

родами. Наложенная гидротермальная Ba-Sr-P3Э минерализация карбонатитов и метасоматитов, вероятно, образовалась из концентрированных карбонатных и щелочных (Na) флюидов в минимальном интервале температур минералообразования 340–415 °С.

Исследования выполнены за счет средств гранта РФФ № 23-17-00098.

Литература

Пожарицкая Л.К., Самойлов В.С. Петрология, минералогия и геохимия карбонатитов Восточной Сибири. М.: Наука, 1972. 268 с.

Фролов А.А., Толстов А.Р., Белов С.В. Карбонатитовые месторождения России. М.: НИИ Природа, 2003. 287 с.

Ярмлюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В. Позднерифейский рифтогенез и распад Лавразии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов южного обрамления Сибирской платформы // Доклады Академии наук. 2005. Т. 404. № 3. С. 400–406.

Prokopyev I., Doroshkevich A., Zhumadilova D., Starikova A., Nugumanova Y.N., Vladykin N. Petrogenesis of Zr-Nb (REE) carbonatites from the Arbarastakh complex (Aldan Shield, Russia): mineralogy and inclusion data // Ore Geology Reviews. 2021. Vol. 131. #104042.

Warr L.N. IMA–CNMNC approved mineral symbols // Mineralogical Magazine. 2021. Vol. 85. P. 291–320.

В.Е. Глушкова¹, И.С. Перетьяжко¹, Е.А. Савина¹, Е.А. Хромова²

¹ – Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
г. Иркутск, Россия
glushkova@igc.irk.ru

² – Геологический институт
им Н.Л. Добрецова СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

Геолого-минералогическая характеристика и условия образования пород пирометаморфических комплексов Монголии

V.E. Glushkova, I.S. Peretyazhko¹, E.A. Savina¹, E.A. Khromova²

¹ – Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

² – Dobretsov Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, Russia

Geological-mineralogical characteristics and formation conditions of Mongolian combustion metamorphic complexes

Abstract. Mongolian combustion metamorphic (CM) complexes formed from Quaternary to present because of wild coal fires. The rocks in the northeast part of the Khamaryn-Khural-Khiid CM complex are a result of spontaneous combustion coal in synclines. The sedimentary protolith of pyrogenic rocks were probably pelitic rocks and sandstones with carbonate cement. The thickness of CM rocks is >30–40 m; partly melting temperature of sedimentary strata reached 1300–1400 °C reaching, possibly, the stability field of stable β -cristobalite (>1470 °C). Crystallization of some pyrogenic mafic melts (a source of the melilite-nepheline paralavas of the Khamaryn-Khural-Khiid CM complex) began under extremely reducing conditions around 1365 °C with the formation of Fe phosphide (barringerite), native iron and troilite in droplets of the Fe-S-P melt.

В Монголии известны два пирометаморфических комплекса (Нилгинский и Хамарин-Хурал-Хид), образованные в результате пожаров бурого угля в осадочной толще раннеемеловой Дзунбаинской свиты [Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко и др., 2018]. В породах комплексов преобладают обожженные пелиты (аргиллиты, алевропесчаники) и продукты их частичного плавления – стекловатые клинкеры. Намного реже встречаются мелилит-нефелиновые, плагиоклаз-пироксеновые ± индиалитовые и железистые паралавы [Савина, Перетяжко, 2023; Peretyazhko, Savina, 2023].

В настоящей работе обсуждается геологическое строение комплекса Хамарин-Хурал-Хид, обобщенная характеристика минерального состава пирогенных пород и условий их образования. Работа выполнена на основе коллекции пирогенных пород Монголии, отобранных И.С. Перетяжко и Е.А. Савиной в 2016–2018 гг., а также полевых наблюдений 2023 г., полученных при участии автора. Минерально-фазовый состав пород определен методом СЭМ ЭДС на электронных микроскопах CarlZeiss LEO-1430VP и Tescan MIRA-3 LMU, рамановские спектры минералов получены на конфокальном спектрометре WITec Alpha 300R (WITec GmbH).

Пирометаморфические комплексы расположены на расстоянии около 300 км друг от друга и приурочены к разным угленосным бассейнам в Центральной и Восточной Монголии (рис. 1). На эродированной площади Нилгинского комплекса пирогенные породы бронируют вершины трех останцов высотой до 40 м, сложенных неизменными пелитовыми породами (глиной и алевропесчаником). В 4–5 км от останцов в окрестностях и на стенках буроугольного карьера Тугруг вскрыта осадочная толща, участками термически измененная. Возраст палеопожаров Нилгинского комплекса не превышает 2 млн лет [Перетяжко и др., 2018]. Комплекс Хамарин-Хурал-Хид формировался в процессе древних (четвертичных) и современных угольных пожаров, последний из которых наблюдали в 1932–1947 гг. В центральной части комплекса пирогенные породы мощностью до 30–40 м образуют типичный ландшафт «горельников» – овраги и протяженные гряды с небольшими пещерами, сформированными в результате обрушений и эрозии осадочной толщи после угольных пожаров. На СВ фланге комплекса пиропороды образуют холмы высотой до 3–4 м и обнажаются в руслах сухих водотоков на площади трех депрессий, отделенных друг от друга останцами слоистой осадочной толщи, сложенной песчаниками с карбонатным цементом и обожженными аргиллитами с реликтами углей.

По данным полевых наблюдений построена схема геологического строения и предполагаемый разрез по породам комплекса Хамарин-Хурал-Хид (рис. 2). 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. Природные пожары были вызваны, по-видимому, самовозгоранием бурого угля в процессе окисления сульфидной серы (в прослоях угля часто встречается пирит). Фронт пожаров постепенно продвигался по угольным прослоям от флангов линз к их центральным частям, где мощность бурого угля была наибольшей. После выгорания угля произошло проседание вышележащих пирогенно измененных пород и образование трех депрессий, ограниченных сбросами на контакте с останцами осадочных пород (рис. 2).

В пирометаморфических комплексах Монголии преобладают тонкокристаллические мелилит-нефелиновые паралавы, иногда со следами течения расплава на поверхности образцов. Породообразующая минеральная ассоциация представлена фенокристами основного плагиоклаза, Al-клинопироксена и мелилита. Интерстиции между фенокристами заполнены минералами группы нефелина и кислым алюмосиликатным стеклом с включениями минералов групп оливина (Са-фаялитом и кирштейнитом), шпинели, рёнита-куратита, К-Ва полевых шпатов, пирротина, кальцита и других редких минералов [Peretyazhko et al., 2017; Перетяжко

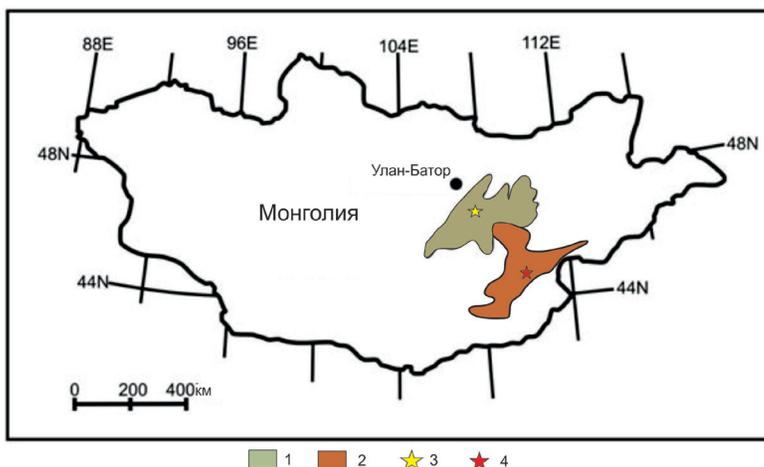


Рис. 1. Положение угленосных бассейнов (1 – Чоир-Нилгинский, 2 – Восточно-Гобийский) и пирометаморфических комплексов (3 – Нилгинский, 4 – Хамарин-Хурал-Хид) Монголии.

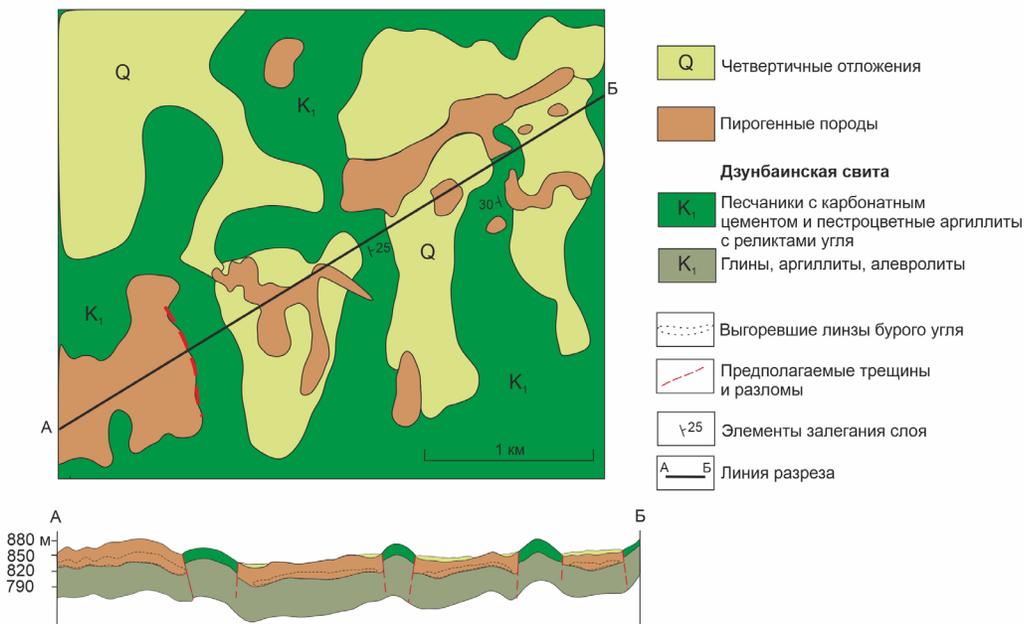


Рис. 2. Схема геологического строения и предполагаемый разрез северо-восточного фланга комплекса Хамарин-Хурал-Хид.

и др., 2018; Глушкова и др., 2023а, б]. В Al-клинопироксене и мелилите наблюдается ростовая зональность – уменьшение содержания Al_2O_3 от центра к краю зерен. Реликты ксенолитов карбонатно-силикатных пород, встречающиеся в паралавах, сложены Al-диопсидом (до 49 мол. % кушироита, $CaAl_2SiO_6$) и геленитом (до 92 мол. % геленита, $Ca_2Al_2SiO_7$) в ассоциации с перовскитом, монтичеллитом, магнетитом, пирротинном и кальцитом.

Клинкеры пирометаморфических комплексов содержат алюмосиликатное кислое (плюмазитовое) стекло, в котором находятся реликты пелитовых пород, оплавленные зерна

кварца и новообразованные фазы – ромбические (кордиерит, секанинаит) и гексагональные (индиалит, ферроиндиалит) минералы группы кордиерита, муллит, Fe-муллит, силикат-шпинель состава $(\text{AlFe}^{2+}\text{Mg})\text{SiO}_4$, плагиоклаз, пироксены, фаялит, полиморфы SiO_2 (тридимит, кристобалит) [Савина, Перетяжко, 2023; Peretyazhko, Savina, 2023]. В комплексе Хамарин-Хурал-Хид встречаются также обогащенные железом пирогенные породы, сложенные тонкодисперсным агрегатом гематита, магнетита-якобсита с реликтовыми зернами минералов, и железистые паралавы (кристобалит-фаялитовая, тридимит-секанинаитовая), содержащие до 42 мас. % $\text{Fe}_2\text{O}_{\text{зобщ}}$.

Большое разнообразие пород в пирометаморфических комплексах Монголии обусловлено гетерогенностью состава осадочных толщ и локальными условиями термических преобразований пород. Протолитом для клинкеров и железистых паралав были пелиты, в разной степени обогащенные железом. Находки индиалита и ферроиндиалита свидетельствуют о температуре частичного плавления этих пород >1050 °С. Наличие оплавленных зерен детритового кварца и кристобалита позволяет предположить, что температура пирогенных изменений пелитов локально превышала 1300–1400 °С и, возможно, достигала поля устойчивости β -кристобалита (>1470 °С). Обогащенные железом пирогенные породы формировались из силикатно-железистого расплава при значительном интервале летучести кислорода в окислительных условиях.

В результате твердофазных термических преобразований и частичного плавления мергелистых известняков сформировались мафические расплавы, исходные для мелилит-нефелиновых паралав. По качественной петрологической модели [Peretyazhko et al., 2021], на стадии высокотемпературного и низкобарического метаморфизма в РТ-условиях стабильности кальцита в мергелистом известняке кристаллизовались Al-клинопироксен и мелилит (геленит). В крайне высокотемпературных условиях (>1250 °С) происходило последовательное инконгруэнтное плавление силикатных минералов, кальцита и образовались несмесимые расплавы – карбонатный ($\text{CaCO}_3 + \text{CaO}$ либо стехиометрический кальцитовый) и несколько силикатных различного состава. В результате слияния силикатных расплавов формировался недосыщенный по SiO_2 и обогащенный Ca расплав, из которого 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 минералами.

Кристаллизация некоторых пирогенных мафических расплавов, исходных для мелилит-нефелиновых паралав комплекса Хамарин-Хурал-Хид, начиналась в крайне восстановительных условиях около 1365 °С с образования в каплях Fe-S-P расплава фосфида Fe (баррингерита), самородного железа и троилита. Сrostки и отдельные вкрапления этих фаз микронных размеров обнаружены в ранних зонах роста фенокристов плагиоклаза и в стеклах ксенолитов клинкера, захваченных расплавами паралав.

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

Литература

Глушкова В.Е., Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А. Минералы группы оливина в мелилит-нефелиновых паралавах пирометаморфических комплексов Монголии // Записки РМО. 2023а. № 1. С. 61–77.

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

Перетяжко И.С., Савина Е.А., Хромова Е.А., 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.

Савина Е.А., Перetyazhko 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.

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 // *Geosciences*. 2023. Vol. 13. N. 12. Article 377.

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 // *Mineralogical Magazine*. 2017. Vol. 81. N. 4. P. 949–974.

Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A. Low-pressure (>4 MPa) and high-temperature (>1250 °C) incongruent melting of marly limestone: formation of carbonate melt and melilite–nepheline paralava in the Khamaryn–Khural–Khiid combustion metamorphic complex, East Mongolia // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. Vol. 176. Article 38.

Э.С. Виддич^{1,2}, Ш.К. Балтыбаев^{1,2}

¹ – *Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт Петербург, Россия*
emily.vivdich@yandex.ru

² – *Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, г. Санкт Петербург, Россия*

Вариации давления при минералообразовании в тектонических зонах

E.S. Vivdich^{1,2}, Sh.K. Baltybaev^{1,2}

¹ – *Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St. Petersburg, Russia*

² – *St. Petersburg State University, Institute of Earth's Sciences, St. Petersburg, Russia*

Pressure variations during formation of minerals in tectonic zones

Abstract. The occurrence of “overpressure” is a challenging problem in metamorphic petrology. The paper examines the “overpressure” estimations in metamorphic rocks of the Meyeri tectonic zone (Southeast Fennoscandian Shield, Russia) using geothermobarometry methods. The PT estimations revealed pressure exceeding the lithostatic one by 1–4 kbar that is caused by additional tectonic stress during overthrusting of rocks of the Svecofennian belt on the Archean Karelian Craton. This method can be applied to other similar tectonic zones to detect the “overpressure” phenomenon.

Введение. Температура и давление – это основные факторы метаморфизма, установление природы которых является важной задачей при реконструкции условий метаморфического минералообразования. В случае давления обычно говорят о литостатическом, но также обсуждается вопрос появления давления, которое превышает литостатическое («overpressure») или ниже него («underpressure») [Gerya, 2015 и ссылки внутри]. Хотя численное моделирование подтверждает возможность появления «сверхдавления» благодаря тектоническому фактору [Schmalholz et al., 2014], сведения о выявленных природных примеров этого феномена практически отсутствуют.

В данной работе приводятся результаты РТ-оценки формирования пород Мейерской тектонической зоны [Балтыбаев и др., 1996, 2000] Северного Приладожья (Республика Ка-