексов среди паралав преобладают мелилит-нефелиновые разности, фенокристая ассоциация которых представлена основным плагиоклазом,  $Al$ -клинопироксеном и мелилитом. Интерстиции между фенокристами заполнены нефелином или  $Ca$ -нефелином (давидсмититом) и стеклом с включениями микролитов  $Fe$ - $Ca$  оливина ( $Ca$ -фаялита, кирштейнита), шпинели, рёнитакуратита,  $K$ - $Ba$  полевых шпатов (цельзиана, гиалофана), пирротина, кальцита и других более редких минералов. Реже встречаются плагиоклаз-пироксен ± индиалитовые паралавы с порообразующим ортопироксеном (энстатитом-ферросилитом).

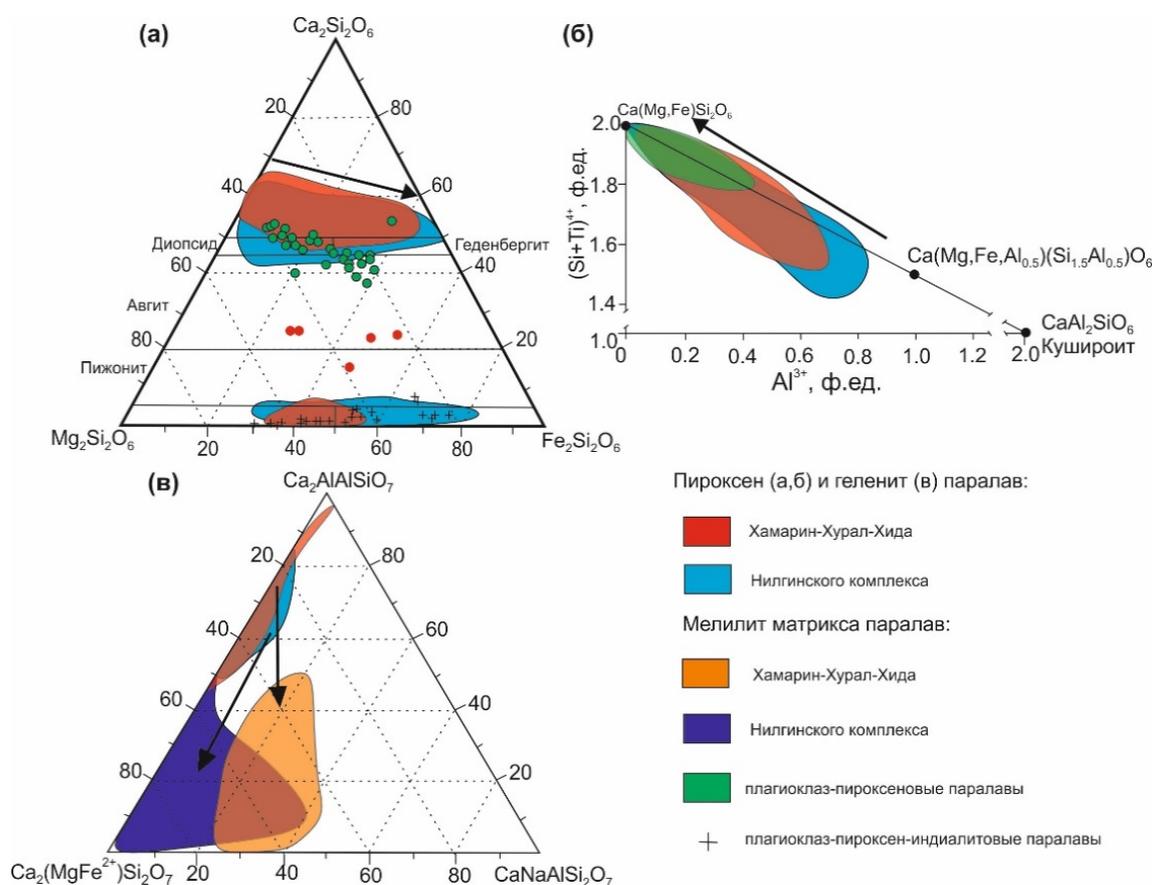
#### *Порообразующие минералы*

Плагиоклаз образует игольчатые микролиты, иногда – фенокристы размером до 0.5 мм. Для паралав комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* характерен лабрадор-битовнит, содержащий до 5 мас.%  $BaO$ . Плагиоклаз мелилит-нефелиновых паралав Нилгинского комплекса соответствует анортиту-битовниту, а плагиоклаз-пироксен ± индиалитовые паралавы вблизи карьера Тугруг сложены анортитом-лабрадором  $An_{73-100}$ . В паралавах часто встречаются  $K$ - $Ba$  полевые шпаты (цельзиан, гиалофан) в виде зёрен размером до 100 мкм в ассоциации с микролитами  $Al$ -магнетита,  $Fe$ - $Ca$  оливина и  $Al$ -клинопироксена.

Минералы группы пироксена характерны для всех разновидностей паралав. Образуют идиоморфные фенокристы размером до 0.5 мм, реже – микролиты, зёрна разной морфологии и удлинённые дендритовые кристаллы. Клинопироксен обогащён Al<sub>VI</sub> до 0.25 ф.ед., что приводит к смещению точек его состава на классификационной диаграмме *Wo–En–Fs* выше полей диопсида и геденбергита (Рис. 5, а). Поэтому, для описания состава Al-клинопироксена применялась диаграмма (Si+Ti)<sup>4+</sup>–Al<sup>3+</sup> и рассчитывалось количество минала кушироита, *Ks* Ca<sub>2</sub>AlAlSiO<sub>6</sub> (Рис. 5, б).

Al-клинопироксен в паралавах комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* содержит (мол.%): *Wo* 22–45, *En* 3–38, *Fs* 3–33, *Ks* 9–42 (Рис. 5, а). Встречаются единичные зёрна авгита и пижонита. В краевой зоне фенокристов возрастает содержание FeO и MnO, снижается Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и MgO (значение Mg# изменяется от 0.8–0.5 до 0.4–0.1). При этом точки состава находятся преимущественно в поле геденбергита, а на диаграмме (Si+Ti)<sup>4+</sup>–Al<sup>3+</sup> располагаются в области (Si+Ti)<sup>4+</sup> > 1.7 ф.ед. (Рис. 5, б).

Al-клинопироксен из паралав *Нилгинского комплекса* имеет следующий состав (мол.%): *Wo* 23–41, *En* 0–49, *Fs* 0–55, *Ks* 4–49 (Рис. 5, а). Центральные зоны фенокристов обогащены Mg (Mg# 0.7–0.75), содержат Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 15–17 мас.%, а краевые – более железистые (Mg# 0.19–0.5) и менее глинозёмистые (7–13 мас.% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Al-клинопироксен содержит 1.4–2 ф.ед. (Si+Ti)<sup>4+</sup> и 0.8–0.03 ф.ед. Al<sup>3+</sup>, а на диаграмме *Wo–En–Fs* поле его состава образует тренд от диопсида с высоким содержанием минала *Ks* до геденбергита (Рис. 5, а, б). В плагиоклаз-пироксеновой паралаве зональные зёрна Al-клинопироксена имеют состав (мол.%): 31–43 *Wo*, 8.5–38 *En*, 7–49 *Fs*, 3.5–20 *Ks*. Минерал содержит до 0.5 ф.ед. Al<sup>3+</sup> при (Si+Ti)<sup>4+</sup> > 1.7 ф.ед. (Рис. 5, б).

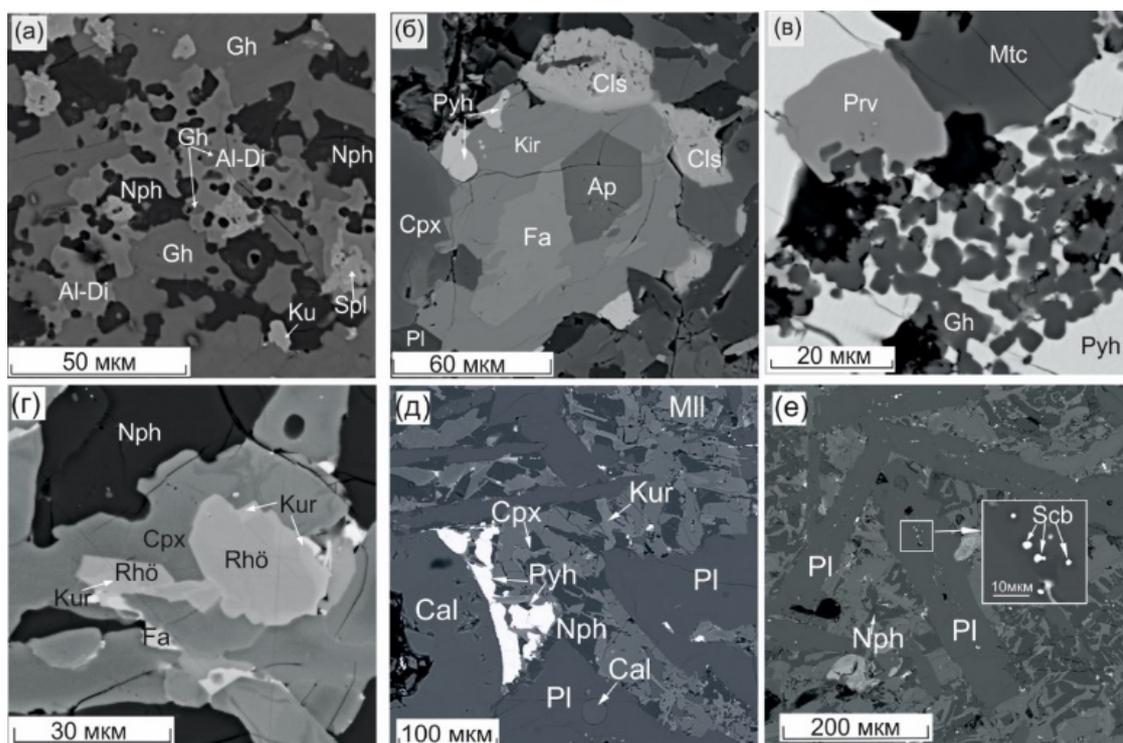


**Рисунок 5.** Составы минералов группы пироксена (а), эволюция состава Al-клинопироксена (а, б) и минералов группы мелилита (в). Стрелками показано направление эволюции состава минералов от ранних к поздним генерациям.

Ортопироксен (энстатит-ферросилит) – порообразующий минерал плагиоклаз-пироксен ± индиалитовой паралавы. Энстатит-ферросилит образует тонкоигольчатые кристаллы, содержащие (мол.%): < 1 *Wo*, 13–55 *En*, 24–71 *Fs*, 9–19 *Ks*. На диаграмме  $(\text{Si}+\text{Ti})^{4+}-\text{Al}^{3+}$  точки его состава находятся вблизи минала  $\text{CaR}^{2+}\text{Si}_2\text{O}_6$  ( $\text{R} = \text{Mg}^{2+}+\text{Fe}^{2+}$ ) при значении  $(\text{Si}+\text{Ti})^{4+} > 1.8$  ф.ед. (Рис. 5, а, б).

Минералы группы мелилита образуют фенокристы размером до 0.5 мм и характеризуются значительными вариациями состава, который был рассчитан на пять миналов: *Ak*, акерманит  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$ ; *Aak*, 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*,  $\text{CaNaFe}^{3+}\text{Si}_2\text{O}_7$ .

Диапазон концентраций миналов в мелилите паралав комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* следующий (мол.%): 4–92 *Gh*, 13–58 *Ak*, 0–54 *Aak*, 0–34 *Fe2-Ak*, 0–21 *Fe3-Ak* (Рис. 5, в). Преобладают миналы *Ak*, *Aak* и *Gh*, сумма которых в большинстве анализов > 90 мол.%. Фенокристы мелилита от центра к краю становятся более железистыми, менее глиноземистыми 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*. Наряду с железистым акерманитом-алюмоакерманитом, слагающим матрикс паралав, в реликтах ксенолитов мергелистого известняка находятся геленит (43–92 мол.% *Gh*), монтичеллит-кирштейнит, перовскит, Al-шпинель и Al-диопсид, содержащий до 42 мол.% *Ks* (Рис. 6, а).



**Рисунок 6.** Фрагменты мелилит-нефелиновых паралав (б, г-е) и реликтов ксенолитов мергелистого известняка (а, в). (а) Фрагмент реликта ксенолита, сложенного геленитом и Al-диопсидом, Хамарин-Хурал-Хид; (б) продукты распада твердого раствора Ca-Fe оливина на Ca-фаялит и кирштейнит с включением апатита, Хамарин-Хурал-Хид; (в) монтичеллит в ассоциации с перовскитом и геленитом в реликте ксенолита мергелистого известняка, Нилгинский комплекс; (г) зёрна рёнита с внешней зоной куратита в Al-клинопироксене, Хамарин-Хурал-Хид; (д) включение кальцита в плагиоклазе и фрагмент кальцитово́й глобулы, Хамарин-Хурал-Хид; (е) включения шрейберзита в плагиоклазе, Хамарин-Хурал-Хид. Изображения BSE.

Al-Di – Al-диопсид, Gh – геленит, Kur – куратит, Spl – шпинель, Pyh – пирротин, Fa – Ca-фаялит, Kir – кирштейнит, Cpx – клинопироксен, Ap – апатит, Cls – цельзиан, Mtc – монтичеллит, Prv – перовскит, Rhö – рёнит, Cal – кальцит, Mll – мелилит, Scb – шрейберзит.

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*. Преобладают магнезиальные разности (Mg# 0.7–0.8). Фенокристы зональные содержат (мол.%): 4–20 *Fe2-Ak*, 15–47 *Gh* в центральной и 24–36 *Fe2-Ak*, 8–11 *Gh* в краевой зонах (Рис. 5, в). Реликты ксенолитов мергелистых известняков в паралавах сложены геленитом, содержащим до 80 мол.% *Gh*, перовскитом, Al-шпинелью, монтichelлитом-кирштейнитом и кальцитом (Рис. 6, в).

#### *Второстепенные, акцессорные и редкие минералы*

Минералы группы шпинели образуют идиоморфные микролиты, которые встречаются в виде включений в фенокристах плагиоклаза и Al-клинопироксена, в интерстициях между фенокристами и в реликтах ксенолитов карбонатно-силикатных осадочных пород.

В паралавах *Хамарин-Хурал-Хида* преобладают шпинелиды, отвечающие по составу плеонасту и Fe-плеонасту, а в паралавах *Нилгинского комплекса* – шпинели и плеонасту. Наиболее магнезиальная шпинель, содержащая до 28 мас.% MgO, встречается только в ксенолитах мергелистого известняка.

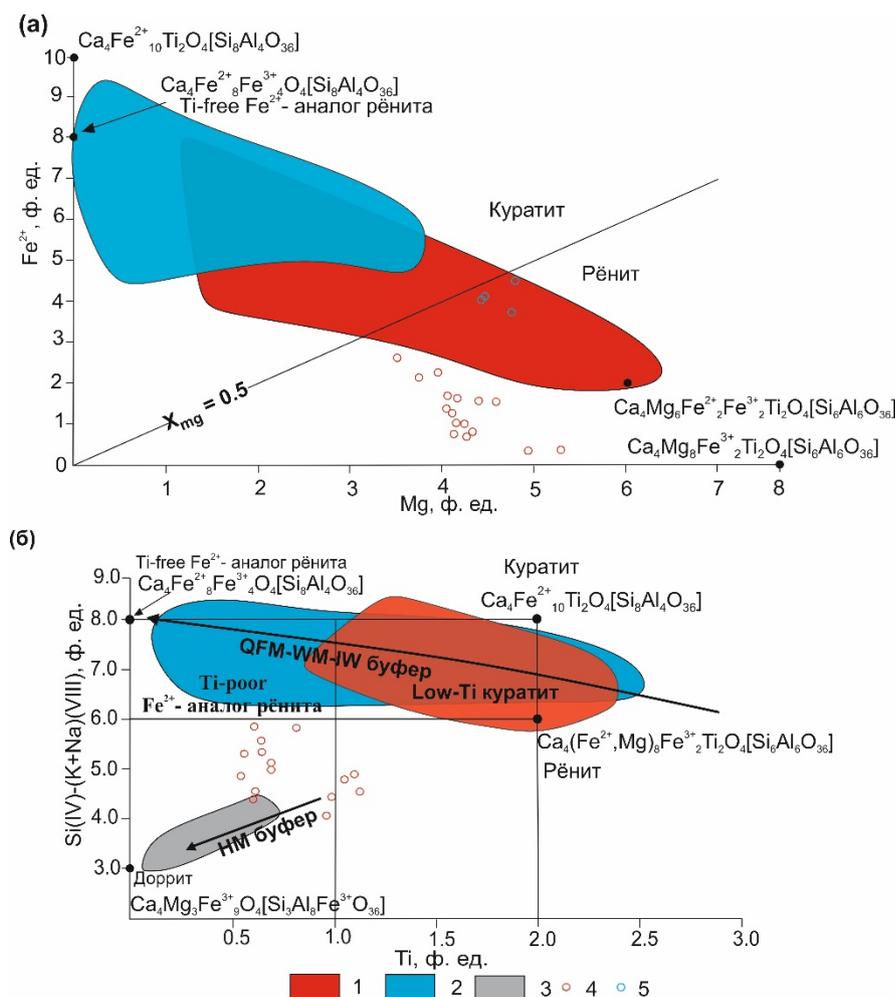
Минералы группы оливина разнообразны по составу. В плагиоклаз-пироксеновой паралаве комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* находятся редкие зёрна гортонолита *Fo*<sub>45–52</sub>. Оливины из мелилит-нефелиновых паралав представлены, в основном, продуктами распада твердого раствора Fe-Са оливина на Са-фаялит и кирштейнит и образуют изометричные выделения размером до 100 мкм, в которых Са-фаялит преобладает над кирштейнитом (Рис. 6, б). Количество минала кальциоливина (*Caol*) изменяется от 7 до 13 мол.% в Са-фаялите и от 35 до 43.5 мол.% в кирштейните. Значение Mg#, Mg/(Mg+Fe) в кирштейните варьирует от 0.1 до 0.2. Зёрна промежуточного состава между кирштейнитом и монтichelлитом в ассоциации с геленитом и другими минералами встречаются только в реликтах ксенолитов мергелистого известняка в мелилит-нефелиновых паралавах. В таком оливине содержание минала кирштейнита составляет 60–68 мол.% (Mg# 0.3–0.7).

В мелилит-нефелиновых паралавах *Нилгинского комплекса* встречаются микролиты Са-форстерита *Fo*<sub>85–94</sub>, содержащего до 6 мол.% *Caol*. Обособления Са-фаялита и кирштейнита размером до 200 мкм находятся во многих образцах паралав. Содержания миналов *Caol* и *Fa* составляют 5–15 и 43–86 мол.% в Са-фаялите и 37–45, 34–56 мол.% в кирштейните, соответственно. В кирштейните значение Mg# 0.15–0.3 (в единичных анализах – 0.55). Монтichelлит и разности промежуточного состава между монтichelлитом и кирштейнитом в ассоциации с геленитом (до 80 мол.% *Gh*), перовскитом, магнетитом и пирротинном слагают реликты ксенолитов мергелистого известняка (Рис. 6, в). В зёрнах монтichelлита-кирштейнита величина Mg# изменяется значительно от 0.9 до 0.4, а содержание минала *Caol* варьирует от 53 до 48 мол.%.

Минералы группы рёнита из подгруппы сапфирина изоморфной серии 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  $\text{Ca}_4\text{Fe}^{2+}_{10}\text{Ti}_2\text{O}_4\text{Si}_8\text{Al}_4\text{O}_{36}$  обнаружены только в мелилит-нефелиновых паралавах. В паралавах комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* рёнит-куратит образует включения в Al-клинопироксене и мелилите (Рис. 6, г). Большинство точек его состава находится в поле рёнита ( $X_{\text{Mg}}$ , Mg/(Mg+Fe<sup>2+</sup>) 0.5–0.9) на диаграмме Mg–Fe<sup>2+</sup> (Рис. 7, а). Во внешней зоне фенокристов значение  $X_{\text{Mg}}$  обычно снижается до 0.13 и точки состава минерала смещаются в область низкотитанового куратита (< 2 ф.ед. Ti, < 3 ф.ед. Fe<sup>3+</sup>), потенциально нового минерала. Встречается также рёнит, содержащий 4–7 ф.ед. Fe<sup>3+</sup>: на диаграмме Ti<sub>(VI)</sub>–(Si-Na-K) точки состава этого минерала

находятся вблизи доррита  $\text{Ca}_4\text{Mg}_3\text{Fe}^{3+}_9\text{O}_4\text{Si}_3\text{Al}_8\text{Fe}^{3+}\text{O}_{36}$  при Si 4–6 ф.ед. и Ti < 1 ф.ед. (Рис. 7, б). В паралавах *Нилгинского комплекса* минералы данной серии представлены, в основном, куратитом,  $X_{\text{Mg}} < 0.45$  (Рис. 7, а), а редкие микролиты рёнита обнаружены только в одном образце.

На завершающей стадии формирования матрикса мелилит-нефелиновых паралав в интерстициях между фенокристами кристаллизовался нефелин (*Нилгинский комплекс*) либо давидсмитит  $(\text{Ca}\square)_2\text{Na}_6\text{Al}_8\text{Si}_8\text{O}_{32}$  (*Хамарин-Хурал-Хид*) – Ca-нефелин, содержащий до 7 мас.% CaO. В составе минералов группы нефелина соотношение Si/Al 1.1–1.5, сумма Si и Al 15.7–15.8 ф.ед. и Na < 5.8 ф.ед. В некоторых образцах Нилгинских паралав встречается кальсилит в сростаниях с нефелином и в виде отдельных зёрен.



**Рисунок 7.** Составы минералов рёнит-куратитовой серии на диаграммах  $\text{Fe}^{2+}$  – Mg (а) и  $\text{Si}^{(\text{IV})}$  –  $(\text{Na} + \text{K})_{(\text{VIII})}$  –  $\text{Ti}^{(\text{VI})}$  (б), по [Peretyazhko et al., 2017] с дополнениями. (1 и 4) Хамарин-Хурал-Хид, (2 и 5) Нилгинский комплекс, (3) породы разного генезиса, по [Foit et al., 1987; Cosca et al., 1988].

Кальцит часто находится в матриксе мелилит-нефелиновых паралав в виде округлых глобул диаметром до 300 мкм или выделений неправильной формы в реликтах ксенолитов мергелистого известняка. Обнаружены также многочисленные фенокристы плагиоклаза, Al-клинопироксена и мелилита с округлыми включениями кальцита диаметром до 20 мкм (Рис. 6, д).

В матриксе мелилит-нефелиновых паралав комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* иногда встречаются округлые выделения самородного Fe диаметром до 100–150 мкм. В центральной (ранней) зоне фенокристов плагиоклаза обнаружены включения микронных размеров фосфидов Fe – шрейберзита  $\text{Fe}_3\text{P}$  (Рис. 6, е), баррингерита  $\text{Fe}_2\text{P}$  и steadита  $\text{Fe}_4\text{P}$  (эвтектики  $\alpha\text{-Fe}$  и  $\text{Fe}_3\text{P}$ ). Округлые мелкие включения шрейберзита

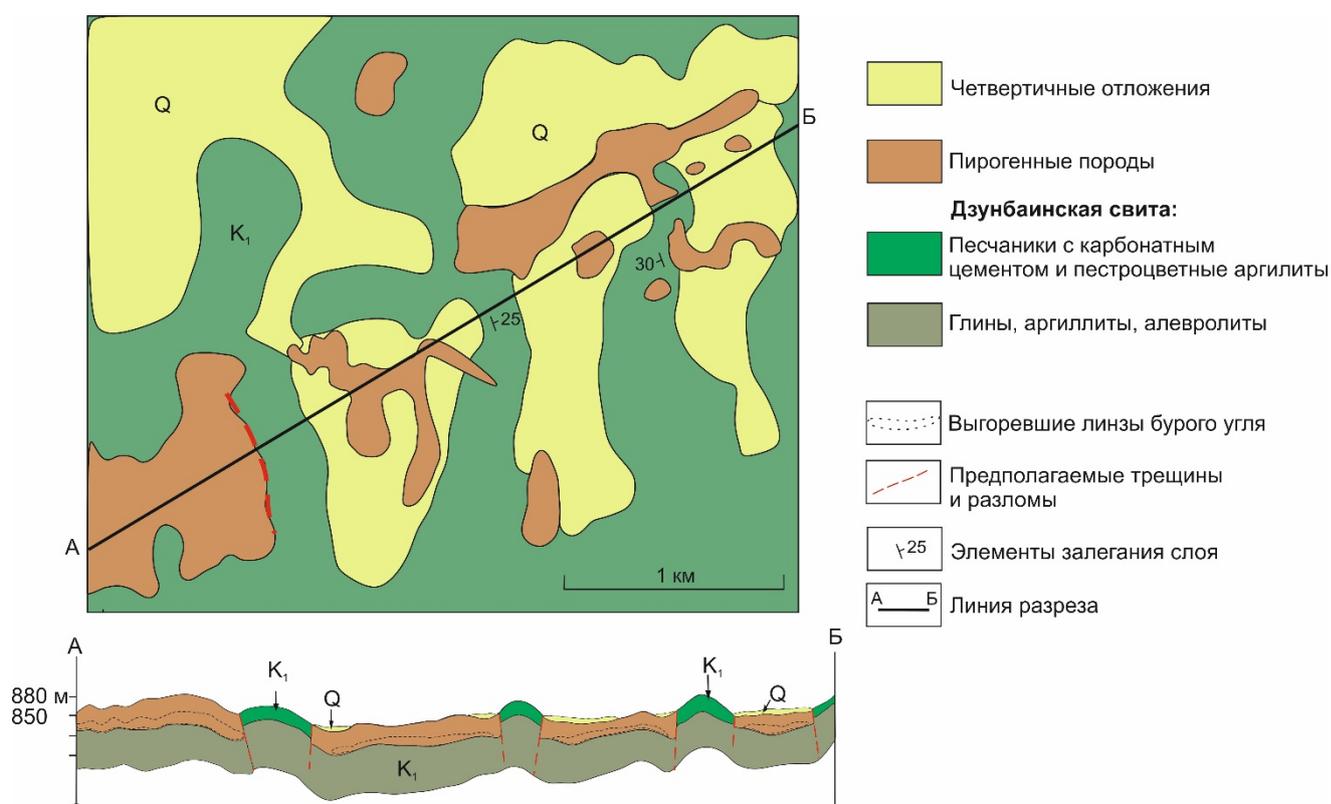
совместно с самородным Fe и пирротинном обнаружены также в силикатном калиевом стекле ксенолитов пелитовых пород [Савина и др., 2020].

В интерстициях между минералами матрикса паралав встречается силикатное стекло. В паралавах комплекса *Хамарин-Хурал-Хид* стекло кислое, преимущественно, плюмазитовое (А/СНК 1–1.9, А/НК 1.2–3, 3–8 мас.% K<sub>2</sub>O, 2–5 Na<sub>2</sub>O мас.%) с суммой в анализах 86–94 мас.% (содержит воду по данным КР-спектроскопии). В плагиоклаз-пироксеновой паралаве стекло метаглинозёмистое (А/СНК 0.8–0.9, А/НК 1.2–1.7), содержит до 1.3 мас.% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> при сумме в анализах 80–95 мас.%. Стекло в паралавах *Нилгинского комплекса* имеет значительные вариации состава, но преобладает кислое, метаглинозёмистое (А/СНК 0.6–1.0, А/НК 1–1.7, 4–7 мас.% K<sub>2</sub>O, 1.5–3.5 мас.% Na<sub>2</sub>O) с суммой в анализах 85–90 мас.% (содержит воду).

## Сравнительный анализ минеральных ассоциаций пирогенных пород и процессы образования пирометаморфических комплексов

### Особенности геологического строения пирометаморфических комплексов

В Нилгинском комплексе пирогенные породы обнаружены на трёх останцах частично плавленной осадочной толщи (Рис. 1, б), где, вероятно, находились эпицентры природных четвертичных (< 2 млн лет) угольных пожаров. Стекловатые клинкеры, обожжённые пелиты и залегающие под ними глина и алевропесчаник сохранились после эрозии раннемеловых осадочных пород вокруг останцов.



**Рисунок 8.** Геологическая схематическая карта и разрез северо-восточной части комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

Анализ геологического строения комплекса Хамарин-Хурал-Хид с учётом данных бурения [Шипулин, 1940] и особенностей развития и строения пирометаморфических

комплексов [Пирогенный ..., 2005] позволил построить схематический геологический разрез (Рис. 8). В центральной части комплекса обнажается осевой фрагмент антиклинальной складки, осложненной на крыльях складками меньшего порядка, прогибами с пологим углом залегания пород осадочной толщи и линзами бурого угля. Центральная часть комплекса отделена от северо-восточной крутопадающим сбросом. Природные пожары происходили при самовозгораниях бурого угля, по-видимому, вызванных процессами окисления сульфидной серы пирита (горение поддерживалось поступлением атмосферного кислорода по трещинным зонам в осадочной толще). Фронт пожаров продвигался по угольным слоям от флангов линз к их центральным частям, где мощность угля была максимальной. После выгорания угля произошло оседание вышележащих пирогенно измененных пород и сформировались три депрессии, частично перекрытые четвертичными отложениями, ограниченные сбросами на контакте с останцами неизменённых осадочных пород (Рис. 1, в-д, 8).

### **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.

Среди пирогенных пород преобладают обожжённые пелиты (аргиллиты, алевролиты, алевропесчаники) и клинкеры, содержащие фрагменты пелитов и стекло с включениями новообразованных минералов, а также многочисленные реликтовые зёрна минералов осадочных пород. Концентрации петрогенных компонентов и примесных элементов в клинкере, термически изменённых и не изменённых пелитовых породах имеют близкие значения (Рис. 3. а, б).

Протолитом для железистых паралав были пелиты (аргиллиты, алевропесчаники), в разной степени обогащенные железом. Железистые паралавы формировались из силикатно-железистого расплава после полного либо частичного плавления таких осадочных пород.

Тридимит-секанинаитовые паралавы сложены К-содержащим секанинаитом, тридимитом, Ti-магнетитом, ферросилитом, фаялитом, образующим структуру спинифекс матрикса, и кислым калиевым алюмосиликатным 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, г) по минеральному составу похожи на таковые из горельников Кендерлыкской впадины [Калугин и др., 1991].

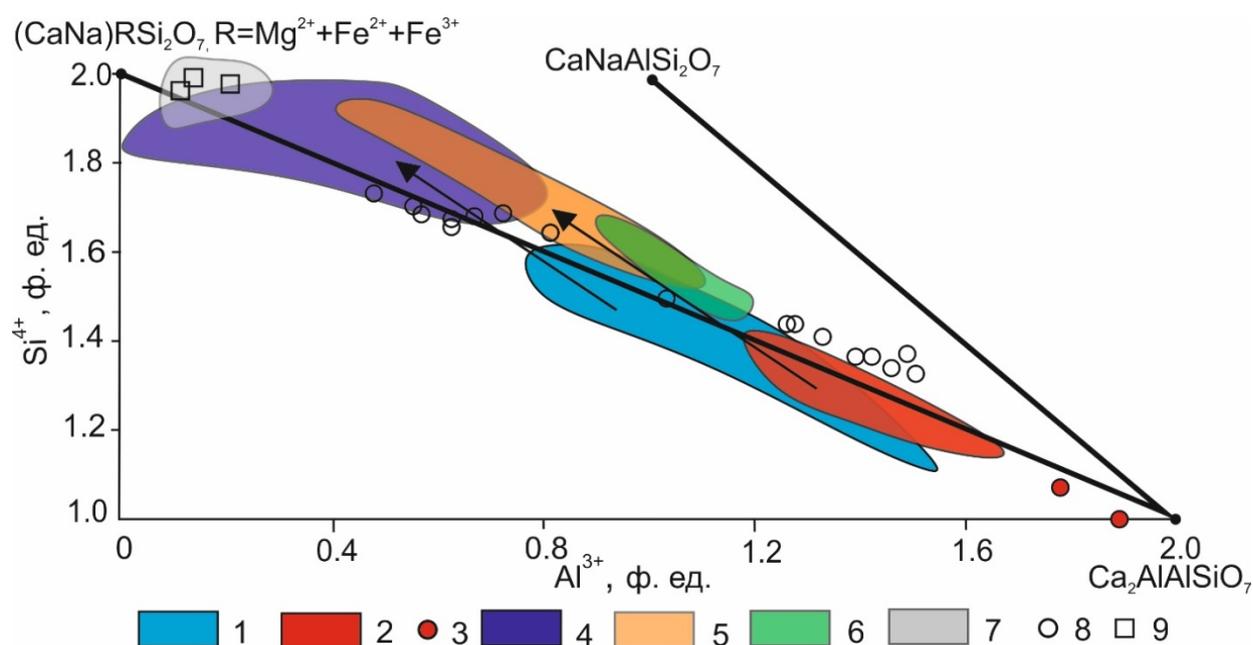
Мелилит-нефелиновые паралавы содержат породообразующие минералы – зональные фенокристы Al-клинопироксена и мелилита, эволюция состава которых от центра к краевым зонам сопровождается снижением глиноземистости (Рис. 5).

Al-клинопироксен имеет состав диопсида-геденбергита с примесью минала кушироита до 49 мол.%. Al-клинопироксен в паралавах близок по составу к таковому в парабазальтах [Пирогенный..., 2005], бухитах [Kruszewski et al., 2018] и пирометаллургических шлаках [Warchulski et al., 2016].

Железистый акерманит-алюмоакерманит с примесью геленита *Gh* до 18 мол.%, а также зональные фенокристы мелилита, в центральном ядре которых содержится до 40–47 мол.% *Gh*, слагают матрикс мелилит-нефелиновых паралав. Геленит (70–92 мол.% *Gh*) в ассоциации с Al-диопсидом, монтичеллитом-кирштейнитом, перовскитом, кальцитом и другими минералами обнаружен только в реликтах ксенолитов

мергелистого известняка. Минералы ряда геленит–акерманит 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; Девятярова, 2022] (Рис. 9).

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].



**Рисунок 9.** Эволюция состава мелилита в паралавах.

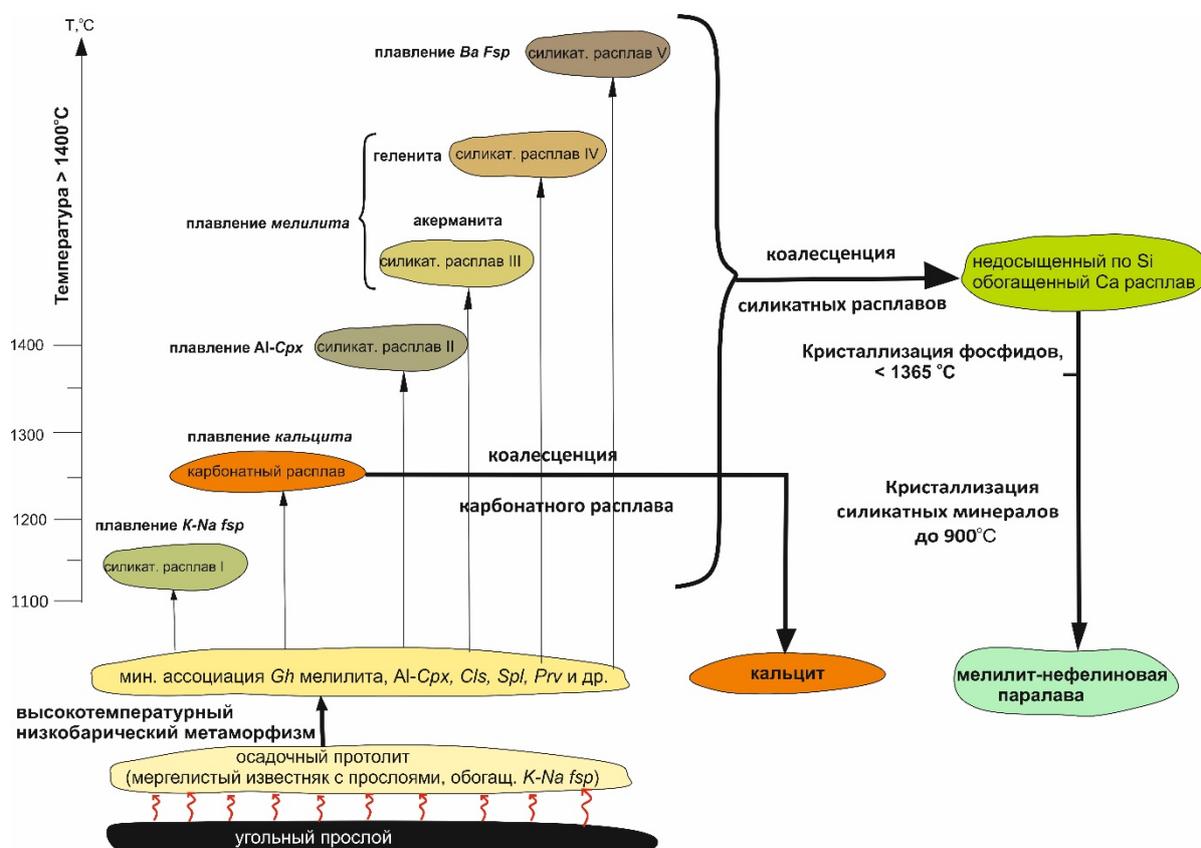
(1 и 2) Геленит из центральной зоны фенокристов: Нилгинский комплекс (1), Хамарин-Хурал-Хид (2). 3 – Геленит, содержащий 88–92 мол.% *Gh*, из реликта ксенолита мергелистого известняка, Хамарин-Хурал-Хид. (4 и 5) Фенокристы: Нилгинский комплекс (4), Хамарин-Хурал-Хида (5). 6 – Мелилит из вулканических 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 миналов  $Ca_2MgSi_2O_7$ ,  $Ca_2Fe^{2+}Si_2O_7$  и  $CaNaFe^{3+}Si_2O_7$ .

### Условия кристаллизации минералов пирогенных пород

Новообразованными минералами в клинкерах являются К-содержащие минералы группы кордиерита, представленные фенокристами индиалита с каймой ферроиндиалита либо кордиерита с внешней зоной индиалита (*Нилгинский комплекс*), а также фенокристами кордиерита-секанинаита и индиалита-ферроиндиалита (*Хамарин-Хурал-Хид*). Наличие в клинкерах минералов группы кордиерита в гексагональной модификации (индиалита, ферроиндиалита) позволяет 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. Многочисленные находки оплавленных зёрен детритового кварца в

ассоциации с новообразованным кристобалитом в этой породе свидетельствуют, что температура пирогенных изменений пелитов локально превышала 1300–1400 °С и, возможно, достигала поля устойчивости стабильной фазы β-кристобалита (> 1470 °С), по [Peretyazhko, Savina, 2023].



**Рисунок 10.** Качественная модель формирования мелилит-нефелиновых паралав.

Экспериментальные данные по температуре плавления минералов, по [Peretyazhko et al., 2021].

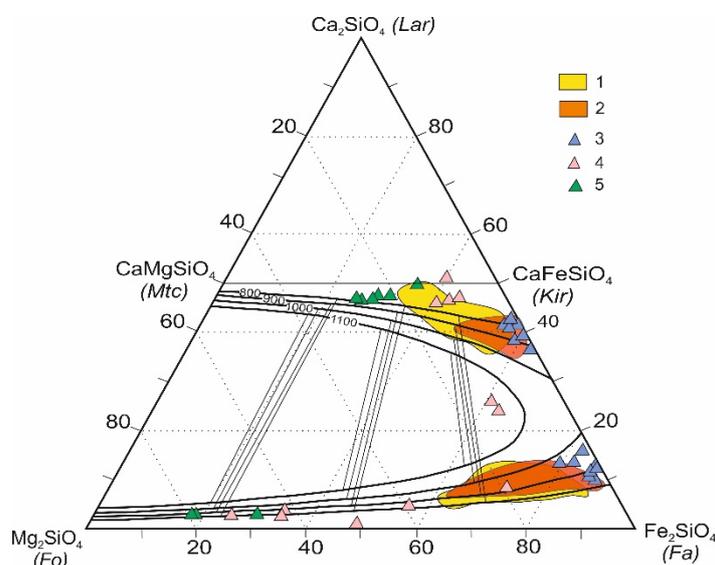
*Ba Fsp* – Ba-содержащий полевои шпат, *K-Na Fsp* – K-Na полевои шпат. Остальные обозначения см. Рис. 6

В результате твердофазовых термических преобразований и частичного плавления мергелистых известняков формировались мафические расплавы, исходные для мелилит-нефелиновых паралав (Рис. 10). По качественной петрологической модели, впервые представленной в [Peretyazhko et al., 2021], на стадии высокотемпературного низкобарического метаморфизма в *P-T* условиях стабильности кальцита в мергелистом известняке кристаллизовались Al-клинопироксен и мелилит (геленит). Твердофазовые минеральные трансформации (пирогенный метаморфизм) мергелистого известняка происходили до температуры ~1100 °С, при которой началось плавление K-Na полевых шпатов. В более высокотемпературных условиях (> 1250 °С) 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 силикатных с большими вариациями состава. Этот вывод подтверждается находками кальцитовых глобул в матрице паралав и кальцита в расплавных включениях, захваченных в процессе роста фенокristов породообразующих минералов (Рис. 6, д), а также детальным изучением минерально-фазовых особенностей образцов

термически измененного и частично расплавленного мергелистого известняка, содержащего фрагменты закристаллизованного кальцитового расплава и многочисленные глобулы силикатных стёкол с большими вариациями состава [Peretyazhko et al., 2021]. В результате слияния расплавов, образованных при плавлении силикатных минералов в мергелистом известняке, формировался недосыщенный по кремнезёму и обогащенный Са расплав, из которого в дальнейшем кристаллизовалась мелилит-нефелиновая паралава (Рис. 10). 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. 6, а, в).

Находки включений наиболее высокотемпературного фосфида Fe (баррингерита) в центральной (ранней) зоне роста фенокристов плагиоклаза из мелилит-нефелиновых паралав свидетельствуют о начале кристаллизации расплава паралав в крайне восстановительных условиях при  $T \sim 1365$  °С.

В мелилит-нефелиновых паралавах комплекса Хамарин-Хурал-Хид 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). Из анализа экспериментальных данных [Peretyazhko et al., 2017] следует, что рёнит-куратит Хамарин-Хурал-Хида кристаллизовался в восстановительных условиях при  $T \sim 1100$ °С, а образование рёнита, содержащего до 5–6 ф.ед.  $Fe^{3+}$ , происходило 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. 7, б).

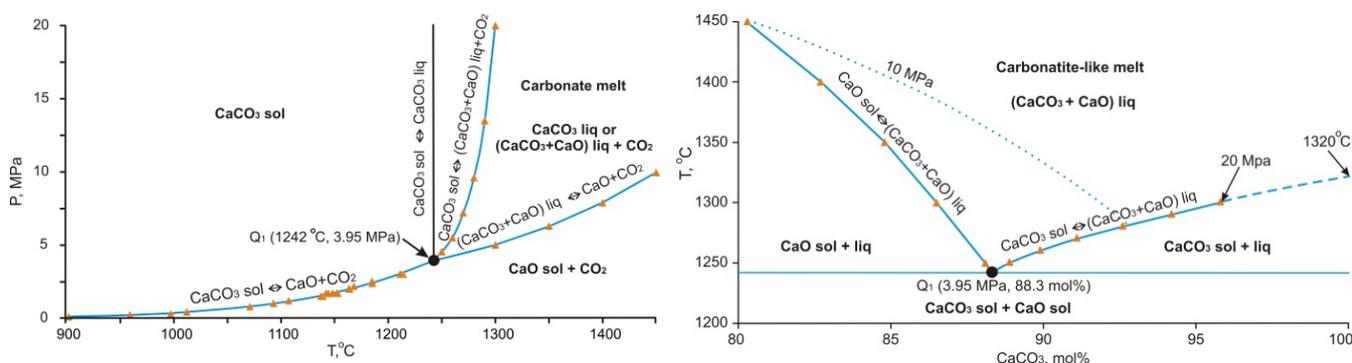


**Рисунок 11.** Поля и точки состава Fe-Ca оливинов из мелилит-нефелиновых паралав, вулканических пород и парабазальтов. Изотермы в области несмесимости твердого раствора оливина, составы сосуществующих фаз (тонкие линии между изотермами), по [Davindson, Mukhopadhyay, 1984]. Поля состава продуктов распада твердого раствора оливина на Са-фаялит и кирштейнит в 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 [Шарьгин, 2011].

Минералы группы оливина в мелилит-нефелиновых паралавах представлены, в основном, продуктами распада твердого раствора Fe-Ca 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 областях матрикса паралав. В мелилит-нефелиновых паралавах Нилгинского комплекса и Хамарин-Хурал-Хида температурный диапазон кристаллизации Fe-Са оливинов согласно экспериментально определенной поверхности сольвуса, по [Davindson, Mukhopadhyay, 1984] составляет 1050–800 °С и 1000–800 °С соответственно, а в парабазальтах Челябинского угольного бассейна – от 950 °С до 800 °С [Sokol et al., 2002] (Рис.11).

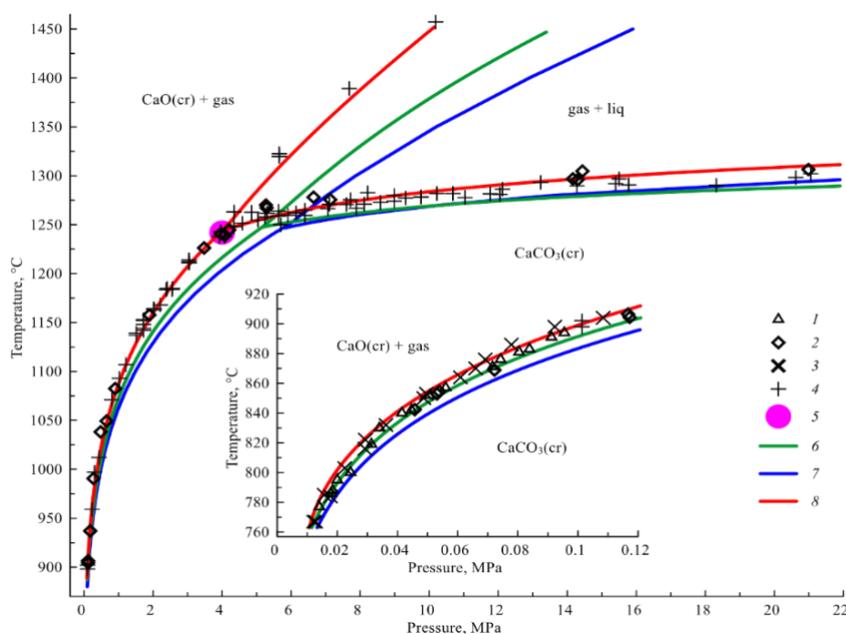
Анализ качественной петрологической модели формирования мелилит-нефелиновых паралав, впервые представленной в [Peretyazhko et al., 2021], требует верификации методами физико-химического моделирования. Целью данного моделирования должна быть реконструкция  $P$ - $T$  условий последовательных стадий пирогенных трансформаций карбонатно-силикатных пород, в частности, мергелистого известняка: низкобарического пирогенного метаморфизма, инконгруэнтного плавления кальцита и новообразованных минералов (Al-клинопироксена, геленита и др.), при котором образуются несмесимые расплавы – карбонатный и несколько силикатных различного состава (Рис. 10).



**Рисунок 12.** Низкобарическая область фазовой диаграммы  $\text{CaCO}_3$  по экспериментальным данным [Baker, 1962] и термодинамическим расчётам, по [Kerley, 1989; Ivanov, Deutsch, 2002; Lindberg, Chartrand, 2009] в координатах  $P$ - $T$  и  $T$ - мольный состав, по [Peretyazhko et al., 2021].

При таком моделировании необходимо учитывать фазовые переходы кальцита в низкобарической ( $< 100$  МПа) высокотемпературной ( $> 900$  °С) области. На основе экспериментальных данных [Baker, 1962] была построена фазовая диаграмма кальцита для низкобарической области в координатах  $P$ - $T$  и  $T$ - мольный состав (Рис. 12). По этой диаграмме в определённых  $P$ - $T$  условиях происходит разложение кальцита с образованием СаО и  $\text{CO}_2$ . В инвариативной точке  $Q_1$  ( $1242 \pm 3$  °С,  $3.95 \pm 0.5$  МПа) в равновесии находятся СаО,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CO}_2$  и карбонатный расплав, имеющий состав 88.3 мол.%  $\text{CaCO}_3$  и 11.7 мол.% СаО. Из термодинамических расчётов [Kerley, 1989; Ivanov, Deutsch, 2002] следует, что плавление кальцита может происходить как конгруэнтно с образованием стехиометрического кальцитового расплава (кальцит  $\leftrightarrow$   $\text{CaCO}_3$  расплав), так и инконгруэнтно с образованием нестехиометрического карбонатного расплава ( $\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$ ) (Рис. 12).

Используя программный комплекс «Селектор», были уточнены термодинамические свойства кальцита и кальцитового расплава, учитывающие влияние давления [Tupitsyn et al., 2024]. В результате моделирования была построена фазовая диаграмма кальцита в низкобарической области, воспроизводящая экспериментальные данные (Рис. 13). В дальнейшем, мы надеемся, это позволит моделировать 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 Ca, исходные для мелилит-нефелиновых и других паралав.



**Рисунок 13.** Низкобарическая область фазовой диаграммы CaCO<sub>3</sub>, 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 – Расчетные данные, по [Lindberg, Chartrand, 2009]. Результаты моделирования в программном комплексе «Селектор»: 7 – без учёта и 8 – с учётом влияния давления.

## 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. 8) 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 сопровождалась процессами частичного плавления метаморфизованного осадочного протолита и образованием плавящихся пород (клинкероидов 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) при формировании мелилит-нефелиновых паралав происходило при повышенном парциальном давлении CO<sub>2</sub> без разложения кальцита. Такие условия являются уникальными и не описывались ранее на других многочисленных пирометаморфических комплексах в мире.

Необходимо продолжить изучение пирометаморфических комплексов Монголии и условий формирования чрезвычайно разнообразных пирогенно изменённых и в разной степени плавящихся 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; Dugand et al., 2015] значительно влияет на *P-T* параметры плавления кальцита и образования карбонатного расплава в низкобарических и высокотемпературных условиях.

### **Статьи в рецензируемых журналах:**

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

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 г. – № 1. – С. 61–77.

3. **Глушкова В.Е.**, Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Главные пороодообразующие минералы паралав пирометаморфических комплексов Монголии // Зап. РМО. – 2023 б. – № 4. – С. 65–83.

4. 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–CaCO<sub>3</sub> system // Materialia, 2024 (на рецензировании).

#### **Материалы докладов на конференциях:**

1. **Глушкова В.Е.**, Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Кирштейнит в паралавах пирометаморфического комплекса Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия. Материалы V Всероссийской молодежной научной конференции, г. Улан-Удэ, Максимиха, 26–31 августа 2019 г. С. 21–23.

2. **Glushkova V.E.**, Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Ca-Mg-Fe olivines in paralavas of the Nyalga combustion metamorphic complex, Central Mongolia. Materials of X International Siberian Early Career GeoScientists Conference, Novosibirsk, 13–17 June 2022. P. 19–20.

3. Савина Е.А., Перетяжко И.С., Хромова Е.А., **Глушкова В.Е.** Процессы низкотемпературного плавления кальцита и образования мелилит-нефелиновых паралав в пирометаморфических комплексах Монголии. Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания, г. Иркутск, 06–13 сентября 2021 г. Т. 3. С. 34–36.

4. **Глушкова В.Е.**, Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Особенности состава мелилита в паралавах пирометаморфических комплексов Монголии. Материалы Всероссийской конференции, посвящённой 65-летию Института геохимии им. А.П. Виноградова и 105-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. г. Иркутск, 21–25 ноября 2022 г. Т. 1. С. 132–135.

5. **Глушкова В.Е.**, Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Эволюция состава клинопироксена и мелилита в мелилит-нефелиновых паралавах пирометаморфических комплексов Монголии. Материалы конференции молодых ученых, г. Иркутск, 11–16 сентября 2023 г. С. 36–38.

6. Перетяжко И.С., Савина Е.А., **Глушкова В.Е.** Процессы формирования пирометаморфических комплексов Монголии. Материалы VI Всероссийской конференции, г. Владивосток, 19–22 сентября 2023 г. С. 304–307.

7. Перетяжко И.С., Савина Е.А., **Глушкова В.Е.** Минерально-фазовые составы, процессы образования кристобалитового клинкера и железистых паралав в пирометаморфическом комплексе Хамарин-Хурал-Хид, Восточная Монголия. Материалы научной конференции «Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)», г. Иркутск, 17–20 октября 2023 г. Вып. 21. С. 211–212.