

Самовозгорание техногенно-переотложенных угленосных отложений Кузбасса*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-512-00-00>

В статье рассмотрен один из интереснейших природных процессов – самовозгорание техногенно-переотложенных угленосных отложений на Осинниковском месторождении каменных углей. Основываясь на изучении литолого-геохимических особенностей пиролизно измененных угленосных отложений терриконов, авторами сделаны следующие выводы: эпигенез угленосных пород сопровождается экзотермическим процессом, в результате которого происходит низкотемпературный пиролиз; пиролиз способствует метасоматическим преобразованиям пород, заключающимся в активном выносе из угленосной массы таких компонентов, как S–C–N и др.; в процессе струйного газового массопереноса через фумарольные каналы происходит конденсация газообразных продуктов пиролиза; большое скопление в приповерхностной части и на поверхности терриконов высокомолекулярных углеводородных соединений в форме асфальтенов, смол и серы способствует самовозгоранию и пирогенезу (горению) пород.

Ключевые слова: самовозгорание, угленосная толща, террикон, биохимический очаг, сера, мягкий пиролиз.

Для цитирования: Самовозгорание техногенно-переотложенных угленосных отложений Кузбасса / Н.И. Акулов, С.А. Прокопьев, Е.С. Прокопьев и др. // Уголь. 2022. № 512. С. 53-59. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-512-53-59>.

ВВЕДЕНИЕ

На Земле произошло множество событий, связанных с горением каменного угля в природных условиях [1, 2, 3, 4, 5]. Иначе обстоит дело с горением техногенно-переотложенных угленосных отложений терриконов, возраст которых не превышает нескольких десятков лет. Терриконы представляют собой техногенно-переотложенные угленосные породы, внутри

* Исследование проведено при финансовой поддержке Комплексной научно-технической программы «Разработка и внедрение комплекса технологий в области разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г., № 1144-р, г. Москва.

АКУЛОВ Н.И.

Доктор геол.-мин. наук,
Ведущий научный сотрудник
ФГБУН «Институт земной коры СО РАН»,
664033, г. Иркутск, Россия,
e-mail: akulov@crust.irk.ru

ПРОКОПЬЕВ С.А.

Канд. тех. наук, руководитель отдела
комплексного использования минерального сырья,
ФГБУН «Институт земной коры СО РАН»,
генеральный директор ООО НПК «Спирит»,
664033, г. Иркутск, Россия,
e-mail: psa@spirit-irk.ru

ПРОКОПЬЕВ Е.С.

Ведущий инженер отдела комплексного
использования минерального сырья
ФГБУН «Институт земной коры СО РАН»,
664033, г. Иркутск, Россия,
e-mail: prokopyeves@mail.ru

АЛЕКСЕЕВА О.Л.

Ведущий инженер отдела комплексного
использования минерального сырья
ФГБУН «Институт земной коры СО РАН»,
664033, г. Иркутск, Россия,
e-mail: RSSm38@yandex.ru

которых происходят лито-геохимические и пиролизно-пирогенные процессы.

За последние десятилетия изучению продуктов пирогенного метаморфизма техногенно-переотложенных пород, складированных в терриконы, был посвящен целый ряд весьма интересных исследований [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]. Несмотря на это, многие вопросы, связанные с процессами, происходящими при природном саморегулировании пиролизного процесса, так и не были рассмотрены.

Занимаясь изучением сформированных техногенным способом углесодержащих литосистем, было исследовано несколько терриконов Кузбасса, которые поражают многообразием протекающих в них литогеохимических процессов. Сложность проведения подобных исследований заключается в том, что их познание находится на стыке целого ряда дисциплин: литологии, минералогии, физической химии (химическая термодинамика), неорганической химии (химический состав минералогических ассоциаций), органической химии (биохимические преобразования отложений), инженерной геологии и геоэкологии.

Цель настоящей работы – основываясь на результатах геологического и литогеохимического изучения процесса самовозгорания углесодержащих толщ, слагающих терриконы, попытаться выявить основные эпигенетические закономерности последовательности их преобразования.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспедиционные работы проводились на Осинниковском (г. Осинники, Кузнецкий угольный бассейн) месторождении каменного угля (рис. 1). Основное внимание было сосредоточено на комплексах техногенно-переотложенных угленосных пород – шахтных отвалах (терриконах). Ранее они состояли из обломков горных пород разнообразных как по размерам и форме, так и по литологическому составу: песчаники, аргиллиты, алевролиты, углистые алевролиты, уголь и т.д. Впоследствии на большинстве терриконов произошли пожары (пирогенный метаморфизм), в результате которых они превратились в различные типы пирогенных брекчий, паралавы, паралавобрекчии, порцелланиты, шлакозолы и т.д. [14].

Терриконы оказывают губительное влияние на окружающую среду, а момент их горения представляет собой настоящее экологическое бедствие, так как почти всегда сопровождается взрывами, а иногда и гибелью людей от ожогов и удушливых газов.

Горящий террикон Os-1 расположен на северной окраине г. Осинники (GPS = N53°37.746' E087°21.917').



Рис. 1. Схематическая карта района исследований
Fig. 1. Schematic map of the surveyed area

Изучение данного террикона происходило во время его ликвидации: экскаваторная разборка горячей массы сопровождалась бульдозерной расчисткой и капельным охлаждением водой перемещаемой бульдозером породной массы с последующим ее вывозом на самосвалах в район захоронения.

Большой экологический вред наносят и «пассивно» дымящиеся на некоторых терриконах фумаролы. Их деятельность исследовалась на относительно высоком (около 32 м) и большом (эллипсовидное основание размером 257 × 367 м) терриконе Os-2 (GPS = N53°37.528' E087°22.562') (рис. 2).



Рис. 2. Космоснимок общего вида террикона Os-2 в г. Осинники
Fig. 2. Satellite image of the overall view of the Os-2 waste dump in the town of Osinniki

Извлечение углеводородов (битумоидов) из образцов проводилось с использованием неполярного органического растворителя. В качестве экстрагента применялся хлороформ, так как хлороформенная экстракция позволяет определять содержание углеводородов различной природы и их производных. Исследование общего содержания битумоидов и их группового состава проводилось с помощью хромато-масс-спектрометра GCMS-QP2010NC Plus фирмы Shimadzu, программный комплекс которого оснащен обширной библиотекой спектров химических соединений.

Анализ осуществлялся в режиме ступенчатого изменения градиента полярности с шестью фронтами. Предел обнаружения углеводородов на данном приборе и среднее квадратичное отклонение относительной погрешности их определения составляют 0,001% и 15% соответственно.

Отбор проб из горящего террикона осуществлялся с привлечением экскаватора. На разрабатываемых для дорожного строительства терриконовых карьерах опробование производилось со стенок экскаваторных расчисток, а в труднодоступных для техники местах пробы отбирались из шурфов.

Содержания петрогенных (Fe_2O_3 (общ.), Al_2O_3 , MgO , CaO , SiO_2 , MnO , TiO_2 , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , S (общ.)) и рассеянных (Cr , V , La , Ce , Nd , Pb , Ni , Zn , As , Cu , Sc , Ga , Co , Ba) элементов в пробах определены рентгенофлуоресцентным методом анализа (РФА) с использованием рентгеновского спектрометра S4 EXPLORER фирмы Bruker (Германия). При этом использовались стандартные приемы и методики анализа [15]. Излучатели изготавливались путем прессования анализируемых образцов в таблетки (аналитик Е.В. Худоногова).

Для оценки точности результатов анализа проведены метрологические исследования. Полученные значения

среднеквадратичных отклонений результатов анализа соответствуют III категории точности.

Рентгенометрические определения выполнены на дифрактометре ДРОН-3.0 методом съемки порошковых препаратов. Экспериментальные условия съемки следующие: Ni – фильтр, $\text{CuK}\alpha$ – излучение, напряжение – 25 кВ и сила тока – 20 мА. Рентгенометрические исследования проведены З.Ф. Ушаповской.

Анализ углеводородного состава продуктов пиролиза выполнен методом количественной спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядрах ^1H по методике Г.А. Калабина с соавторами [16] в Аналитическом центре Иркутского университета на ЯМР-спектрометре Varian VXR-500S (ответственный исполнитель А.В. Рохин).

ПИРОЛИЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕРРИКОНАХ

Детальное изучение терриконов позволило выявить целый ряд действующих фумарол (рис. 3). Фумаролы образуют вокруг своих выходов на поверхность террикона ореолы, представленные продуктами низкотемпературного (мягкого) пиролиза и, прежде всего, черными смолистыми и черно-коричневыми маслянистыми углеводородами.

Местами фумарольные каналы окружены почковидными светло-коричневыми маслянистыми натечками (асфальтенами) толщиной до 0,1 м и диаметром около метра. Асфальтены обладают гидрофобностью и легко ломаются руками, хотя в подогретом состоянии – вязкие. У смолянистого вещества специфический запах, который напоминает запах смеси мазута и керосина. Оно легко воспламеняется от спички и горит ярким коптящим пламенем, издавая запах жженой резины. Черное смолянистое вещество – это консолидированный продукт пиролиза углеводородсодержащих отложений. Его химический анализ показал следующий состав (%): $\text{S}_{\text{общая}}$ – 56,84; F – 0,06; SiO_2 – 18,43;

Al_2O_3 – 5,39; Fe_2O_3 – 0,11; MgO – 0,4; K_2O – 0,19; TiO_2 – 0,08; CaO – 0,01; N_2O – 0,01; P_2O_5 – 0,03; MnO – 0,01; углеводородсодержащее вещество – 18,2. Наряду с этим в его составе обнаружено следующее количество редких и рассеянных элементов (ppm): Ba (91), Ce (17), Zn (16), Cu (15), Pb (13), La (11), Ga (11), Nd (9), Cr (9), Ni (6), As (3), V (2).

Согласно результатам лабораторных исследований, смолянистое вещество представляет собой сжиженную пластичную массу (мезофазу). По данным Б.Н. Кузнецова [17], в условиях лабораторного пиролизного процесса образование пластичной массы (мезофазы) происходит в результате термического прокалывания угля при температуре выше 300°C. Дальнейшее повышение температуры приводит к выделению высокомолекулярных соединений ароматической природы,



Рис. 3. Продукты пиролиза, выносимые из фумарольных каналов

Fig. 3. Pyrolysis products carried out of the fumarole channels

которые при охлаждении сжижаются и образуются так называемые асфальтены.

По данным, полученным при анализе углеводородно-го состава углеродосодержащего вещества, черные смоляные натеки состоят из различных ароматических углеводородов.

Спектры образцов черных смоляных натеков и маслянистых светло-коричневых почковидных образований существенно отличаются как по количественному фрагментному, так и по структурно-групповому составу органической компоненты. Из анализа содержания структурных фрагментов можно предположить, что органическая часть пробы представлена смесью алкил ароматических углеводородов различной степени замещения ароматического кольца и различного строения алифатического заместителя (как нормального, так и изостроения).

Алифатическая часть представлена линейными алифатическими углеводородами (алканами) общей формулы $CH_3(CH_2)_nCH_3$ со средней длиной цепи 9-10 атомов углерода.

В светло-коричневых маслянистых образованиях обнаружены дополнительные сигналы в области 3,35 и 4,51 миллионных долей, характеризующие наличие олефиновых фрагментов ($H_{он}-CH=CH-$) и структурных фрагментов OCH_3 , OCH_2CH_3 ($H_{алк}$). Средняя длина цепи алифатических углеводородов уменьшается и составляет 7-9 атомов углерода. Можно сделать вывод, что данный образец содержит достаточно преобразованную компоненту лигнина $R-Ph-CH_2-C=C<$, где $R = OAlk$. Асфальтены – это обобщенные две или три молекулы смолы, поэтому по своей химической активности они напоминают смолы.

По данным РФА маслянистое светло-коричневое вещество состоит из (%): $S_{общая} - 27,43$; $F - 0,01$; $SiO_2 - 31,69$; $Al_2O_3 - 6,81$; $Fe_2O_{3общее} - 1,39$; $MgO - 0,51$; $K_2O - 0,56$; $TiO_2 - 0,19$; $CaO - 0,01$; $N_2O - 0,01$; $P_2O_5 - 0,02$; $MnO - 0,01$; углеродосодержащее вещество – 31,8. По сравнению с черными асфальтенами в их составе во много раз возрастает количество (ppm): $Ba (230)$, $Cu (120)$, $Pb (41)$, $Ce (37)$, $La (22)$, $Ga (21)$, $Nd (18)$, $Cr (18)$, $V (13)$, $As (12)$, $Ni (10)$ и $Sc (6)$, за исключением $Zn (10)$.

Опасность проведения исследований на терриконах всем известна. Тем не менее нам удалось вскрыть шурфами краевую часть пиролизной зоны, а также одну из фумарольных зон. В шурфе, пройденном вдоль одного из фумарольных каналов до глубины 1,6 м, под светло-коричневыми маслянистыми образованиями вскрыта целая зона, характеризующаяся сложными геохимическими преобразованиями. Вся горная выработка представляла собой царство желтовато-зеленой серы и различных вязких темно-серых примазок и выделений углеводородного происхождения (рис. 4). Друзы и щетки пирамидальной кристаллической серы и различные причудливые почковидные, сферолитовые и скрытокристаллические их агрегаты доминировали на всем протяжении вскрытой зоны. Химический анализ пробы из верхней части шурфа (глубина – 0,3 м) показал, что она на 99,65% состоит из серы (общей), а в качестве примеси

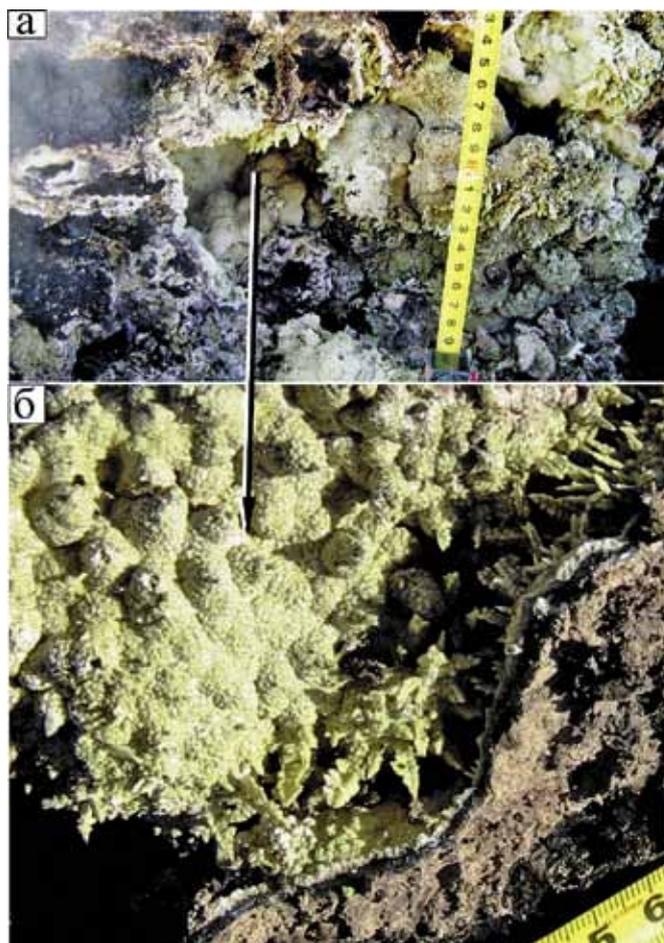


Рис. 4. Зона пиролиза в разрезе (а). Среди продуктов пиролиза всюду господствуют различные формы (б) самородной серы (друзы, почковидные образования, налеты и т.д.)

Fig. 4. A cross-section of the pyrolysis zone (a). Various forms (b) of native sulfur (druses, kidney-like formations, fumarole incrustations etc.) prevail among the pyrolysis products throughout the site

присутствуют $Al_2O_3 - 0,35\%$; $P_2O_5 - 0,02\%$ и $TiO_2 - 0,008\%$. Среди рассеянных элементов определены $Zn (11 ppm)$ и $Cu (4 ppm)$, а содержание других было ниже «чувствительности» прибора.

Химический состав серо-желтой массы аморфного вида со дна шурфа (глубина – 1,6 м) имеет несколько иной состав: 96,11% – сера (общая); 2,08% – Al_2O_3 ; 1,76% – SiO_2 ; 0,05% – Na_2O ; 0,03% – MgO ; 0,02% – P_2O_5 ; 0,02% – K_2O ; 0,01% – CaO ; 0,01% – TiO_2 и 0,05% – $Fe_2O_{3общее}$. Кроме того, в ее составе обнаружен более широкий спектр рассеянных элементов (ppm): $Cu (4)$, $Zn (11)$ и $Ba (12)$.

Вскрытый фумарольный канал уже на глубине 0,4 м соединялся с множеством других, но более мелких каналов, из которых резко активизировался выход паров соляной кислоты и удушливых газов, которые «задымляли» стенки шурфов, и только сильные порывы ветра способствовали проведению работ. Следует отметить, что горячие, рыхлые земляные массы, извлекаемые из шурфа, состоящие из аутигенной серы и ее минераль-

ных агрегатов, а также органических продуктов пиролиза, были подобны клеящему веществу. Они налипали на лопату и обувь так, что их с трудом приходилось очищать от мерзко пахнущей серной массы. Обнаженные почковидные выделения серы и смоляные налеты быстро окислялись, остывали и жухли, превращаясь в рыхлые серовато-белые, пепеловидные образования. Температура на дне шурфа составляла около 70°C. Следует отметить, что пластмассовая авторучка, которая была воткнута в стенку шурфа, под воздействием паров серной кислоты сразу же изменила свой желтый цвет на серовато-белый, а ее блестящая глянцевая поверхность стала матовой.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследованные продукты пиролиза на террикоме поражают воображение огромным содержанием серы. Откуда взялось столько серы? Нам известно, что содержание серы в изученных углях не превышает 2%. Кроме того, сера содержится и в песчаниках, и в алевролитах (породная сера).

В самих угольных пластах сера находится в сульфидной, органической, сульфатной и элементной формах.

На долю сульфидной серы приходится около половины валового ее содержания. Наиболее распространены в углях сульфиды железа, пирит, реже – марказит, галенит, халькопирит и пирротин. Сульфиды железа в ископаемых углях отмечены в форме фрамбоидов, бесформенных выделений и псевдоморфоз по растительным остаткам. Происхождение сульфидной серы в углях связывают с деятельностью сульфатвосстанавливающих бактерий [18, 19].

Органическая сера входит в состав меркаптановых, тиофановых и дисульфидных групп. Валовое ее содержание составляет 1,1-1,4%. Различают две формы органической серы: первичная и вторичная. Содержание первичной серы изменяется от 0,3 до 0,7%, а вторичной – пропорционально сульфидной сере [18].

Сульфатная сера находится в форме барита. Содержание ее в неокисленных углях – до 0,5%. В окисленных углях содержание сульфатной серы увеличивается, и появляются новые формы: ярозит, сульфаты железа, алюминия.

Элементная сера обычно присутствует в незначительных количествах и редко превышает 0,2%. Ее образование связано с деятельностью анаэробных бактерий [19].

Породная сера в составе угленосной формации изучена слабо. К настоящему времени известно, что ее общее содержание в песчаниках около 0,23%, а в аргиллитах – около 0,14%. Повышенное содержание серы в песчаниках связано с присутствием в их составе мелких (до 0,4 см) пиритовых конкреций.

Все вышеперечисленные формы серы не могут сформировать аномально высокое ее содержание, выявленное на исследуемом террикоме. Это позволяет предположить, что ее образование связано с биохимическими процессами, которые в свою очередь, обусловлены деятельностью тионовых бактерий. По данным М.П. Збор-

щика и В.В. Осокина [20], такая связь установлена на терриконах Донецкого угольного бассейна. По их мнению, под воздействием тионовых бактерий (*Thiobacillus ferrooxidans*) в увлажненных условиях в кислой среде из пиритсодержащих углей происходит образование ионитной серы с выделением большого количества тепла. Вероятно, растворенный углекислый газ является источником углерода для развития бактерий, а источником энергии для них являются процессы окисления железа и серы. При самонагревании угленосных пород в центре биохимического «очага» свыше 100°C начинают активизироваться процессы метасоматоза и пиролиза, а при достижении температуры до 120°C сера начинает кипеть, и ее пары совместно с парами воды постепенно перемещаются к поверхности террикона.

Е.К. Лазаренко, О.М. Орлов и Б.С. Панов [21] высказали иную точку зрения. По их мнению, причиной самовозгорания углей в терриконах является способность к адсорбции кислорода, который вступает в химическое взаимодействие с углем. Этот процесс сопровождается выделением тепла, температура угля и пород повышается, что усиливает процессы окисления. Пирит, находящийся в углях и породах, окисляясь, также способствует повышению температуры. Формируется тепловой «очаг», который способствует самовозгоранию угля.

Трудно отдать предпочтение какой-либо из этих точек зрения, не проведя целого комплекса дополнительных исследований. Остановимся на том, что внутри террикона действует тепловой «очаг», и основные метасоматические преобразования обломков пород и процессы пневматолита начинают происходить именно там. Продолжительное температурное воздействие на угленосные обломки пород, идущее от теплового «очага», находящегося в восстановительных условиях, обусловило образование первичных продуктов пиролиза, которые в виде газов и паров устремлялись вверх, прокладывая фумарольные каналы к поверхности террикона. Такое явление Б.В. Чесноков [22] назвал струйным газовым массопереносом. Обогащенные различными химическими компонентами углеводородно-сернистые газы оказываются на поверхности террикона или вблизи нее, где они конденсируются, особенно активно в холодное время года, и осаждаются в виде самородной серы и углеводородных соединений. Кроме того, большое количество пиролизного газа улетучивается в атмосферу.

Пиролизные процессы на терриконах – явление не одноактное. В то время как в одном месте террикона пиролиз уже завершился и начался пиролиз, то в другом месте он может только зародиться. Это продолжается до тех пор, пока вся отвальная масса угленосных пород не пройдет путь от их пиролиза до пиролиза.

Возгорание продуктов пиролиза – начало пирогенного метаморфизма.

Подводя итог данному исследованию, следует подчеркнуть, что согласно результатам химических анализов, при природном пиролизе техногенно-переотложенной углесодержащей массы совершается массоперенос таких минералообразующих компонентов, как S–C–N–Na–

Mn–K–P–Ti–F–Cl–O. Таким образом, полный цикл последовательности мягкого (до 120°C) пиролиза, происходящего в природных лабораториях (терриконах), можно представить в виде следующей последовательности: исходный комплекс техногенно-переотложенных угленосных пород → внутри терриконный тепловой процесс, концентрирующий серу (биохимический) → низкотемпературный пиролизный (мягкий пиролиз) процесс (струйный массоперенос и осаждение компонентов) → самовозгорание (пирогенез).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мягкий пиролиз является ведущим процессом эпигенеза техногенно-переотложенных угленосных отложений. Метасоматоз является неотъемлемой частью низкотемпературного пиролиза. В процессе метасоматоза угленосных отложений происходят струйный массоперенос и осаждение таких компонентов, как S–C–N–Na–Mn–K–P–Ti–F–Cl–O, при этом исходные породы постепенно превращаются в силициты.

Накопление на поверхности терриконов высокомолекулярных углеводородных соединений пиролиза и серы происходит в результате конденсации газообразных продуктов пиролиза, поступающих при струйном массопереносе по фу марольным каналам.

В продуктах низкотемпературного природного пиролиза господствуют самородная сера и серосодержащие асфальтосмолистые вещества. Класс многоядерных углеводородов представлен 13 типами вещественных соединений. Пиролитический углерод и гетероциклические соединения являются основными продуктами мягкого пиролиза.

Рентгенометрические и химические анализы выполнены с использованием оборудования и инфраструктуры Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры Сибирского отделения Российской академии наук.

Список литературы

1. Обручев В.А. По горам и пустыням Средней Азии. М.: Изд-во АН СССР, 1948. 243 с.
2. Bentor Y.K., Kastner M. Combustion metamorphism in Southern California // *Science*. 1976. No 193. P. 486-488.
3. Lindqvist J., Hatherton T., Mumme T. Magnetic anomalies resulting from baked sediments over burnt coal seams in southern New Zealand // *N.Z. J. Geol. Geophys.* 1985. No 28. P. 405-412.
4. Акулов Н.И. Конкреции в угленосных отложениях южной части Тунгусского бассейна // *Литология и полезные ископаемые*. 2006. № 1. С. 83-95.
5. Нигматулина В.А., Нигматулина Е.Н. Пирогенные железные руды древних угольных пожаров Кузбасса // *Записки РМО*. 2009. № 1. С. 52-68.
6. Estimation of Annual CO₂ Emission from Coal Fires in Majiliang Mine, Datong, Northern China Using UAVs Thermal Infrared Remote Sensing Technology / F. Li, A. Qian, G. Sun et al. // *IEEE*. 2018. No 18. P. 1-4.
7. Application of unmanned aerial vehicle (UAV) thermal infrared remote sensing to identify coal fires in the Huojitu coal mine in Shenmu city, China. / X. He, X. Yang, Z. Luo et al. // *Sci. Rep.* 2020. No 10. P. 13895.
8. Underground Coal Fire Detection and Monitoring Based on Landsat-8 and Sentinel-1 Data Sets in Miqan Fire Area, Xinjiang / J.L. Liu, Y.J. Wang, S.Y. Yan et al. // *Remote Sens.* 2021. No 13. P. 1141.
9. Detection, extinguishing, and monitoring of a coal fire in Xinjiang, China. *Environ. Sci. / Z. Shao, X. Jia, X. Zhong et al. // Pollut. Res.* 2018. No 25. P. 26603-26616.
10. The Method of Combating Coal Spontaneous Combustion Hazard in Goafs – A Case Study / D. Szurgacz, M. Tutak, J. Brodny et al. // *Energies*. 2020. No 13. P. 4538.
11. Three-dimensional-imaging thermal surfaces of coal fires based on UAV thermal infrared data / Z. Shao, Y. Li, R. Deng et al. // *IJRS*. 2021. No 42. P. 672-692.
12. Biswal S.S., Raval S., Gorai A.K. Delineation and mapping of coal mine fire using remote sensing data – A review // *IJRS*. 2019. No 40. P. 6499-6529.
13. Biswal S.S., Gorai A.K. Change detection analysis in coverage area of coal fire from 2009 to 2019 in Jharia Coalfield using remote sensing data // *IJRS*. 2020. No 41. P. 9545-9564.
14. Akulov N.I., Akulova V.V., Khudonogova E.V. Pyrogenic metamorphism of the carbonaceous rocks in the south of the Siberian platform / *Coal Combustion Research*, Editors: Christopher T. Grace. New York: Nova Science Publ. Inc., 2010. P. 219-234.
15. Ревенко А.Г., Худоногова Е.В. Рентгенофлуоресцентное определение содержания неосновных и следовых элементов в различных типах горных пород, почв и отложений с использованием спектрометра S4 PIONEER // *Украинский химический журнал*. 2005. Т. 71. № 9-10. С. 39-45.
16. Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарев Д.Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия, 2000. 408 с.
17. Кузнецов Б.Н. Катализ химических превращений угля и биомассы. Новосибирск: Наука, 1990. 301 с.
18. Юровский А.З. Сера каменных углей. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 295 с.
19. Кизильштейн Л.Я. Генезис серы в углях. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1975. 198 с.
20. Зборщик М.П., Осокин В.В. Предотвращение самовозгорания горных пород. Киев: Изд-во Техника, 1990. 176 с.
21. Лазаренко Е.К., Орлов О.М., Панов Б.С. Современное минералообразование в Донецком бассейне // *Минералогический сборник*. 1973. Вып. 3. № 27. С. 254-262.
22. Чесноков Б.В., Щербаква Е.П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.

Original Paper

UDC 551.1/4 (571 + 574) © N.I. Akulov, S.A. Prokopiev, E.S. Prokopiev, O.L. Alekseeva, 2022
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2022, № 512, pp. 53-59
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-53-59>

Title**SPONTANEOUS COMBUSTION OF TECHNOGENIC REDEPOSITED COAL-BEARING DEPOSITS OF KUZBASS****Authors**

Akulov N.I.¹, Prokopiev S.A.^{1,2}, Prokopiev E.S.¹, Alekseeva O.L.¹

¹ FGBUN "Institute of the Earth's Crust of SB RAS", Irkutsk, 664033, Russian Federation

² CEO LLC NPK "Spirit", Shelekhov, 666037, Russian Federation

Authors Information

Akulov N.I., Doctor of Geol.-min. sciences, Leading Researcher, e-mail: akulov@crust.irk.ru

Prokopiev S.A., PhD (Engineering), Head of Department of integrated use of mineral raw materials, General Direktor, e-mail: psa@spirit-irk.ru

Prokopiev E.S., Lead Engineer of Department of integrated use of mineral raw materials, e-mail: prokopyeves@mail.ru

Alekseeva O.L., Lead Engineer of Department of integrated use of mineral raw materials, e-mail: RSSm38@yandex.ru

Abstract

The article considers one of the most interesting natural processes – spontaneous combustion of technogenically redeposited coal-bearing deposits at the Osinnikovskoye coal deposit. Based on the study of lithological and geochemical features of pyrolyzed coal-bearing deposits of heaps, the authors made the following conclusions: the dynamics of epigenesis of coal-bearing rocks is accompanied by an exothermic process, which results in low-temperature pyrolysis; pyrolysis promotes metasomatic transformations of rocks, consisting in the active removal of such components as S–C–N, etc. from the coal-bearing mass; in the process of jet gas mass transfer through fumarole channels, condensation of gaseous pyrolysis products occurs; a large accumulation on the surface of waste heaps of high-molecular hydrocarbon compounds in the form of asphaltenes, resins and sulfur contributes to spontaneous combustion and pyrogenesis (burning) of rocks.

Keywords

Spontaneous combustion, Coal-bearing strata, Waste heap, Biochemical focus, Sulfur, Pyrolysis asphaltenes.

References

- Obruchev V.A. Through the mountains and deserts of Central Asia. Moscow, Publ. House of the Academy of Sciences of the USSR, 1948, 243 p. (In Russ.).
- Bentor Y.K., Kastner M. Combustion metamorphism in Southern California. *Science*, 1976, (193), pp. 486-488.
- Lindqvist J., Hatherton T. & Mumme T. Magnetic anomalies resulting from baked sediments over burnt coal seams in southern New Zealand. *N.Z. J. Geology and geophysics*, 1985, (28), pp. 405-412.
- Akulov N.I. Concretions in coal-bearing deposits of the southern part of the Tunguska basin. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 2006, (1), pp. 83-95. (In Russ.).
- Nigmatulina V.A. & Nigmatulina E.N. Pyrogenic iron ores ancient coal fires of Kuzbass. *Zapiski RMO*, 2009, (1), pp. 52-68. (In Russ.).
- Li F., Qian A., Sun G. & Wang Q. Estimation of Annual CO₂ Emission from Coal Fires in Majiliang Mine, Datong, Northern China Using UAVs Thermal Infrared Remote Sensing Technology. *IEEE*, 2018, (18), pp. 1-4.
- He X., Yang X., Luo Z. & Guan T. Application of unmanned aerial vehicle (UAV) thermal infrared remote sensing to identify coal fires in the Huojitu coal mine in Shenmu city, China. *Sci. Rep.*, 2020, (10), pp. 13895.
- Liu J.L., Wang Y.J., Yan S.Y., Zhao F., Li Y., Dang L.B., Liu X.X., Shao Y.Q. & Peng B. Underground Coal Fire Detection and Monitoring Based on Landsat-8 and Sentinel-1 Data Sets in Miqian Fire Area, Xin Jiang. *Remote Sens*, 2021, (13), p. 1141.
- Shao Z., Jia X., Zhong X., Wang D., Wei J., Wang Y. & Chen L. Detection, extinguishing, and monitoring of a coal fire in Xinjiang, China. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 2018, (25), pp. 26603-26616.

10. Szurgacz D., Tutak M., Brodny J., Sobik L. & Zhironkina O. The Method of Combating Coal Spontaneous Combustion Hazard in Goafs – A Case Study. *Energies*, 2020, (13), p. 4538.

11. Shao Z., Li Y., Deng R., Wang D. & Zhong X. Three-dimensional-imaging thermal surfaces of coal fires based on UAV thermal infrared data. *IJRS*, 2021, (42), pp. 672-692.

12. Biswal S.S., Raval S. & Gorai A.K. Delineation and mapping of coal mine fire using remote sensing data – A review. *IJRS*, 2019, (40), pp. 6499-6529.

13. Biswal S.S. & Gorai A.K. Change detection analysis in coverage area of coal fire from 2009 to 2019 in Jharia Coalfield using remote sensing data. *IJRS*, 2020, (41), pp. 9545-9564.

14. Akulov N.I., Akulova V.V. & Khudonogova E.V. Pyrogenic metamorphism of the carbonaceous rocks in the south of the Siberian platform / Coal Combustion Research, Editors: Christopher T. Grace. New York, Nova Science Publ. Inc., 2010, pp. 219-234.

15. Revenko A.G. & Khudonogova E.V. X-ray fluorescence determination of minor and tracer element contents in various types of rocks, soils, and sediments using the S4 PIONEER spectrometer. *Ukr. Him. Zhurn.*, 2008, 71 (9-10), pp. 39-45.

16. Kalabin G.A., Kanitskaya L.V. & Kushnarev D.F. Quantitative NMR spectroscopy of natural organic raw materials and products of their processing. Moscow, Himiya, 2000, 408 p. (In Russ.).

17. Kuznetsov B.N. Catalysis of chemical transformations of coal and biomass. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 301 p. (In Russ.).

18. Yurovsky A.Z. Sulfur of coals. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1960, 295 p. (In Russ.).

19. Kizilstein L.Ya. Genesis of sulfur in coals. Rostov-on-Don, Izd-vo Rost. un-ta, 1975, 198 p. (In Russ.).

20. Zborshchik M.P. & Osokin V.V. Prevention of spontaneous combustion of rocks. Kyiv, Izd-vo Tekhnika, 1990, 176 p. (In Russ.).

21. Lazarenko E.K., Orlov O.M. & Panov B.S. Modern mineral formation in the Donetsk basin. *Mineralogicheskij sbornik*. 1973, 3 (27), pp. 254-262. (In Russ.).

22. Chesnokov B.V. & Shcherbakova E.P. Mineralogy of burnt dumps of the Chelyabinsk coal basin (experiment in the mineralogy of technogenesis). Moscow, Nauka Publ., 1991, 152 p. (In Russ.).

Acknowledgements

The research was carried out with financial support of the 'Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life' Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144-p of the Government of the Russian Federation as of May 11, 2022.

For citation

Akulov N.I., Prokopiev S.A. Prokopiev E.S. & Alekseeva O.L. Spontaneous combustion of technogenic redeposited coal-bearing deposits of Kuzbass. *Ugol'*, 2022, (S12), pp. 53-59. (In Russ.). DOI: [10.18796/0041-5790-2022-S12-53-59](https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-S12-53-59).

Paper info

Received November 1, 2022

Reviewed November 15, 2022

Accepted November 30, 2022