

СТАТЬИ

УДК 553.69:552.13

**МИНЕРАЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ
ПОРОД ГОРЯЩИХ ТЕРРИКОНИКОВ
ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТОГО СОСТАВА ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА**

Артемов И.А., Попов Ю.В., Шарова Т.В.

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону, e-mail: iartemov@sfnu.ru

Отходы угледобычи являются перспективным вторичным сырьем, использование которого во многом ограничено разнообразием и непостоянством минерального состава в объеме породных отвалов. В ходе горения терриконов происходят пирометаморфические трансформации, которые частично нивелируют разнообразие фазового состава и приводят к удалению ряда вредных минеральных примесей. При этом состав продуктов пирометаморфизма в определяющей мере зависит от состава исходных пород. Изучение вещественного состава проведено методами электронно-зондовых исследований и рентгенофазового анализа. В статье приводятся результаты изучения минералого-петрографической зональности горелых пород терриконов Восточного Донбасса (район г. Шахты, с. Прохоровка), относящихся к песчано-глинистому литологическому типу. 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 + муллита (псевдомуллит); для внешней относительно низкотемпературной зоны характерен парагенезис силлиманит + кварц (в слабо переработанных породах нередко сохраняются реликтовые структурно-текстурные признаки). Процессы стеклообразования и рекристаллизации приводят к повышению однородности минеральных составов и появлению микрокристаллических фаз. В поверхностных и приповерхностных частях терриконов присутствуют фумарольные образования (сульфатные коры гипсового и магниевый-алюмо-аммониевого типов) и «чёрные блоки» с асфальтоподобной корой (безводные сульфаты магния, алюминия, аммония и калия, нашатырь, сера, высокоуглеродистые породы), обязанные своим происхождением пневматолитовым процессам.

Ключевые слова: террикон, горелые породы, техногенное месторождение, пирометаморфизм, муллита, псевдомуллит

**MINERALOGICAL AND PETROGRAPHIC ZONING OF ROCKS
OF BURNING SANDY-ARGILLACEOUS WASTE HEAPS
OF THE EASTERN DONBASS**

Artemov I.A., Popov Yu.V., Sharova T.V.

FGAOU VO "Southern federal university", Rostov-on-Don, e-mail: iartemov@sfnu.ru

Coal mining waste is a promising secondary raw material, the use of which is largely limited by the diversity and variability of the mineral composition in the volume of rock dumps. In the course of burning of waste heaps pyrometamorphic transformations occur, which partially level the diversity of the phase composition and lead to the removal of a number of harmful mineral impurities. At the same time, the composition of pyrometamorphism products depends on a certain extent on the composition of the initial rocks. The material composition was studied by electron-probe methods and X-ray diffraction analysis. The paper presents the results of studying the mineralogical and petrographic zoning of buried rocks of the Eastern Donbass (Shakhty, Prokhorovka village) related to the sandy-argillaceous lithological type. Zones with characteristic mineral associations are distinguished among pyrometamorphic rocks 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 often glassy, with traces of melting and flow); the lower-temperature zone (formation temperature from ~800-900 °C to ~1200-1500 °C) is distinguished by the paragenesis of cordierite + quartz + tridymite + mullite (pseudomullite) the outer relatively low-temperature zone is characterized by the sillimanite + quartz paragenesis (relic structural-textural features are often preserved in weakly processed rocks). The processes of glass formation and recrystallization lead to increased homogeneity of mineral compositions and the appearance of microcrystalline phases. Fumarole formations (sulfate crusts of gypsum and magnesium-aluminum-ammonium types) and "black blocks" with asphalt-like crust (anhydrous magnesium, aluminum, ammonium and potassium sulfates, ammonium, sulfur; high-carbonaceous rocks) are present in the surface and near-surface parts of waste heaps, owing their origin to pneumatolytic processes.

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

Отходы угледобычи эффективно используются в металлургии, сельском хозяйстве, при производстве строительных материалов, керамики и в других отраслях промышленности. Их применение позволяет значительно снизить сырьевые затраты для местных производителей, од-

нако в России менее 5% от общего объема образующихся углеотходов вовлекаются во вторичную переработку [1], при том что на территории России насчитывается не менее 2000 терриконов, содержащих 3.3 млрд м³ породной массы [2]. В немалой мере это связано со сложностью комплексной пере-

работки плохосортированного полиминерального сырья. Порядка 25% отвалов горит за счет экзотермической деструкции сульфидов с выделением серы и окисления частиц угля (рассмотрение определяющих самовозгорание факторов и ссылки на работы в этой области содержатся, например, в статье [3]), и значительная часть является перегоревшими, 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. В силу различий литологического состава породной массы актуально изучение состава горелых пород разных угольных бассейнов и представленных в них литологических типов.

Основными задачами исследования являются изучение закономерностей пирометаморфических преобразований, состава минеральных ассоциаций и создаваемой ими минералого-петрографической зональности в породной массе. Полученная информация призвана повысить эффективность разработки технологических схем использования горелых пород, в первую очередь как сырья для керамической промышленности (отошители и интенсификаторы спекания в керамике и пр.). Не менее интересны эти объекты и как «природные лаборатории» для исследования закономерностей техногенного минералообразования в ходе пирометаморфических и пневматолитовых процессов, сопровождающихся кристаллизацией специфических минеральных ассоциаций [2; 4; 5].

Материалы и методы исследований

В работе приводится описание минералого-петрографического состава горелых пород терриконов Восточного Донбасса, имеющих песчаниково-алевролит-аргиллитовый с частицами угля состав исходных пород, и характеризуется типичная для них зональность производных пирометаморфизма. Источником отвалов служат породы дяконовской, смоляниновской, белокалитвенской, каменской, алмазной, горловской свит среднего карбона. В каменской и горловской свитах наибольшим распространением пользуются песчаники и аргиллиты (на каждую разновидность пород приходится ~40% мощности разреза), в смоляниновской и дяконовской свитах преобладают алевролиты и аргиллиты (до 90%), в белокалитвенской и алмазной – алевролиты

и песчаники (аргиллитов до 20%), во всех свитах присутствие известняков незначительно. По литологическому составу изучаемые терриконы можно отнести к песчано-глинистому литологическому типу [6].

Основными объектами изучения послужили терриконы 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. Терриконик состоит из нескольких вершин, некоторые из них находятся в активной стадии горения (вершины окрашены в ярко-рыжий цвет, на поверхности развиты фумарольные каналы и крышки с выходами горячих паров и газов); высота терриконика в наивысшей точке составляет 30 метров. Отвал частично разрабатывается; для изучения в пределах отвала доступны породы преимущественно поверхностных частей, в том числе фумарольные образования. Террикон шахты им. Артёма также расположен в г. Шахты; эксплуатировался с 1911 по 1995 г.; высота около 30 м. Терриконик полностью перегоревший, разрабатывается, что позволяет провести изучение и опробование внутренних частей активной зоны, вплоть до участков плавления пород (среди пород наблюдаются многочисленные жилы и желваки застывших расплавов, представляющие собой черные, губчатые, пористые прожилки в керамоподобной перегоревшей породе). Террикон шахты № 62 находится в с. Прохоровка; эксплуатировался с 1920-х годов по 1994 г.; высота около 15 м. Отвал состоит из двух вершин, одна из которых наполовину выработана (как материал для дорожно-строительных работ), вследствие чего вскрыты наиболее глубокие зоны активной части террикона. В составе отвала широко представлены отвальные спёки с обломками перегоревших ярко-желтых пород, образованных за счет аргиллитов и алевролитов, а также черные тяжелые пористые шлакоподобные породы со следами течения и вспенивания.

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 анализируют

вались на дифрактометре ARLX'TRA с излучением $\text{CuK}\alpha_1$ 1,5406 Å, $\text{CuK}\alpha_2$ 1,5444 Å), результаты которых дополняют ранее проведенные исследования углеотвалов Ростовской области [6; 7]. Основной объем исследований выполнен на базе центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр исследований минерально-сырья и состояния окружающей среды» Южного федерального университета.

Результаты исследования и их обсуждение

В общем виде в строении террикона прослеживается зональность с выделением зоны выветривания, зоны фумарольных образований на поверхности террикона и «чёрных блоков» с асфальтоподобной корой, обязанных своим происхождением пневматолитовым процессам, и активной зоны внутри террикона, подразделяемой по уровню пирометаморфических преобразований пород. Минералого-петрографический состав метапород терриконов определяется изменением условий, контролируемых генерируемыми в очаге горения температурой и флюидным потоком, а также составом протолита. На внутреннее строение террикона влияет множество факторов, в том числе форма породного отвала (конический, хребтовой или плоский отвалы по-разному аккумулируют тепло и подвергаются воздействию природных факторов), его литологический и гранулометрический состав (в разное время отвал отсыпается разными по своим свойствам породами), количество угольного и сульфидного материала в породе, также количеством доступного кислорода и воды, которые ускоряют окисление угля и сульфидных минералов.

Фумарольные образования приурочены к окислительно-восстановительному геохимическому барьеру на поверхности отвала, представляют собой белые и желтые пористые хрупкие агрегаты часто с трубчатым строением; образуют сульфатные коры магний-алюмо-аммониевого и гипсового минеральных типов [8]. Первый тип имеет разнообразный минеральный состав (рис. 2а) – сложен сульфатами алюминия, магния, кальция аммония и их кристаллогидратами (ведущие минералы – гипс, эпсомит, буссенготит, годовиковит, алюминит, чермигит, 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.

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

Рассмотренный комплекс пород образован в ходе пневматолитового переноса и отложения продуктов сернокислотного с участием аммиака разложения алюмосиликатных пород терриконов и поступивших из нижележащей зоны «чёрных блоков» продуктов битумов и углей.

«*Чёрные блоки*» представлены черными (за счет насыщенности углеродистым веществом) массивными плотными агрегатами, сложенными преимущественно слабокристаллизованным муллитом с кварцем, кристобалитом, силлиманитом. В изученных терриконах эти образования маломощные и представлены фрагментарно, что объясняется низким содержанием глинистых компонентов (их формирование связано с метаморфизмом глинистых углесодержащих пород в условиях сильно ограниченного доступа кислорода для горения [3]). Флюидогенно-преобразованные высокоуглеродистые породы образуются при температурах до 500 °С на путях движения флюидов [9] и залегают среди продуктов глубокого обжига, обрамляющих очаг активного горения.

В составе пирометаморфических пород терриконов по результатам минералого-петрографических исследований можно выделить три зоны, различающиеся минеральными парагенезисами, отражающими разные условия минералообразования (в первую очередь температурные) и распределение разных петрографических разностей в составе преобразованного отвала (рис. 1).

Породы первой (внешней) зоны, в ряде работ определяемые как «обожжённые породы», образуют осыпи обломков белого, бледно-желтого и бледно-розового цвета, со скрыто- и мелкокристаллической структурой, легкие, хрупкие, трещиноватые, частично сохранившие структурно-текстурные признаки пород протолита и реликтовые минералы (гидрослюды, каолинит, альбит-олигоклаз, ортоклаз, кварц и пр.). Для их высокотемпературных разностей характерна метаморфическая силлиманит-кварцевая минеральная ассоциация.

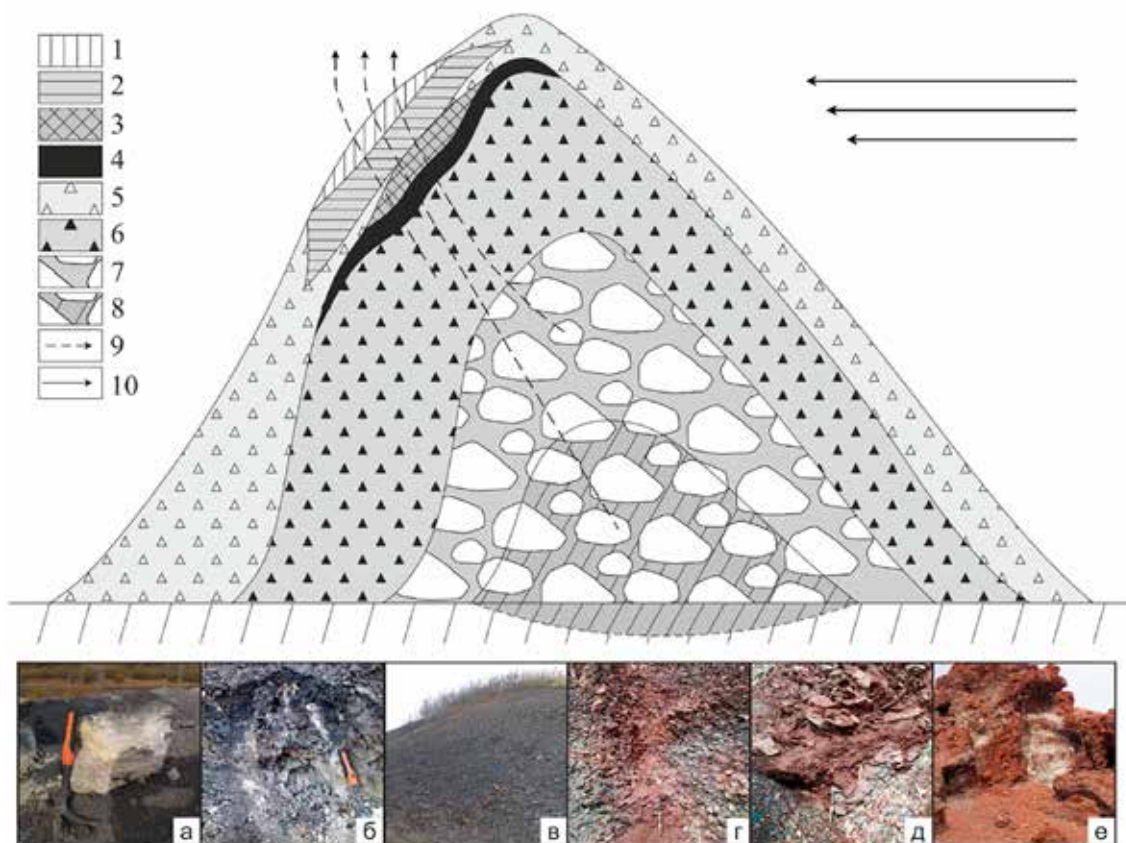


Рис. 1. Схема строения горящего породного отвала:

1 – фумарольные коры гипсового состава; 2 – фумарольные коры магний-алюмо-аммониевого типа; 3 – асфальтоподобная кора; 4 – «черный блок»; 5 – осыпи негорелых пород; 6 – породы первой (низкотемпературной) зоны; 7 – породы второй (среднетемпературной) зоны; 8 – породы третьей (высокотемпературной) зоны; 9 – направление движения парогазового потока; 10 – направление преобладающих ветров: а – фумарольные коры, б – асфальтоподобная кора, в – осыпи негорелых пород, г – породы первой зоны; д – породы второй зоны; е – породы третьей зоны

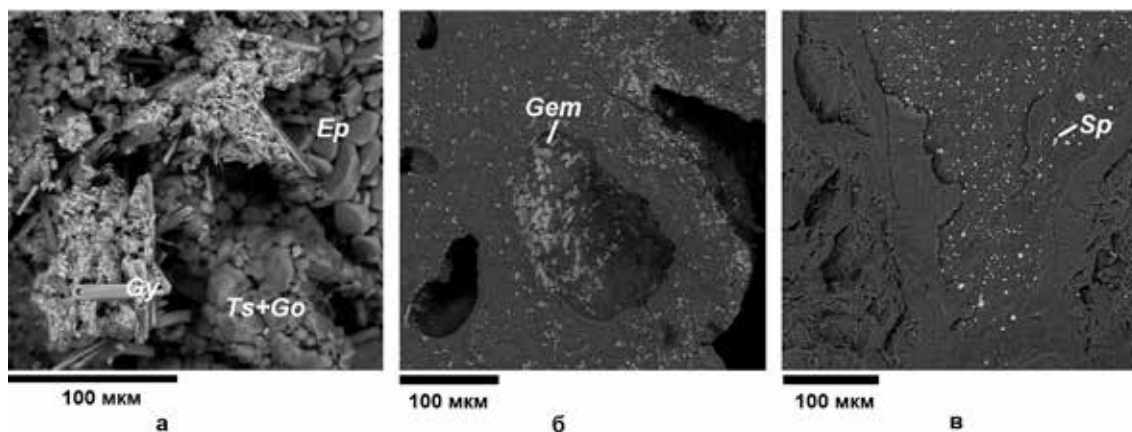


Рис. 2. Строение некоторых характерных пород террикоников:

а – ассоциация минералов магний-алюмо-аммониевого типа фумарольной коры; б – микрокристаллическая, частично аморфизованная, кордиерит-кварц-тридимит-муллитовая с гематитом порода второй зоны; в – стекловатая со следами течения, содержащая муллит, кварц и шпинель, порода третьей зоны.

Обозначения минералов: Ep – эпсонит, Gem – гематит, Go – годовиковит, Gy – гипс, Sp – шпинель, Ts – чермигит

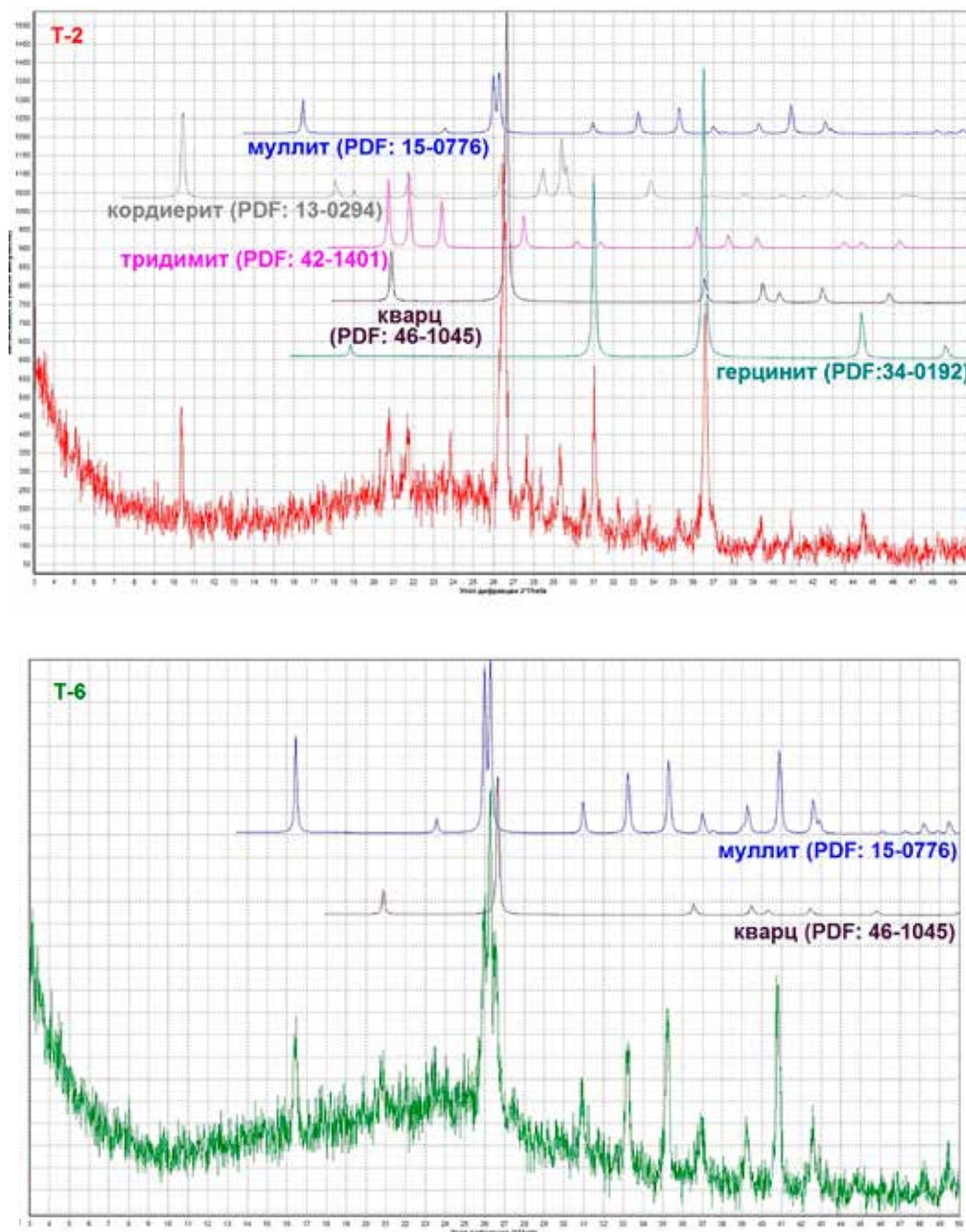


Рис. 3. Характерные дифрактограммы образцов второй (Т-2; метааргиллит) и третьей (Т-6; массивная микрокристаллическая порода) минерало-петрографической зон терриконов. Приведены дифрактограммы идентифицированных фаз из базы PDF-2 (в скобках указаны номера карточек)

Следует отметить, что породы этой зоны частично аморфизуются, в них формируются микрокристаллические фазы, что повышает их реакционную активность. На обнаженной части описываемых пород наблюдаются многочисленные друзовые сростки плоских кристаллов гипса.

Породы второй зоны преимущественно красного, розового цвета, иногда зеленые внутри, массивные, прочные трещиноватые,

утратившие реликтовые структурно-текстурные особенности (рис. 2б), содержащие стекловатый материал и несущие признаки оплавления и спекания. Характерная минеральная ассоциация – кордиерит-кварц-тридимит-муллитовая (псевдомуллитовая) со шпинелью, гематитом, кристобалитом, оливином (рис. 3, обр. Т-2). Оценка температурных условий образования этой минеральной ассоциации определяется образова-

нием муллита из метаглинистых минералов, исходя из температуры, которая составляет ~900-1000 °С [10], его образованию предшествует появление псевдомуллита (при ~800 °С). Реакция псевдомуллит → муллит + кристобалит приводит к рекристаллизации с образованием стабильной ассоциации кордиерит-муллит-кристобалит, что определяет нижний температурный рубеж данной зоны, близкий к 800-900 °С, также ограничивающий диапазон стабильного сосуществования андалузита и кварца [11]. Среди пород этой зоны, как и в вышележащей зоне, отмечаются «черные блоки», обогащенные сажистым углеродом.

Породы третьей, наиболее высокотемпературной, зоны окрашены в бурый и черный цвет, встречаются пестроокрашенные разности, в большей степени сложены стеклом; представлены клинкерами с жилами и линзами застывшего расплава и черного пористого шлакоподобного агрегата со следами течения и вспенивания (рис. 2в). Породы массивные, фарфоровидные и очень прочные. Ассоциирующий с аморфной фазой или слагающий мелкокристаллические породы парагенезис – муллит + кварц, кристобалит, тридимит, реже отмечаются санидин и микрофазы железистого оливина, силлиманита, кордиерита, шпинели, гематита, магнетита (рис. 3, обр. Т-6). Наблюдаемая на дифрактограммах однородность состава позволяет предполагать развитие процессов муллитизации силлиманита и кордиерита, протекающих при температурах выше 1200-1500 °С (и сильно зависящую от размера минеральных зерен и содержания щелочей).

Заключение

Приведённые результаты исследований характеризуют минералого-петрографическую зональность в горелых породах угольных отвалов песчаниково-алевролит-аргиллитового состава (по [6] – песчано-глинистого литологического типа), характерных для восточной части Донецкого бассейна. В отличие от хорошо изученных в минералогическом плане горельников Челябинского угольного бассейна [3; 4], они характеризуются низким содержанием карбонатов, что проявляется в незначительном развитии высокотемпературных кальций-содержащих силикатов (при этом не обнаружены высококальциевые фазы – ларнит, спуррит, афанасьевит и пр.), в отсутствии связанных с щелочным геохимическим барьером ассоциаций (содержащих кальций-ферритовые минералы, например ацикулит),

в слабой дифференцированности состава фумарольных кор. Среди пирометаморфических пород по мере удаления от горящего ядра выделяются зоны с характерными минеральными парагенезисами: муллит + кварц + кристобалит → кордиерит + кварц + тридимит + муллит (псевдомуллит) → силлиманит + кварц, тридимит, кристобалит → метаосадочные породы с первичными минералами и структурно-текстурными признаками (значительная доля кварца в составе ассоциаций является унаследованной от протолита). Во внутренних зонах процессы рекристаллизации и стеклообразования приводят к повышению однородности минеральных составов и появлению микрокристаллических фаз. Полученные результаты представляют интерес при проектировании рациональных схем отработки и промышленного использования пирометаморфически преобразованных пород терриконов или целенаправленного отжига пород терриконов для достижения желаемых свойств на территории Восточного Донбасса.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. Портола В.А., Протасов С.И., Бобровникова А.А., Сергин Е.А. Оценка длительности инкубационного периода самовозгорания углесодержащих пород отвалов // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2020. № 4. С. 36-41.
4. Чесноков Б.В., Щербакова Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.
5. Щербакова Е.П. Краткий очерк минералогии горелых угольных отвалов // Уральский геологический журнал. 2018. №4 (124). С.14-29.
6. Гипич Л.В. Особенности вещественного состава отвальных пород шахтных отвалов Восточного Донбасса и новые направления их использования: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Ростов-на-Дону, 1998. 25 с.
7. 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.
8. Артемов И.А., Попов Ю.В. Минералы фумарольных образований горящего терриконика шахты «им. Пролетарской диктатуры» (г. Шахты) // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 6-й Международной научно-практической конференции (Донецк, 26-28 мая 2020 г). Том 6. Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. С. 10-12.
9. 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 (научно-технический журнал). 2016. № 11. С. 158-168.
10. Абдрахимов В.З., Колпаков А.В., Денисов Д.Ю. Кристаллизация муллита при синтезе керамических материалов из отходов производств // Концепт. 2013. Т. 3. С. 2716-2720.
11. Бережной А.С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы. Киев: Наукова думка, 1988. 193 с.