

УДК: 553.69:552.13

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

Оригинальная статья

Минералого-петрографическая зональность горелых горных отвалов угольных шахт (Восточный Донбасс)

И.А. Артемов 

Южный научный центр Российской академии наук, Россия, 344006,
г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41, e-mail: artemovia@gmail.com

Статья поступила: 29.04.2025, доработана: 29.05.2025, принята к публикации: 02.06.2025

Резюме: Актуальность работы. Отходы угледобычи являются перспективным вторичным сырьем, использование которого во многом ограничено разнообразием и непостоянством минерального состава в объеме породных отвалов. **Цель исследования.** Цель работы – определить минералого-петрографическую зональность горелых горных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса. **Материалы и методы.** Изучение вещественного состава проведено методами электронно-зондовых исследований и рентгенофазового анализа. **Результаты работы.** В статье приводятся результаты изучения минералого-петрографической зональности горелых пород терриконов Восточного Донбасса; по составу они принадлежат к песчано-глинистому литологическому типу. Породные отвалы горят за счет экзотермической деструкции сульфидов с выделением серы и окисления частиц угля, и значительная часть является перегоревшей, что приводит к трансформациям минерального состава пород, способствующим удалению части вредных компонентов (сульфиды и пр.), повышению однородности петрографического состава и физических свойств пород, а также появлению ряда их новых свойств. Среди пирометаморфических пород по мере удаления от горящего ядра выделяются зоны с характерными минеральными ассоциациями: для высокотемпературной внутренней зоны (температура выше 1200-1500 °С) характерен парагенезис муллита + кварц, кристобалит, тридимит (породы нередко стекловатые, со следами плавления и течения); более низкотемпературная зона (температура образования от ~800-900 °С до ~1200-1500 °С) выделяется парагенезисом кордиерит + кварц + тридимит + муллит (псевдомуллит); для самой низкотемпературной зоны характерен парагенезис муллита + кварц (в слабо переработанных породах нередко сохраняются реликтовые структурно-текстурные признаки). Для неизмененных пород характерны мусковит и гидрослюда, хлорит, кварц, полевые шпаты; в некоторых образцах присутствуют накрит, иногда доломит или сидерит. В неизмененных породах отсутствуют значимые структурные и минеральные пирометаморфические преобразования, что связано с высокой степенью катагенетических преобразований. В поверхностных и приповерхностных частях терриконов присутствуют фумарольные образования (сульфатные коры гипсового и магний-алюмо-аммониевого типов) и «чёрные блоки» с асфальтоподобной корой (высокоуглеродистые породы с безводными сульфатами магния, алюминия, аммония и калия, нашатырем, серой), обязанные своим происхождением пневматолитовым процессам.

Ключевые слова: террикон, горелые породы, техногенное месторождение, пирометаморфизм, муллит.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ЮНЦ РАН, № госрегистрации 125011700412-6.

Для цитирования: Артемов И.А. Минералого-петрографическая зональность горелых горных отвалов угольных шахт (Восточный Донбасс). *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(2): 155-165. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

Original paper

Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning waste heaps of the Eastern Donbass

I.A. Artemov

Southern Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 41 Chekhov Ave.,
Rostov-on-Don 344006, Russian Federation, e-mail: artemovia@gmail.com

Received: 29.04.2025, revised: 29.05.2025, accepted: 02.06.2025

Abstract. Relevance. Coal mining waste has been identified as a promising secondary raw material; however, its utilization is largely constrained by the diversity and variability of mineral composition present within the volume of rock dumps. **Aim.** The aim of the work is to determine the mineralogical and petrographic zonality in the waste rock dumps from the coal mines of the Eastern Donbass. **Materials and Methods.** The study of the material composition was carried out by the methods of electron-probe studies and X-ray phase analysis. **Results.** The present paper sets out the findings of a study into the mineralogical and petrological characteristics of the burnt rocks present within the slag heaps of Eastern Donbass. These rocks are of a sandy-clay lithological type. About 25% of the waste dumps burn due to exothermic destruction of sulphides with release of sulphur and oxidation of coal particles. Significant part of them is burnt out, which leads to transformations in the mineral composition of rocks, contributing to the removal of some harmful components (sulphides, etc.), increasing the homogeneity of the petrographic composition and physical properties of rocks, as well as the appearance of a number of new properties. Among pyrometamorphic rocks, zones with characteristic mineral associations are distinguished as they move away from the burning core. The high-temperature inner zone (temperature above 1200–1500 °C) is characterized by the paragenesis of mullite + quartz, cristobalite, tridymite (rocks are often glassy, with traces of melting and flow). The lower-temperature zone (formation temperature from ~800–900 °C to ~1200–1500 °C) is characterized by the paragenesis of cordierite + quartz + tridymite + mullite (pseudomullite); the lowest-temperature zone is characterized by the paragenesis of mullite + quartz (relict structural and textural features are often preserved in poorly processed rocks). The unaltered rocks are distinguished by the presence of muscovite and hydrous mica, chlorite, quartz, and feldspar. In certain samples, nacrite, and occasionally dolomite or siderite, are also present. The absence of significant structural and mineral pyrometamorphic transformations in the unaltered rocks is attributed to a high degree of catagenetic transformation. In the surface and near-surface parts of heaps, fumarole formations (sulfate crusts of gypsum and magnesium-aluminum-ammonium types) and “black blocks” with asphalt-like crust (high-carbonaceous rocks with anhydrous magnesium, aluminum, ammonium and potassium sulfates, ammonium and sulfur) are present. These owe their origin to pneumatolitic processes.

Keywords: waste heap, burned rocks, technogenic deposit, pyrometamorphism, mullite.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of realization of the state assignment of SSC RAS, state registration No. 125011700412-6.

For citation: Artemov I.A. Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning waste heaps of the Eastern Donbass. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(2): 155–165. DOI: 10.46698/VNC.2025.14.75.001

Введение

Отходы угледобычи эффективно используются в металлургии, сельском хозяйстве, при производстве строительных материалов, керамики и в других отраслях промышленности [Yavruyan, Kotlyar, 2024]. Их применение позволяет значительно снизить сырьевые затраты для местных производителей, однако, в России менее 5% от общего объема образующихся углеотходов вовлекается во вторичную перера-

ботку [Шпирт и др., 2019; Буравчук, Гурьянова, 2015]. В немалой мере это связано со сложностью комплексной переработки плохосортированного полиминерального сырья [Кизильштейн и др., 1995]. Порядка 25% отвалов горит за счет экзотермической деструкции сульфидов с выделением серы и окисления частиц угля, и значительная часть является перегоревшей, что приводит к трансформациям минерального состава пород, способствующим удалению части вредных компонентов (сульфиды и пр.), повышению однородности петрографического состава и физических свойств пород, а также появлению ряда новых свойств. В силу различий литологического состава породной массы актуально изучение состава горелых пород разных угольных бассейнов и представленных в них литологических типов. **Цель работы** – определить минералого-петрографическую зональность горелых горных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса. Основными задачами исследования являются изучение закономерностей пирометаморфических преобразований, состава минеральных ассоциаций и создаваемой ими минералого-петрографической зональности в породной массе. Актуальность определяется необходимостью повысить эффективность разработки технологических схем использования горелых пород, в первую очередь как сырья для керамической промышленности (отошители и интенсификаторы спекания в керамике и пр.). В работе приводится описание преобразований минералого-петрографического состава горелых пород терриконов Восточного Донбасса песчано-глинистого литологического типа.

Материал и методы

Материалом для исследования послужили образцы аргиллитов породного отвала шахты «Краснодонецкая» и №17 «Синегорская» Краснодонецкого шахтоуправления, отобранные в районе пос. Углекаменный. Шахтоуправление разрабатывало антрацитовый пласт m_8^1 на глубине 410-595 м средней мощностью до 1,7 м, разделенный прослойками аргиллитов (до 0,25 м). Образцы горелых пород и фумарольных образований были отобраны из терриконов трех шахт Восточного Донбасса с однотипным литологическим составом, в которых обнажены разные участки горелых пород активной зоны. Шахта им. Пролетарской Диктатуры расположена в г. Шахты. Отсыпка её породного отвала началась после 1923 г. и закончилась в 1972-1974 годах. Отрабатывались пласты k_5^0 Безымянный и k_5^n Нижне-Грушевский со средней мощностью 0,71 м и углами падения 3-8°. Максимальная глубина разработки 448 м. Террикон шахты им. Артёма также расположен в г. Шахты; эксплуатировался с 1911 по 1995 г. Шахта на глубине 700-750 м разрабатывала два угольных пласта: k_1^5 Рыхлый мощностью 0,5-0,6 м и с углом падения 16-20° и пласт $k_в^5$ Грушевский мощностью 0,8-0,9 м с углом падения 6-8°. Террикон шахты № 62 находится в с. Прохоровка; эксплуатировался с 1920-х годов по 1994 г. [Артемов и др., 2022].

Изучение вещественного состава проведено методами растровой электронной микроскопии, электронно-зондового микроанализа (полированные напыленные углеродом препараты изучались на микроскопе Tescan VEGA II LMU с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 450/XT) и рентгенофазового анализа (порошковые препараты анализировались на дифрактометре «ARLX'TRA» с излучением $CuK\alpha 1,5406 \text{ \AA}$, $CuK\alpha 2,15444 \text{ \AA}$, и на дифрактометре «ДРОН-7»), результаты которых дополняют ранее проведенные исследования углеотвалов Ростовской области.

Результаты и обсуждение

Горючим материалом для терриконов является разложение сульфидных минералов и уголь в виде мелочи, кусков и прослоев в углесодержащих породах. Сначала происходит самонагревание дисперсного твёрдого материала, затем тепловое самовозгорание, тление вплоть до пламенного горения, которое начинается в зоне максимальных температур, а после распространяется на соседние объёмы террикона. Причиной самовозгорания породных отвалов был назван такой фактор, как способность вещества адсорбировать кислород, вступающий в химическое взаимодействие с угольным веществом. Также немаловажную роль играет разложение сульфидных минералов (пирита, марказита) содержащихся в породах, слагающих террикон, на железо и элементарную серу. Этому способствуют присутствующие в поверхностной зоне свободного водообмена тионовые бактерии, которые вызывают деструкцию сульфидов с выделением тепла [Чесноков, Щербакова, 1991; Щербакова, 2018; Gogola et al., 2020; Matysek, Jirasek, 2022].

В общем виде в строении террикона визуально (по внешним признакам) выделяются 4 зоны (рис. 1).

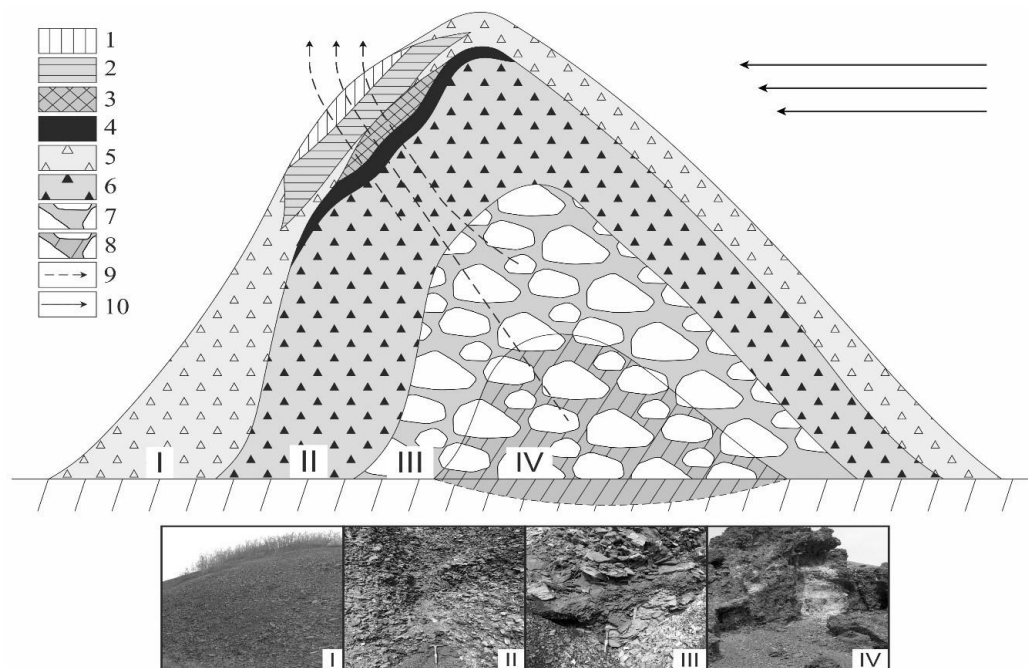


Рис. 1. Идеализированная схема строения горящего породного отвала: 1 – фумарольные коры гипсового состава; 2 – фумарольные коры магний-алюмо-аммониевого типа; 3 – асфальтоподобная кора; 4 – «черный блок»; 5 – осыпи негорелых пород (I); 6 – породы первой (низкотемпературной) зоны (II); 7 – породы второй (среднетемпературной) зоны (III); 8 – породы третьей (высокотемпературной) зоны (IV); 9 – направление движения парогазового потока; 10 – направление преобладающих ветров /

Fig. 1. The schematic representation of the structure of the burning rock dump. 1 – fumarole crust of gypsum composition; 2 – fumarole crust of magnesium-aluminum-ammonium type; 3 – asphalt-like crust; 4 – “black block”; 5 – unaltered rocks (I); 6 – rocks of the first (low-temperature) zone (II); 7 – rocks of the second (medium-temperature) zone (III); 8 – rocks of the third (high-temperature) zone (IV); 9 – direction of vapor-gas flow; 10 – direction of prevailing winds

На поверхности террикона выделяются зоны выветривания, зоны фумарольных образований и «чёрных блоков» с асфальтоподобной корой. Активная зона распо-

лагается внутри террикона и подразделяется по уровню пирометаморфических преобразований пород. Минералого-петрографический состав метاپород терриконов определяется изменением условий, контролируемых генерируемыми в очаге горения температурой и флюидным потоком, а также составом протолита. На внутреннее строение террикона влияет множество факторов. Во-первых, разные формы породного отвала (конический, хребтовой или плоский) по-своему аккумулируют тепло и подвергаются воздействию природных факторов. Во-вторых, литологический и гранулометрический состав непосредственно влияет на структуру террикона (в разное время отвал отсыпается разными по своим свойствам породами). В-третьих, количество угольного и сульфидного материала в породе определяет интенсивность нагрева. В-четвертых, количество доступного кислорода и воды, которые ускоряют окисление угля и сульфидных минералов. В процессе обжига исходный материал претерпевает ряд фазовых преобразований. Главными среди них являются следующие: дегидратация слоистых силикатов, аморфизация исходного субстрата, плавление продуктов аморфизации глинистых минералов, кристаллизация новых минеральных фаз [Сокол и др., 2001; Чесноков, Щербакова, 1991; Щербакова, 2018; Воробьев и др., 2016].

Фумарольные образования (названы так из-за сходства с вулканическими фумаролами) представляют собой белые и желтые пористые хрупкие агрегаты с явным трубчатым строением (рис. 2). Приурочены к окислительно-восстановительному геохимическому барьеру на поверхности отвала, образуют сульфатные коры магний-алюмо-аммониевого и гипсового минеральных типов [Артемов, Попов, 2020]. Первый тип имеет разнообразный минеральный состав – сложен сульфатами алюминия, магния, кальция, аммония и их кристаллогидратами (ведущие минералы – гипс, эпсомит, буссенготит, годовиковит, алюминит, чермигит, масканьит, тонкодисперсный кварц и углеродная сажа), и обладает в разной мере выраженным зональным строением, определяемым приуроченностью водных сульфатов к верхней зоне и безводных сульфатов – к нижней. Второй тип сложен преимущественно гипсом и самородной серой (сульфаты присутствуют в малых количествах).

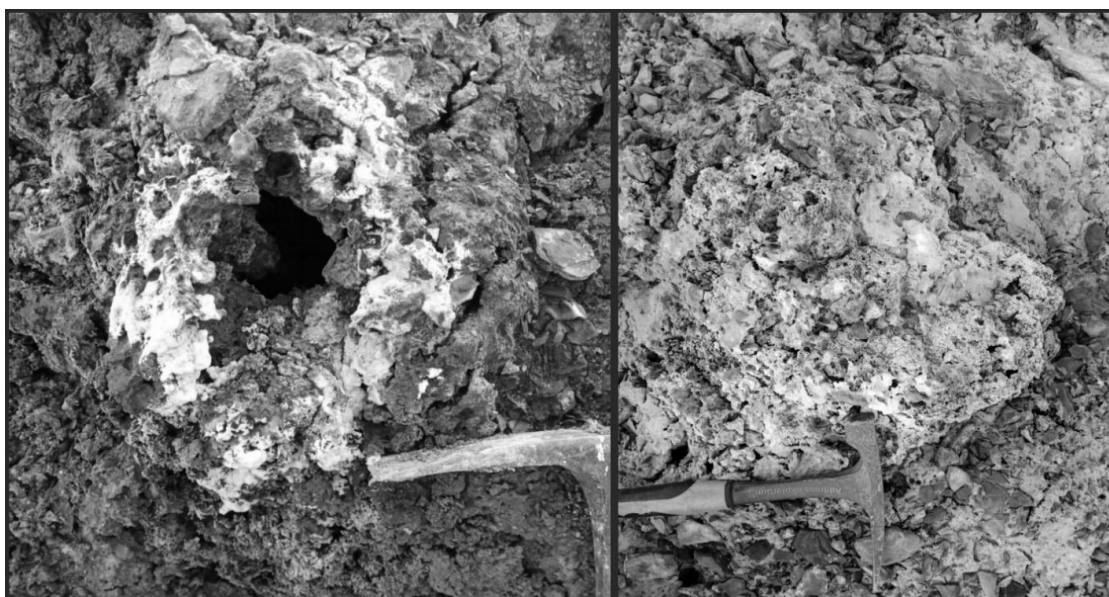


Рис. 2. Фумарольные образования на поверхности террикона /

Fig. 2. Fumarole formations on the waste heap surface

Асфальтоподобные коры образованы черными, кавернозными, прочными агрегатами, в целом имеющими сходный состав с поверхностными фумарольными отложениями, в них преобладают безводные сульфаты магния, алюминия, аммония и калия (эпсомит, масканьит, чермигит), нашатырь, сера.

Рассмотренный комплекс пород (фумарольные и асфальтоподобные коры) образован в ходе пневматолитового переноса и отложения продуктов сернокислотного с участием аммиака разложения алюмосиликатных пород терриконов и поступивших из нижележащей зоны «черных блоков» продуктов битумов и углей [Чесноков, Щербакова, 1991; Щербакова, 2018; Akulov, Akulova, 2020].

«Черные блоки» представлены черными (за счет насыщенности углеродистым веществом) массивными плотными агрегатами, сложенными преимущественно слабоокристаллизованным муллитом с кварцем, кристобалитом, силлиманитом. В изученных терриконах эти образования маломощные и представлены фрагментарно, что объясняется низким содержанием глинистых компонентов (их формирование связано с переработкой глинистых углесодержащих пород в условиях сильно ограниченного доступа кислорода для горения [Портола и др., 2020; Akulov, Akulova, 2020]). Флюидогенно-преобразованные высокоуглеродистые породы образуются при температурах до 500 °C на путях движения флюидов [Гамов и др., 2016] и залегают среди продуктов глубокого обжига, обрамляющих очаг активного горения.

Внешняя зона террикона сложена неизмененными породами. На дифрактограммах аргиллитов этой зоны (нефракционированные пробы) присутствуют рефлексы мусковита и гидрослюда, хлорита, в некоторых пробах – накрита (политипная модификация каолинита, возникающая при $T > 200^\circ\text{C}$); постоянно присутствуют кварц и полевые шпаты, иногда доломит или сидерит (Обр. № 1, 3, 5, 9, 10 на рис. 3). Породы преимущественно имеют чешуйчатую текстуру, частицы и агрегаты глинистых минералов хорошо выражены и не имеют четкой ориентировки, наблюдается большое количество угловатых межчастичных и межмикроагрегатных пор различной формы [Осипов и др., 1989; Котельников, Конюхов, 1986]. В таких аргиллитах наблюдается отсутствие видимых структурных и минеральных пирометаморфических преобразований и однородность их состава и строения до температур дегидроксилирования иллитов и железистых хлоритов и последующей кристаллизации псевдомуллита и муллита. Это связано с их высокой степенью катагенетических преобразований: анализ карт метаморфизма углей Донбасса показывает, что на рассматриваемой территории на уровне эксплуатируемых угольных пластов метаморфизм соответствует подстадии апокатагенеза, происходящего при температурах до 300–350°C [Недоливко, 2005].

Среди пород, затронутых термальной переработкой, по результатам минералого-петрографических исследований, можно выделить 3 зоны, различающиеся минеральными парагенезисами. Породы первой, низкотемпературной зоны отличаются от неизмененных пород специфической микроструктурой: в них отдельные частицы глинистых минералов плохо различимы или совсем неразличимы, агрегаты имеют сглаженную форму и сливаются в монолитную структуру, а поровые пространства принимают округлые и вытянутые (щелевидные) формы [Осипов и др., 1989]. Для них характерна муллит-кварцевая минеральная ассоциация (Обр. № 7, 12 на рис. 3).

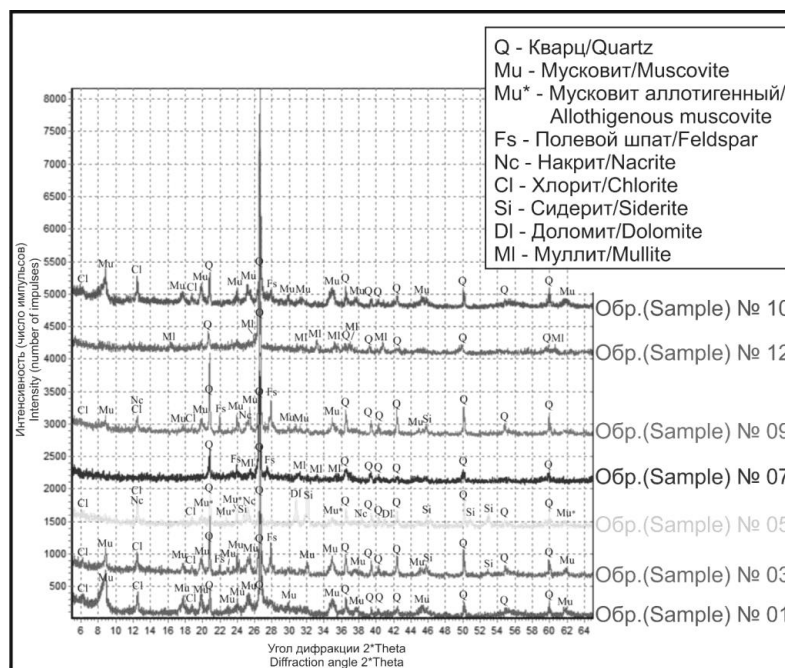


Рис. 3. Дифрактограммы термически неизменных пород (обр. 1, 3, 5, 9, 10) и пород первой минералого-петрографической зоны (обр. 7, 12) /

Fig. 3. Diffractograms of thermally unaltered rocks (samples 1, 3, 5, 9, 10) and rocks of the first mineralogical-petrographic zone (samples 7, 12)

Ранний муллит способен возникнуть сразу после прохождения эндоминимума ($T > 650^{\circ}\text{C}$) и формирования комплексов -O-Al[4]-O- внутри метакаолиновых доменов. В них происходит зародышеобразование игл муллита, а их рост осуществляется путем диффузии Si и Al в аморфизованной матрице. Здесь осуществляется термическая диссоциация минералов: разложение кристаллогидратов, дегидратация, распад гидросиликатов, а также окисление органических примесей. Исходный материал переходит в разряд псевдоаморфных веществ, продукты обжига находятся в состоянии высокой дисперсности, высокой пористости и минимальной механической прочности и обладают высокой химической активностью [Сокол и др., 2001; Rakhimova et al., 2023; Ribeiro et al., 2022].

Для пород второй зоны характерна кордиерит-кварц-тридимит-муллитовая (псевдомуллитовая) со шпинелью, гематитом, кристобалитом, герцинитом, оливином ассоциация (Обр. № Т-2 на рис. 4). Оценка температурных условий образования этой минеральной ассоциации определяется исходя из температуры образования муллита из метаклиновых минералов, которая составляет $\sim 900\text{--}1000^{\circ}\text{C}$, его образованию предшествует появление псевдомуллита (при $\sim 800^{\circ}\text{C}$), также в составе пород этой зоны появляется тридимит, что определяет нижний температурный рубеж данной зоны близкий к $800\text{--}900^{\circ}\text{C}$ (Абдрахимов В.З., Колпаков А.В., Денисов Д.Ю. Кристаллизация муллита при синтезе керамических материалов из отходов производств // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2013. Т. 3. С. 2716–2720. URL: <http://e-koncept.ru/2013/53546.htm> (дата обращения: 10.03.2025)). Здесь превращения преимущественно протекают в твердом состоянии, а основными процессами следует признать спекание и рекристаллизацию, которые сопровождаются продолжающейся термической диссоциацией, синтезом новых химических соединений, полиморфными переходами и образованием первых порций пленочного рас-

плава. Полнокристаллическая структура природного сырья через промежуточное псевдоаморфное состояние переходит во вторичную кристаллическую структуру.

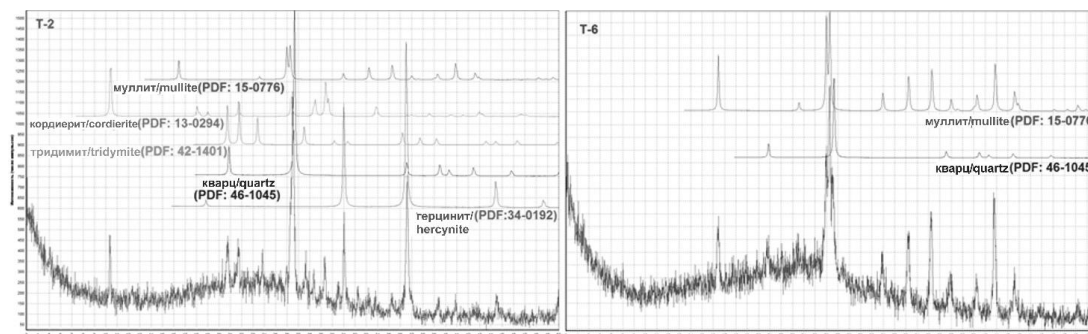


Рис. 4. Характерные дифрактограммы образцов второй (Т-2; метааргиллит) и третьей (Т-6; массивная микрокристаллическая порода) минералого-петрографических групп пород терриконов. Приведены дифрактограммы идентифицированных фаз из базы PDF-2 (в скобках указаны номера карточек) /

Fig. 4. Diffractograms of samples from the second (T-2; metaargillite) and third (T-6; massive microcrystalline rock) zones of the spoil heaps (PDF-2 database data was used)

Для пород третьей, высокотемпературной, зоны характерным является ассоциирующий с аморфной фазой парагенезис – муллит + кварц, кристобалит, тридимит, реже отмечаются санидин и микрофазы железистого оливина, кордиерита, шпинели, гематита, магнетита (Обр. № Т-6 на рис. 4). Наблюдаемая на дифрактограммах однородность состава позволяет предполагать развитие процессов полной муллитизации кордиерита и других минералов, протекающих при температурах выше 1200-1500°C [Гамов и др., 2016]. Здесь интенсифицируются и завершаются твердофазные преобразования и начинается плавление. Резко усиливаются диффузионные процессы, возрастает реакционная способность веществ, увеличивается скорость фазовых превращений, происходит термическое разрушение структур новообразованных неорганических соединений.

Выводы

Приведённые результаты исследований характеризуют термическую переработку глинистых пород в горелых породах терриконов песчано-глинистого литологического типа, характерных для восточной части Донецкого бассейна. На начальных стадиях термических преобразований происходит частичная аморфизация метаглинистого субстрата. Минералообразование преимущественно осуществляется путем синтеза из аморфизованного субстрата. Во внутренних зонах процессы рекристаллизации и стеклообразования приводят к повышению однородности минеральных составов и появлению микрокристаллических фаз.

Среди пирометаморфических пород по мере удаления от горящего ядра выделяются зоны с характерными минеральными ассоциациями: для высокотемпературной внутренней зоны (температура выше 1200-1500°C) характерен парагенезис муллит + кварц, кристобалит, тридимит (породы нередко стекловатые, со следами плавления и течения); более низкотемпературная зона (температура образования от ~800-900°C до ~1200-1500°C) выделяется парагенезисом кордиерит + кварц + тридимит + муллит (псевдомуллит); для самой низкотемпературной зоны (температура ниже ~800-900°C) характерен парагенезис муллит + кварц (в слабо переработанных

породах нередко сохраняются реликтовые структурно-текстурные признаки). Для неизмененных пород характерны мусковит и гидрослюда, хлорит, кварц, полевые шпаты; в некоторых образцах присутствуют накрит, иногда доломит или сидерит. В термически неизмененных породах отсутствуют значимые структурные и минеральные пирометаморфические трансформации, что связано с высокой степенью катагенетических преобразований угленосной толщи. В поверхностных и приповерхностных частях терриконов присутствуют фумарольные образования (сульфатные коры гипсового и магний-алюмо-аммониевого типов) и «чёрные блоки» с асфальтоподобной корой (высокоуглеродистые породы с безводными сульфатами магния, алюминия, аммония и калия, нашатырем, серой), обязанные своим происхождением процессам, подобным пневматолитовому.

Полученные результаты представляют интерес при проектировании рациональных схем отработки и индустриального использования пирометаморфически преобразованных пород терриконов или целенаправленного отжига пород терриконов для достижения желаемых свойств.

Литература

1. Артемов И.А., Попов Ю.В., Шарова Т.В. Минералого-петрографическая зональность пород горящих терриконов песчано-глинистого состава Восточного Донбасса. // Успехи современного естествознания. – 2022. – № 11. – С. 107–112.
2. Артемов И.А., Попов Ю.В. Минералы фумарольных образований горящего терриконика шахты «им. Пролетарской диктатуры» (г. Шахты). // Материалы 6-й Международной научно-практической конференции «Инновационные перспективы Донбасса». Т. 6. Донецк: Изд. Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 10–12.
3. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Использование техногенного сырья в производстве нерудных строительных материалов. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 1(182). – С. 111–117.
4. Воробьев А.Е., Портнов В.С., Маусымбаева А.Д., Бекетова М.С. Изменение качества углепородной массы в терриконах. // Труды университета. – 2016. – № 3(64). – С. 61–65.
5. Гамов М.И., Рылов В.Г., Мещанинов Ф.В., Наставкин А.В. Термобарогеохимическое моделирование процессов преобразования породных отвалов угольных шахт Восточного Донбасса. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 11. – С. 158–168.
6. Кизильштейн Л.Я., Дубов И.В., Шпицглюз А.Л., Парада С.Г. Компоненты зол и шлаков ТЭС. М.: Энергоатомиздат, 1995. – 176 с.
7. Котельников Д.Д., Конюхов А.И. Глинистые минералы осадочных пород. М.: Недра, 1986. – 247 с.
8. Недоливко Н.М. Геохимия: учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 102 с.
9. Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А. Микроструктура глинистых пород. / Под редакцией Академика Е.М. Сергеева. – М.: Недра, 1989. – 211 с.
10. Портола В.А., Протасов С.И., Бобровникова А.А., Серегин Е.А. Оценка длительности инкубационного периода самовозгорания углесодержащих пород отвалов. // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 4. – С. 36–41.
11. Сокол Э.В., Ларина И.А., Максимова Н.В. Фазовые преобразования пелитов в процессах пирогенеза (на примере горельников Челябинского угольного бассейна). // Минералогия техногенеза. – 2001. – Т. 2. – С. 193–212.
12. Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. – 152 с.

13. Шпирт М.Я., Горлов Е.Г., Шумовский А.В. Концепция технологического комплекса переработки отходов добычи и обогащения углей с получением широкого спектра товарной продукции. // *Химия твердого топлива*. – 2019. – № 6. – С. 35–40.
14. Щербакова Е.П. Краткий очерк минералогии горелых угольных отвалов. // *Уральский геологический журнал*. – 2018. – № 4(124). С. 14–29.
15. Akulov N., Akulova V. Pyrolysis of technogenic-redeposited coal-bearing rocks of spoil heaps. // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10. Issue 4. Art. No. 122. – 12 p. DOI: 10.3390/geosciences10040122.
16. Gogola K., Rogala T., Magdziarczyk M., Smolinski A. The mechanisms of endogenous fires occurring in extractive waste dumping facilities. // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. Issue 7. Art. No. 2856. – 14 p. DOI: 10.3390/su12072856.
17. Matysek D., Jirasek J. Mineralogy of the coal waste dumps from the Czech part of the Upper Silesian Basin: Emphasized role of halides for element mobility. // *International Journal of Coal Geology*. – 2022. – Vol. 264. No. 1. Art. No. 104138. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104138.
18. Rakhimova G., Stolboushkin A., Vyshar O., Stanevich V., Rakhimov M., Kozlov P. Strong structure formation of ceramic composites based on coal mining overburden rocks. // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7. Issue 5. Art. No. 209. – 21 p. DOI: 10.3390/jcs7050209.
19. Ribeiro J., Suarez-Ruiz I., Flores D. Coal related fires in Portugal: New occurrences and new insights on the characterization of thermally affected and non-affected coal waste piles. // *International Journal of Coal Geology*. – 2022. – Vol. 252. Issue 5. Art. No. 103941. DOI: 10.1016/j.coal.2022.103941.
20. Yavruyan K., Kotlyar V. Estimation of chemical and mineral composition, structural features, and pre-firing technological properties of waste coal heaps for ceramic production. // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14. Issue 7. Art. No. 1905. – 12 p. DOI: 10.3390/buildings14071905.

References

1. Artemov I.A., Popov Yu.V., Sharova T.V. Mineralogical and petrographic zoning of rocks of burning sandy-argillaceous waste heaps of the Eastern Donbass. *Advances in modern natural science*. 2022. No. 11. pp. 107–112. (In Russ)
2. Artemov I.A., Popov Yu.V. Minerals from fumarolic formations of the burning terrikon of the Proletarskaya Diktatura mine (Shakhty). In: *Proc. of the 6th Int. Sci. and Pract. Conf. "Innovative Prospects of Donbas."* Vol. 6. Donetsk. Donetsk National Technical University. 2020. pp. 10–12. (In Russ)
3. Buravchuk N.I., Guryanova O.V. The use of technogenic materials in the manufacture of non-metallic building materials. In: *Proceedings of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science*. 2015. No. 1(182). pp. 111–117. (In Russ)
4. Vorobyov A.E., Portnov B.C., Mausymbaeva A.D., Beketova M.S. Changes in the quality of coal rock mass in spoil heaps. *University Proceedings*. 2016. No. 3(64). pp. 61–65. (In Russ)
5. Gamov M.I., Rylov V.G., Meshchaninov F.V., Nastavkin A.V. Thermobarogeochemical modeling of the transformation processes of rock dumps at coal mines in the Eastern Donbass. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2016. No. 11. pp. 158–168. (In Russ)
6. Kizilstein L.Ya., Dubov I.V., Shpitsgluz A.L., Parada S.G. Components of ash and slag from thermal power plants. Moscow. Energoatomizdat. 1995. 176 p. (In Russ)
7. Kotelnikov D.D., Konyukhov A.I. Clay minerals of sedimentary rocks. Moscow. Nedra. 1986. 247 p. (In Russ)
8. Nedolivko N.M. *Geochemistry: textbook*. Tomsk. TPU. 2005. 102 p. (In Russ)
9. Osipov V.I., Sokolov V.H., Rummyantseva N.A. Microstructure of clayey rocks. Ed. Academician E.M. Sergeev. Moscow. Nedra. 1989. 211 p. (In Russ)
10. Portola V.A., Protasov S.I., Bobrovnikova A.A., Seregin E.A. Assessment of the incubation period for spontaneous combustion of coal-containing waste rock. *Bulletin of the Scientific Center for Safety in the Coal Industry*. 2020. No. 4. pp. 36–41. (In Russ)

11. Sokol E.V., Larina I.A., Maksimova N.V. Phase transformations of pelites in pyrogenesis processes (based on the example of the Chelyabinsk coal basin). *Mineralogy of Technogenesis*. 2001. Vol. 2. pp. 193–212. (In Russ)
12. Chesnokov B.V., Shcherbakova E.P. *Mineralogy of burnt waste dumps in the Chelyabinsk coal basin (experience in technogenic mineralogy)*. Moscow. Nauka. 1991. 152 p. (In Russ)
13. Shpirt M.Ya., Gorlov E.G., Shumovsky A.V. Concept of a technological complex for processing coal mining and enrichment waste to obtain a wide range of commercial products. *Solid Fuel Chemistry*. 2019. No. 6. pp. 35–40. (In Russ)
14. Shcherbakova E.P. A brief overview of the mineralogy of burnt coal dumps. *Ural Geological Journal*. 2018. No. 4(124). pp. 14–29. (In Russ)
15. Akulov N., Akulova V. Pyrolysis of technogenic-redeposited coal-bearing rocks of spoil heaps. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. Issue 4. Art. No. 122. 12 p. DOI: 10.3390/geosciences10040122.
16. Gogola K., Rogala T., Magdziarczyk M., Smolinski A. The mechanisms of endogenous fires occurring in extractive waste dumping facilities. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Issue 7. Art. No. 2856. 14 p. DOI: 10.3390/su12072856.
17. Matysek D., Jirasek J. Mineralogy of the coal waste dumps from the Czech part of the Upper Silesian Basin: Emphasized role of halides for element mobility. *International Journal of Coal Geology*. 2022. Vol. 264. No. 1. Art. No. 104138. DOI: 10.1016/j.coal.2022.104138.
18. Rakhimova G., Stolboushkin A., Vyshar O., Stanevich V., Rakhimov M., Kozlov P. Strong structure formation of ceramic composites based on coal mining overburden rocks. *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7. Issue 5. Art. No. 209. 21 p. DOI: 10.3390/jcs7050209.
19. Ribeiro J., Suarez-Ruiz I., Flores D. Coal related fires in Portugal: New occurrences and new insights on the characterization of thermally affected and non-affected coal waste piles. *International Journal of Coal Geology*. 2022. Vol. 252. Issue 5. Art. No. 103941. DOI: 10.1016/j.coal.2022.103941.
20. Yavruyan K., Kotlyar V. Estimation of chemical and mineral composition, structural features, and pre-firing technological properties of waste coal heaps for ceramic production. *Buildings*. 2024. Vol. 14. Issue 7. Art. No. 1905. 12 p. DOI: 10.3390/buildings14071905.