

С. С. Потапов¹, Н. В. Паршина¹, Н. Г. Максимович²

¹Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс

²Естественнонаучный институт, г. Пермь

МИНЕРАЛОГО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ. СВЯЗЬ С ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ И СПОСОБАМИ ДОБЫЧИ (НА ПРИМЕРЕ ЧЕЛЯБИНСКОГО И КИЗЕЛОВСКОГО БАССЕЙНОВ)

Исследование горелых отвалов Челябинского и Кизеловского угольных бассейнов проводилось на протяжении многих лет [1-9]. Более подробная библиография по горелым угольным отвалам приведена нами в [6]. Обобщение результатов этих исследований проведено при поддержке гранта РФФИ № 05-05-64680 в рамках выполнения темы: «Минералогические и экологические последствия разработки угольных месторождений (на примере Челябинского и Кизеловского бассейнов)».

Методы исследований

Для выявления закономерностей минералого-геохимических процессов в породных отвалах Кизеловского угольного бассейна было проведено изучение различных их частей. Исследование проведено с применением оптического, рентгеноструктурного, термического, электронномикроскопического, микронзондового методов. Изучались исходные пробы грунтов отвалов, отдельные кристаллы и их агрегаты, монофракции минералов, корочки, различные выцветы, примазки. Оптическое изучение проводилось с применением бинокулярных микроскопов МБС-9, МБС-10, поляризационных микроскопов Полам Р-112, Полам Р-211. Рентгеноструктурный анализ выполнен В. Г. Шлыковым на аппарате ДРОН УМ-1, сопряженным с IBM PC-AT в лаборатории геологического факультета МГУ, а также операторами П. В. Хворовым и Т. М. Рябухиной на дифрактометре ДРОН-2.0, CuK_α -излучение в лаборатории комплексных методов исследования минералов Института минералогии УрО РАН. Расшифровка рентгенограмм проводилась по картотеке ASTM рентгеновских данных минералов. Термический анализ осуществлялся на кафедре инженерной геологии и охраны геологической среды МГУ З. А. Кривошеевой и в Институте минералогии на дериватографе системы Паулик и Эрдеи Т. А. Корниловой. Электронномикроскопические исследования проведены в МГУ Л. Б. Грановским на сканирующем электронном микроскопе, совмещенном с микроанализатором «Канскан»; В. Н. Соколовым на «Хитачи» и А. Ю. Сасовым на «Jeolism-50A» на кафедре инженерной геологии и охраны окружающей среды, а также на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430VP, снабженном EDX спектрометром OXFORD Т. А. Титовым в ОИГГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Геологические условия и способы добычи угля в Челябинском и Кизеловском бассейнах

Челябинский угольный бассейн расположен в крупном грабене длиной 170 км и максимальной шириной до 15 км, простирающемся на север-северо-восток. Центральная часть бассейна (Копейский угольный район) примыкает с востока к окраине г. Челябинска (рис. 1). Грабен заполнен нижнемезозойскими отложениями. Максимальная глубина залегания фундамента 3500-4000 м (северная часть грабена). Низы разреза мезозоя представлены эффузивно-осадочными отложениями мощностью 1500-3500 м нижнего триаса (туринская серия). Выше залегает угленосная формация (челябинская серия), состоящая из пяти свит (снизу вверх): еманжелинская (T_2) (углей не содержит), калачевская, коркинская, копейская (T_3) и сугоякская (J). Вдоль длинной оси грабена проходит Центральное антиклинальное поднятие. В Западной и Восточной синклинальных структурах, разделенных этим поднятием, находятся изометричные брахисинклинальные структуры. Их крылья, обращенные в сторону Центрального антиклинального поднятия, крутые (30-40°), а обращенные в сторону бортов грабена – пологие (5-20°). Породы, заполняющие грабен, разбиты различно ориентированными надвигами, сбросами, сбросо-сдвигами, создавшими мелкоблоковое строение угленосных отложений.

Наибольшая угленасыщенность наблюдается в крыльях Центрального антиклинального поднятия и поперечных антиклинальных перегибов, разделяющих брахисинклинальные структуры. В меридиональном направлении периодически проявлены площади с максимальной угленасыщенностью (с севера на юг): Копейская, Камышинская, Коркинская, Еманжелинская, Куллярская, Красносельская. Наиболее мощные (до 200 м) угольные залежи отмечены на Коркинской площади. По падению они быстро расслаиваются на отдельные пласты.

Угли Челябинского бассейна бурые, группы БЗ. После обогащения их зольность составляет около 26 %. Свежие куски угля имеют глубокий черный цвет, смолистый блеск и плоско-раковистый излом. На открытом воздухе они довольно быстро растрескиваются и рассыпаются. Содержание серы в углях невысокое и обычно

не превышает 1 %. Угли используются как энергетическое и газогенераторное топливо. Общие запасы углей 1.1 млрд. т. Разведанные запасы категорий А+В+С₁+С₂ равны 0.766 млрд. т (оценены до глубины 600 м). Максимальная добыча угля отмечена в 1965 г. и составила 23.725 млн. т.

Разработка углей ведется подземным и открытым способом. Последним добывается около 40 % угля. Верхние горизонты основных месторождений отработаны. Глубина разработки в шахтах 220-500 м, а в разрезах 115-420 м. Степень разведанности бассейна до глубины 600-900 м высокая. Есть ряд скважин глубиной до 1000-1200 м.

Углевмещающие породы бассейна представлены аргиллитами, алевролитами, глинами, песчаниками. Обычными являются конкреции и пропластки сидеритов. Широко распространены стволы и куски окаменелого дерева, сложенные карбонатами (обычно доломитом). Состав обломочных пород полимиктовый. Цвет пород варьирует в серых и зеленовато-серых тонах. В породах обычны отпечатки листьев стеблей растений, но фаунистические остатки редки.

Кизеловский угольный бассейн площадью 200 км² находится на западном склоне Уральского хребта (рис. 2). Северная граница проходит приблизительно по р. Вишере, южная – по р. Чусовой. В общей схеме гидрологического районирования СССР Кизеловский угольный бассейн занимает место в северном округе избыточно влажной провинции области Уральской горной страны. Рельеф рассматриваемого района можно охарактеризовать как холмисто-увалистую пенепленизированную поверхность, в которую глубоко врезана сеть речных долин. Важной чертой строения поверхности района является связь элементов рельефа со структурным планом и литологией. В районе выделяются денудационные, эрозионные и карстовые формы рельефа. К денудационным относятся наиболее крупные элементы рельефа – поверхности выравнивания, к эрозионным – долины рек и логов.

По климатическим условиям район можно отнести к зоне умеренных широт. Основная черта климата – континентальность. Средняя годовая температура воздуха изменяется в пределах от -2 до +25 °С. Осадков за год выпадает в среднем около 600-800 мм, из них 64 % в жидкой фазе. Испарение составляет 250-300 мм. Главные реки (с севера на юг): Косьва, Усьва, Вильва (реки второго порядка) принадлежат к бассейну р. Камы (первого порядка) и пересекают район в широтном направлении. Реки третьего порядка текут меридионально, поэтому речная сеть имеет решетчатый тип. Реки рассматриваемой территории относятся к типу рек с четко выраженным весенним половодьем, летне-осенними дождевыми паводками и длительной зимней меженью. Все реки преимущественно снегового питания.

Почвы представлены тяжелосуглинистыми подзолистыми, дерново-подзолистыми и заболоченными. В верхних горизонтах почв сильно снижена сумма поглощенных гидроокислов, по сравнению с материнской породой, почвы кислые. Материнскими почвообразовательными горными породами являются покровные глины и тяжелые суглинки. Леса района отнесены к категории горных.

В геологическом отношении Кизеловский район расположен в северной части внешней складчатой зоны Урала. Основными структурными элементами в районе являются меридионально вытянутые антиклинальные и синклиналильные складки, осложненные разрывными и складчатыми нарушениями различной амплитуды – от легкой волнистой до смещения в несколько сотен метров.

В стратиграфическом отношении бассейн сложен породами палеозоя начиная со среднего девона до нижней перми включительно и покрывающими их четвертичными отложениями. Палеозойские отложения представлены песчаниками, аргиллитами, алевролитами, сланцами, доломитами, известняками, углем и др., общая мощность их достигает 3-4 км.

Девонская система представлена средним, включающим эйфельский и живетский ярусы и верхним отделом, в составе которого выделяют франкий и фаменский ярусы. В бассейне развит терригенно-карбонатный тип разреза. Он начинается светлыми кварцевыми песчаниками такатинских слоев, относящихся к нижнему эйфелю. Вверх по разрезу такатинские слои переходят в песчано-аргиллитовые разности или фациально замещающие их глинистые известняки. Завершается разрез эйфельского яруса бийскими слоями, представленными доломитами и доломитизированными известняками, мощностью от 3 до 90-100 м.

В основании живетского яруса выделяются афонинские слои, сложенные известняками, мергелями, кремнями и глинами, местами битуминозными доломитами. Мощность их изменяется от 5-6 до 75-110 м. Выше последовательно залегают чусовские слои, представленные чередованием песчаников, алевролитов, аргиллитов, глин, доломитов и глинистых известняков, и чеславские слои, сложенные известняками. Мощность чусовских слоев изменяется от 3 до 17 м, местами достигает 35 м, мощность чеславских слоев от 4 до 70 м. Отложения франского яруса делятся на два подъяруса. Нижний подъярус, преимущественно терригенного состава, сложен глинистыми известняками, мергелями, глинистыми сланцами, аргиллитами, общей мощностью не более 80 м. Разрез верхнефранского подъяруса представлен битуминозными известняками, реже доломитами с подчиненными прослоями известняково-глинистых сланцев и мергелей. Мощность отложений верхнефранского подъяруса от 25 до 180 м.

Фаменский ярус разделяется на губахинскую и сторожевскую свиты. Первая из них сложена чередующейся толщей тонкослоистых битуминозных известняков, мергелей, кремней, известково-глинистых

Потапов С. С., Паршина Н. В., Максимович Н. Г. Минералого-экологические последствия разработки угольных месторождений. Связь с геологическими условиями и способами добычи (на примере Челябинского и Кизеловского бассейнов) // Восьмые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова. – Миасс: ИМИН УрО РАН, 2007. - С.12-34.

сланцев, общей мощностью 100-120 м. Вторая свита представлена толщей оолитовых и псевдооолитовых известняков, доломитизированных известняков и доломитов. Мощность её 150-350 м.

Каменноугольная система представлена всеми отделами. Нижний включает отложения турнейского и намюрского ярусов. Турнейский ярус, выделяемый в качестве кизеловского горизонта, местами сложен карбонатными, местами терригенными образованиями. Мощность отложений 100-300 м.

В составе отложений визейского яруса выделяют следующие горизонты:

Косьвинский (подугленосный) терригенно-карбонатного состава с переменным соотношением известняков и терригенных пород, главным образом, аргиллитов, в меньшей мере песчаников и кремней. Мощность его 100-150 м.

Западноуральский (угленосный), включающий рабочие пласты каменного угля Кизеловского бассейна, имеет четыре типа разрезов: терригенный, карбонатно-терригенный, терригенно-карбонатный и карбонатный. На большей части территории преобладает терригенный тип разреза, включающий в основном песчаники, алевролиты и аргиллиты. Мощность горизонта 120-250 м.

Усть-Илимский, перекрывающий угленосную толщу, сложен известняками с желваками и линзами кремней мощностью 40 м.

Выше располагаются губашкинский, ладейнинский и нижнегубахинский горизонты, представленные известняками и доломитами в различных соотношениях. Мощность соответственно 48-63, 59-75, 193-267 м.

Намюрский ярус сложен известняками мощностью 60-109 м.

Среднекаменноугольные отложения расчленяются на три части, из которых нижняя отвечает башкирскому ярусу, средняя и верхняя - московскому ярусу.

Башкирский ярус сложен известняками. Мощность их составляет первые десятки метров.

Московский ярус характеризуется терригенным разрезом, включающим мощные пачки известняков. Общая мощность яруса 600-700 м.

Верхнекаменноугольные отложения представлены ритмично чередующимися глинистыми сланцами и песчаниками, содержащими прослойки глинистых известняков и конгломератов. Мощность верхнего отдела карбона 600-800 м.

Пермская система представлена лишь нижними – сакмарским и артинским – ярусами, сложенными пачками преимущественно окремненных известняков общей мощностью 500-600 м, выше переходящих в терригенные грубообломочные отложения такой же мощности.

Четвертичные отложения подразделяют на аллювиальные, делювиально-аллювиальные и делювиально-элювиальные. Широким распространением пользуются четвертичные отложения аллювиального генезиса, приуроченные к долинам больших, средних и малых рек. Характерным для них является ограниченность в распространении по площади, малая мощность и чрезвычайная изменчивость литологического состава и инженерно-геологических свойств. Среди них развиты пески разной крупности с большим содержанием гравия и гальки, супеси, суглинки и глины. Суглинистые и супесчаные разности часто залегают небольшими прослойками и линзами в составе суглинков и песков. Аллювиальные отложения поймы и первой надпойменной террасы часто обводнены.

Делювиально-аллювиальные отложения также достаточно часто встречаются в пределах района и представлены в основном суглинками и глинами с галькой, гравием и щебнем. Мощность данных отложений до 6-8 м, в естественном залегании они характеризуются плотным сложением. Четвертичные отложения делювиально-элювиального генезиса слагают большие площади, главным образом на пологих склонах междуречий и в областях распространения делювиального шлейфа. По литологическому составу это преимущественно различные суглинки и глины. Мощность отложений колеблется от 2 до 5 м. Мощность четвертичных отложений в центральных частях синклиналей достигает 100 м.

В геотектоническом отношении район исследований расположен в пределах окраинной зоны складчатой структуры Урала и является бассейном переходного типа от геосинклинального к платформенному. Палеозойские отложения в период герцинских горнообразовательных движений были собраны в крупные асимметричные складки, вытянутые в меридиональном направлении. По простиранию складки выдерживаются на значительном расстоянии и в зависимости от литологического состава слагающих пород имеют различное морфологическое строение: при тонкослоистых глинистых породах они сложные, мелкие и остроугольные, при мощных пачках известняков и песчаников – с более пологими вершинами и более крупными. В крайних южных и северных частях бассейна тектоническое строение изучено слабо. В Чусовском районе более широко развиты надвиги, многочисленные небольшие структуры, разбитые многочисленными продольными сбросами. Кизеловский район по тектоническому строению делится на две, разделенные надвигом с амплитудой 1200-1300 м структурные зоны: западную с крупными складками и восточную мелкоскладчатую.

В изучаемом районе выделены пять водоносных комплексов: 1) водоносный комплекс зон трещиноватости отложений среднего девона – турнейского яруса нижнего карбона; 2) водоносный комплекс зон трещиноватости угленосных отложений нижнего карбона; 3) водоносный комплекс зон трещиноватости отложений визейского-башкирского ярусов; 4) водоносный комплекс отложений ассельского-артинского

ярусов и зон трещиноватости терригенных отложений среднего-верхнего карбона; 5) водоносный комплекс четвертичных отложений.

Угленосная формация маломощная (50-250 м) раннекарбонового возраста (C_{1v}) содержит до 20 линзовидных пластов каменного угля мощностью 0.6-1.5 м. Породы представлены кварцевыми песчаниками (40-70 %), глинистыми сланцами (10-33 %) глинистыми песчаниками (10-20 %), известняками (1-3.7 %), углем (1.3-2.5 %). Среднее содержание сульфидной и органической серы в углях равно 5-8 %, максимальное – 12-15 %. Сульфидная сера представлена в основном пиритом. В песчаниках встречаются сульфаты в виде лучистых агрегатов гипса. В сухом угле среднее содержание кремния составляет 7.1 %, алюминия 5.6 %, железа 4.4 %, кальция 0.2 %, магния 0.1 %, калия 0.3 %, натрия 0.1 %. Обращает на себя внимание низкое содержание кальция по сравнению со средним его содержанием в углях других бассейнов (0.6-3.8 %). Среднее содержание в углях Be, Sc, Ti, V, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, Y, Zr, Ag превышает среднее их содержание для углей в угленосных бассейнов России. Характер залегания пластов линзовидный, строение обычно простое. Угли бассейна гумусовые, каменные, с редкими прослоями сапропелевого угля. Каменные угли, преимущественно дюреновые (около 80 % всей массы), марок Г и Ж, повышенозольные (от 12 до 43 %).

Зола, в основном, состоит из глинистого и песчано-глинистого материала. Угли относятся к высокосернистым (3-8 %). Сера представлена пиритной и органической. Угли обладают изменчивой, способностью к спеканию, самовозгораются, зона окисления до глубины 50-100 м.

Добыча угля велась шахтами глубиной в среднем 500 м; глубокие шахты достигали глубины 1000 м и более. Угли частично использовались для коксования на Губахинском коксохимическом заводе. Основная часть добываемых углей шла на энергетические нужды.

Способы складирования отвальной массы и самовозгорание отвалов

Отвалы угледобывающих предприятий бассейна представлены терриконами, хребтовидными и плоскими отвалами. Терриконы и хребтовидные отвалы отсыпаются около шахт и обогатительных фабрик. Плоские отвалы располагаются около угольных разрезов. В настоящее время отходы шахт и обогатительных фабрик в основном идут в плоские отвалы. Считается, что у плоских отвалов по сравнению с терриконами и хребтовидными отвалами есть преимущества: 1) они гораздо реже подвергаются самовозгоранию; 2) их гораздо проще рекультивировать; 3) посредством их отсыпки можно осуществлять планировку территорий, размещая их в первую очередь в естественных понижениях рельефа – оврагах, балках, депрессиях.

Угольные шахты и карьеры ежегодно выдают сотни млн. кубометров пустых пород, а обогатительные фабрики – десятки миллионов кубометров отходов обогащения. Многие из таких отвалов самовозгораются. На территории бывшего Советского Союза горело до нескольких сотен угольных отвалов. Горючим материалом в таких отвалах является уголь в виде мелочи, кусков и прослоев углесодержащих пород.

Тепловому самовозгоранию предшествует относительно длительное самонагревание дисперсного твердого материала. Самовозгорание (самовоспламенение) – это возникновение горения при отсутствии источника зажигания. Такой процесс осуществляется при резком возрастании скорости экзотермических реакций (например, окисления) в объеме материала, когда скорость выделения тепла больше скорости его рассеивания. Самовозгорание сначала происходит в зоне максимальных температур или в «горячей точке», в затем горение распространяется на соседние объемы.

Обычно самовозгорание проявляется в форме тления, т. е. беспламенного горения материала при недостатке кислорода в зоне горения. При тлении в газовой фазе в зоне высоких температур не происходит образования горючей смеси из продуктов разложения материала и кислорода воздуха. Поэтому здесь и нет пламенного горения. При достаточном количестве кислорода тление может перейти в пламенное горение (обычно в поверхностных слоях материала, более интенсивно аэрируемых). В данном случае газообразные и парообразные продукты термического разложения материала горят пламенем с излучением большого количества тепла. При этом поступающий кислород почти полностью расходуется на горение выделяющихся продуктов пиролиза над поверхностью твердого материала.

При горении углесодержащих отвальных масс наблюдается как тление, так и пламенное горение (обычно на поверхности отвалов). Горение отвала объемом около 1 млн. м³ – длительный процесс. Отвал загорается обычно еще при его отсыпке и горит после окончания отсыпки до 10-15 лет и более. Процессы остывания горевших отвалов и сопровождающие их явления перераспределения вещества продолжаются гораздо дольше.

Самовозгорание углесодержащей отвальной массы происходит при аккумуляции не менее 60-70 % тепла, выделяющегося при окислении. Высокозольные угли и углистые породы обладают повышенной склонностью к самовозгоранию. Бурые угли в отношении самовозгорания являются высокоактивными (1-я группа по склонности к самовозгоранию).

О природе самовозгорания углей и углесодержащих пород нет единого мнения. Наиболее полно данный процесс описывается теорией цепного самопроизвольного окисления.

Потапов С. С., Паршина Н. В., Максимович Н. Г. Минералого-экологические последствия разработки угольных месторождений. Связь с геологическими условиями и способами добычи (на примере Челябинского и Кизеловского бассейнов) // Восьмые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова. – Миасс: ИМИН УрО РАН, 2007. - С.12-34.

В поверхностной и приповерхностной зоне горящих отвалов имеется интенсивный приток свежего воздуха и просиходит полное сгорание угля, углистых пород и других горючих материалов. На значительных глубинах в отвале для полного сгорания не хватает кислорода. Здесь образуются горючие газы, поднимающиеся в верхние части отвала. В их составе определено до 10-12 % CO и до 10 % H₂.

Строение горелого террикона

В отвалы угольных шахт и обогатительных фабрик поступала относительно однородная по петрографическому составу серая масса из кусков и мелочи глинистых пород (аргиллиты, глины, глинистые сланцы), алевролитов, углистых пород, кусков окаменелого дерева, известняков и других карбонатных пород, песчаников, гравелитов, конгломератов с тем или иным количеством кусков угля и технического мусора (дерево, металлы, стекло). При горении отвальная масса переходит в горелые породы (горельники) кирпично-красного цвета и в общем рыхлого сложения. Высота наиболее крупных терриконов достигает 70 м, а объем до 1 млн. м³. Большинство отвалов имеет высоту 40-60 м.

Средняя и вершинная части отвалов покрыты отвальной мелочью (щебень, дресва, песок и пыль) в общем серого цвета. Довольно часто они имеют и красноватый цвет, когда поверхность отвала заметно эродирована, и значительные участки горельников обнажились. На хребтовой части отвалов видны белые пятна нашатырных отложений наиболее крупных фумарол, а также белые и жёлтые алюмосульфатные коры. В Кизеловском угольном бассейне алюмосульфатные коры сильно проявлены, например, на крупных отвалах шахт Комсомольская и Ключевская. В верхней части хребта и на вершине нередко хорошо видны черные асфальтоподобные отложения.

Ряд отвалов подвергался экскаваторной разработке. Обычно стенка экскаваторного забоя на горелом отвале имеет кирпично-красный цвет. Благодаря особенностям технологии отсыпки отвал имеет слоистое строение. В разные периоды отсыпаются несколько различные по свойствам (крупность кусков, их состав, влажность и т. д.) порции отвальной массы. Более крупнообломочные слои чередуются со слоями мелочи. Крупные обломки в большинстве случаев скатывались к подошве отвала, а максимальное количество мелочи (включая влажный глинистый материал) оставалось на вершинной (и хребтовой) части.

Слои, обогащенные углистыми породами и углем и состоящие из более крупных кусков (обеспечивающих облегчение аэрации), горели интенсивно и поэтому превращались в буро-красные пласты из сварившихся кусков горелых пород. Такие слои мы называем отвальным спёком (местное название «запёки»). На склонах подработанных отвалов глыбы разрушающихся пластов отвального спёка выделяются очень рельефно. У основания таких отвалов всегда имеется россыпь глыб спёка, скатившихся сверху. Их объем иногда достигает несколько кубических метров.

Менее интенсивно горевшие слои сложены рыхлыми горельниками, цвет которых изменяется от кирпично-красного до розоватого и розовато-желтого (у наименее интенсивно горевших слоев). Количество мелкой и пылевой фракции в горелых породах обратно пропорционально степени их обжига. В пластах отвального спёка нередко эти фракции практически отсутствуют, а в слабообожженных (розоватых, желтоватых) они обильны.

Внутри отвала, в области его вертикальной осевой плоскости обычны участки непрогоревших пород, имеющих вид четко ограниченных «черных блоков» (рис. 3), сильно прокаленных без доступа кислорода. Это реликты наиболее мелкообломочных, обогащенных глиной масс хребтовой и вершинной частей отвалов. Поперечник их иногда достигает десятков метров. Иногда граница «черных блоков» делит пополам обломки всего в несколько миллиметров в поперечнике (часть обломка черная, а другая – красная).

«Черные блоки» имеют тенденцию несколько смещаться в подветренную сторону отвала (см. рис. 3), поскольку с наветренной стороны тление их, естественно, идет более интенсивно. Материал, возникающий при тлении «черного блока», обычно рыхлый и имеет менее интенсивный красноватый цвет по сравнению с обычным горельником, возникшим при поверхностном горении отвала.

В «черных блоках» идут процессы сухой перегонки угля, углистого и битуминозного вещества. Над ними в хребтовой и вершинной частях отвала находятся специфические отложения битуминозных веществ в виде асфальтоподобных кор с примесью мелких кристаллов серы.

В разрабатываемых отвалах нередко можно наблюдать проявления своеобразной «тектоники» в виде субвертикальных трещин усадки до 0.5 м и более шириной. Когда эти трещины находятся в вершинной части террикона, стенки их бывают оплавлены в результате интенсивного горения газов, выделяющихся из глубоких частей отвала. На крупном и очень интенсивно горевшем терриконе разреза Коркинский (дробильный участок) трещины усадки в ряде случаев заполнялись расплавленной силикатной массой, вследствие чего возникали «дайки» базальтоподобных пород мощностью до 1 м.

На естественной поверхности склонов терриконов и хребтовидных отвалов, выше их середины по высоте, встречаются пологие углубления, заполненные рыхлым раскаленным материалом. Возможно, некоторые из них переходят в горячие глубокие воронки, известные на крупных терриконах других угольных бассейнов и представляющие большую опасность.

Потапов С. С., Паршина Н. В., Максимович Н. Г. Минералого-экологические последствия разработки угольных месторождений. Связь с геологическими условиями и способами добычи (на примере Челябинского и Кизеловского бассейнов) // Восьмые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова. – Миасс: ИМИН УрО РАН, 2007. - С.12-34.

Провалы на склонах отвалов просиходят относительно редко в связи с разуплотнением массы отвала при горении в нижних слоях. Образование такого провала около 10 м в поперечнике и глубиной около 1.5 м наблюдалось на восточном склоне террикона шахты № 45. Из-за выделения горячих газов из провала к нему нельзя было подойти ближе, чем на 10-15 м.

В хребтовой части отвалов и в верхних частях склонов расположены многочисленные выходы горячих газов. Наиболее высокая температура их 200-400 °С (без учета горящих в данный момент участков склонов, где в очагах горения температура доходит до 1000 °С и выше). В этих местах отлагаются сульфаты и хлориды в виде корок толщиной 5-10 см и более. Эти газовые выходы с отложениями минералов называются отвальными фумаролами.

Хвостовые части некоторых отвалов не были затронуты горением. Они сложены серой обломочной массой, практически не отличающейся от негорелой массы, поступающей в отвалы. Сходные массы изредка встречаются и в других частях отвалов. Куски древесины (части шпал, стоек и т. п.) в них не несут следов термических изменений.

Горящий или недавно прогоревший отвал – своеобразная «тепловая машина». Как правило, террикон хорошо обдувается ветрами. Поскольку пористость его масс порядка 30 %, он относительно хорошо аэрируется. Тепловое движение газов и движение их от напора ветра создают довольно стабильную аэродинамическую обстановку в терриконе. Преобладающими ветрами на Урале являются западные и северо-западные. Естественно поэтому, что максимальное число наиболее сильных горячих струй газа выходит в верхней части восточного склона отвала (рис. 4). Это только схема. Реальная аэродинамическая обстановка в отвале сильно нарушается его неоднородностями (чередование легко- и труднопроницаемых пластов и блоков, наличие трещин усадки, подработанных экскаваторами бортов и т. д.).

Типы минерализаций горелых отвалов

При горении отвалов реализуется важная закономерность: в результате обжига происходит значительное упрощение кристаллохимического состава отвальной массы. Если исходный (сырой) материал сложен слоистыми и безводными силикатами, силикатами других кристаллохимических типов, безводными и водными окислами, карбонатами, сульфатами, сульфидами, углистым и битуминозным веществом, техническим мусором (дерево, металл и др.), то горелая масса в основном сложена только безводными силикатами и окислами. Таким образом, происходит и повышение однородности отвальной массы.

Анализы иллюстрируют значительную однородность состава как исходного материала, так и продуктов его обжига. За счет потери H_2O и CO_2 (п. п. п.) в продуктах обжига относительно возрастает содержание SiO_2 , Al_2O_3 и ряда других компонентов. Происходит явный вынос натрия.

Можно выделить следующие типы минерализаций при горении угольного отвала:

I – *Минерализация горелых пород*, среди которых вычленим:

- а) продукты обжига глин и аргиллитов;
- б) продукты обжига сидеритов;
- в) продукты обжига кусков окаменелого дерева;
- г) продукты обжига кусков известняка.

II – *Минерализация полностью переплавленных пород*;

III – *Продукты изменения ксенолитов пиритизированных пород в «базальтах»*;

IV – *Минерализация «черных блоков»*;

V – *Продукты тления «черных блоков»*;

VI – *Минерализация фумарол*;

VII – *Продукты выветривания материала отвалов*;

VIII – *Минерализация металлических предметов в отвальной массе и на поверхности отвалов*

IX – *Минерализация стекла и керамики*.

В связи с проявлением карстовых процессов, сильной обводненностью шахтного поля и высоким содержанием пирита в угленосных толщах Кизеловского бассейна, можно выделить еще один тип минерализации:

X – *Минерализация отложений из кислых шахтных вод вследствие окисления пирита*.

Почти все эти типы минерализации выделены, изучены и описаны Б. В. Чесноковым с соавторами на примере Челябинского угольного бассейна [9]. Конкретные минеральные образования различных типов минерализации подробно описаны Б. В. Чесноковым и его коллегами [7-9]. Общность процессов горения, близость химического и минерального состава исходной отвальной массы обуславливают развитие подобных же типов минерализации и в Кизеловском угольном бассейне. Так, например, при дефиците кислорода происходит восстановление оксидов и кристаллизация безводных силикатов, сульфидов и других минералов. Образуются «базальтоподобные» породы, состоящие из основного плагиоклаза, моноклинного пироксена, оливина с примесью пирротина, троилита, магнетита, самородного железа и других. Тугоплавкие породы в очаге горения и низкоплавкие в прилегающей к нему зоне подвергаются обжигу (термальному

метаморфизму); в процессе обжига происходит дегидратация, перекристаллизация, выделение летучих компонентов. Аргиллиты, состоящие из каолинита, иллита, хлорита, карбонатов, кварца и углеродистого вещества вблизи очага преобразуются в кирпично-красную породу, состоящую из андалузита, шпинели, гематита, магнетита и кварца; при более низкой температуре они становятся вишнево-красными и представлены кордиеритом, муллитом, гематитом и магнетитом. Сульфиды железа химически окисляются и превращаются в магнетит, гематит с выделением сернистого газа (пневмолита). Уголь и углистые породы в этой зоне превращаются в «черные блоки», состоящие из шунгита, графита и сульфидов. Термальный метаморфизм известняков заканчивается образованием порландита, вторичного кальцита; при метаморфизме доломита образуются периклаз, порландит, брусит, вторичный кальцит. Процессы горения, переплавления, обжига сопровождаются образованием газов. Примером могут служить серосодержащие газовые струи, формирующиеся в глубине отвалов и выходящие на его вершинах в виде фумарол с температурой 400-500° С. Мигрируя к поверхности, они вступают во взаимодействие с обломками горных пород, растворяют карбонаты, приводят к метасоматозу и сернокислотному гидролизу алюмосиликатов с образованием квасцов, алунита. По Б. И. Сребродольскому за счет продуктов разложения силикатов в термальной зоне образуются: кристаллы квасцов игольчатого облика размером до 2 мм; ссомольнокит в форме мелкозернистых агрегатов в ассоциации с другими сульфатами; эпсомит в форме налетов, корочек на других сульфатных минералах; ангидрит в форме скрытокристаллических корочек; калиевые и натриевые квасцы – при взаимодействии кислых растворов на гидрослюдю; алуноген в форме выцветов на поверхности обломков разложившихся пород; ярозиты различного состава.

Описание техногенных минералов Кизеловского угольного бассейна сделано нами ранее [2-5], а сопоставление полных списков новообразованных минералов в связи с добычей угля для Челябинского и Кизеловского бассейнов проведено в конце 2006 г. [6].

Техногенно-геохимические изменения геологической среды в Кизеловском угольном бассейне (экологические аспекты)

Угленосные формации занимают 15% территории континентов. Разработка угольных месторождений связана с извлечением на поверхность Земли больших масс пустых пород. При добыче каждой тысячи тонн угля шахтным способом на поверхность поступает в среднем 100-115 м³ породы, а при карьерной добыче требует размещения 3.6 тыс. м³ вскрышных пород.

Извлекаемые из недр вещества и продукты их переработки, как правило, химически не устойчивы в условиях земной поверхности. Это ведет к формированию в верхних горизонтах литосферы и на поверхности Земли физических тел с более или менее определенными геометрическими очертаниями, которые получили название техногенно-геохимических систем. Контрастность природных и техногенных геохимических условий в таких системах обуславливает интенсивную миграцию вещества и развитие различных химических и физико-химических процессов, которые существенным образом могут повлиять на свойства пород, изменить состав подземных вод.

В угледобывающих районах формируется ряд техногенно-геохимических систем, например, породы отвалов – грунт подземные воды, шахтные воды – грунт и др. Ведется исследование таких систем или их отдельных компонентов. Например, изучаются шахтные воды, процессы минералообразования в отвалах, техногенные потоки элементов в ландшафтах, загрязнение подземных и поверхностных вод. При этом отсутствует подход к угольному бассейну как к целостной техногенно-геохимической системе. Отсутствие разработанных теоретических представлений о техногенной геохимии угледобывающих районов затрудняет рациональное использование геологической среды.

Для полного описания техногенно-геохимических систем необходимо знание большого количества параметров, касающихся вещественного состава, внешних условий, условий миграции вещества и их изменения в пространстве и времени. На данном этапе можно говорить о техногенно-геохимических обстановках районов угледобычи, под которыми понимаются условия, характер и интенсивность протекания физико-химических процессов, их направленность и инженерно-геологические следствия. Такая информация позволяет выработать стратегию борьбы с негативными процессами, определить типы необходимых искусственных геохимических барьеров и разрабатывать схемы их реализации.

Отходы угледобычи и углеобогащения, складированные в отвалах, оказывают негативное воздействие на геологическую среду. Общая площадь занятых породными отвалами земель в Кизеловском угольном бассейне составляет 227032 м². Общий объем пород в отвалах составляет 21460 тысяч м³.

Породные отвалы подвержены самовозгоранию. Из 69 отвалов КУБ более половины претерпели горение. Содержание чистого угля в составе месторождений Кизеловского каменноугольного бассейна колеблется от 71% (шахта Шумихинская) до 93% (шахта Центральная). Перемещение пород из зоны кислородного дефицита на земную поверхность, разгрузка их от горного давления приводит к образованию техногенных грунтов отвалов угольных шахт, в которых активизируются физическое выветривание,

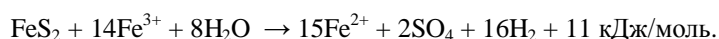
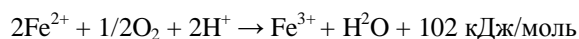
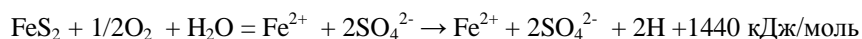
окисление, растворение, гидролиз, гидратация и другие процессы. В результате этих процессов возникают растворимые и нерастворимые продукты, влияющие на окружающую среду и инженерные сооружения.

Интенсивность выветривания техногенных грунтов значительно выше естественных. Кроме геохимического контраста это связано с неоднородным гранулометрическим составом, невысокой плотностью грунтов и, как следствие, высокой проницаемостью для воды и газов. Рассмотрим основные процессы, сопровождающие выветривание.

Механическое выветривание. Разрушение обломков пород происходит под влиянием нагрузки вышележащих пород, замораживания, кристаллизации солей, горения. Высыхание – увлажнение также сопровождается разрушением пород за счет давления, возникающего при набухании и усадке слоистых силикатов. В результате механического выветривания увеличивается удельная поверхность обломков, повышается плотность, снижается проницаемость.

Химическое выветривание. В грунтах под влиянием кислорода воздуха, атмосферных осадков и грунтовых вод осуществляются первичные геохимические процессы: окисление, растворение, выщелачивание, метасоматоз, гидролиз, гидратация. К вторичным процессам можно отнести горение, кислотное растворение.

Окисление и гидролиз. Окислению подвергаются сульфиды и другие минералы с закисными формами атомов. Окисление сульфидов железа является многостадийным биохимическим процессом. Выделяют три стадии окисления пирита (марказита) при участии *Thiobacillus ferrooxidans* (Тютюнова, 1987):



Скорость окисления пирита определяется второй стадией, которая зависит от скорости поступления в реакционную зону кислорода. Окисление сульфидов железа сопровождается гидролизом с образованием ионов двухвалентного железа и серной кислоты. Выделяющаяся теплота повышает температуру по некоторым данным до уровня самовозгорания. Серосодержащие органические соединения в процессе биохимического окисления дают серную кислоту (Тютюнова, 1987). Биохимическое окисление элементарной серы происходит при участии *Thiobacillus ferrooxidans* по схеме:

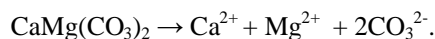


В результате указанных процессов среда подкисляется серной кислотой до pH 1.5-3.5. Наличие в грунтах CaCO₃ снижает скорость окисления пирита.

Гидролиз. Основным источником ионов водорода, участвующих в этом процессе служит серная кислота. Меньшая часть ионов H⁺ и OH⁻ образуется при диссоциации воды. Техногенный гидролиз, как и естественный, протекает стадийно. Преобладающими являются экзотермические реакции с небольшим тепловым эффектом. В первую очередь гидролизу подвергаются хлорит, альбит, анортит и иллит. В процессе гидролиза образуются нерастворимые продукты, и происходит экстрагирование растворимых соединений. Нерастворимые продукты реакции образуют на поверхности минерала буферный слой, а растворимые соединения мигрируют за пределы техногенных грунтов.

Метасоматоз. Метасоматические замещения минералов осуществляются в процессе образования нерастворимых продуктов окисления, гидролиза, гидратации, например, пирит замещается гидроксидами железа, ортоклаз – каолинитом. Метасоматоз возможен при взаимодействии растворимых продуктов выветривания на минералы грунтов.

Растворение. На первом этапе выветривания под влиянием атмосферных осадков растворяются хлориды. При pH 5-6 растворяются и карбонаты по схеме:



Кислотное растворение. Появление кислых продуктов выветривания и снижение водородного показателя до 3 является причиной растворения не только карбонатов, но и силикатов.

Выщелачивание. Извлечение из кристаллической решетки атомов без её разрушения приводит к изменению свойств минералов. Например, при выщелачивании калия иллит приобретает способность к набуханию. Из хлоритов при pH 5-6 выщелачивается Mg²⁺ и они превращаются в смектиты.

Породы шахтных отвалов в результате процессов выветривания приобретают зональное строение. Х. Вигтеринг (1986) установил зональность в распределении продуктов механического выветривания в отвалах Рура. Продукты замерзания – оттаивания через три года образуют горизонт мощностью 20 см, высыхания – увлажнения – несколько сантиметров. Д. Б. Грюнер и У. К. Худ (1981) для угольных отвалов шахты Иллинойс (США) выделили три зоны грунтов по характерным реакциям. Верхняя – зона преобладаний реакций окисления и гидролиза сульфатов; средняя – зона вторичных реакций, таких, как кислотное растворение глинистых минералов. Нижняя – зона реакций нейтрализации серной кислоты карбонатом кальция подстилающих пород.

Характерной реакцией, протекающей в отвалах, является окисление органической серы и пирита в сульфаты. Образующаяся при этом серная кислота воздействует как окислитель. Реакции окисления сопровождаются выделением тепла и самовозгоранием отвалов. Существуют два взгляда на причины самовозгорания отвалов (Пихлак, 1986). Одни исследователи связывают этот процесс с адсорбцией кислорода и дальнейшим его химическим взаимодействием с углем, идущим с выделением тепла. При достижении температуры 80-90° С уголь в большинстве случаев загорается. Другие считают, что самовозгорание отвалов есть результат окисления сульфидов. Наиболее интенсивно эти процессы идут при определенной влажности пород, с чем связана активизация самовозгорания отвалов после выпадения и испарения атмосферных осадков. Горение отвалов КУБ продолжается в течение нескольких лет. Это ведет к загрязнению атмосферы продуктами горения и осаждению их на поверхности земли. В атмосферу выбрасывается газовый дым, твёрдые частицы которого представлены сажей, коксом, силикатными шариками, кристаллами минералов и органическими остатками. В составе газовой фазы преобладают сернистый газ и оксиды азота.

Таким образом, вследствие горения отвалов возникают геохимические процессы эндогенного характера, подавляющие деятельность живого вещества. В породах идет интенсивное минералообразование и процессы, усиливающие миграцию элементов в водной и воздушной среде.

Заключение

Полученные результаты дают возможность судить о процессах минералообразования и геоэкологического загрязнения на горелых угольных отвалах. Найденные минералы образовались путем возгонки угольного вещества и сульфидов (сера); при интенсивном биогенном и абиогенном окислении (мелантерит, гётит); в результате абиогенного окисления при высоких температурах (гематит); пневматолито-гидротермальным путем (копиапит, билинит, кокимбит, алуноген); при дегидратации водных минералов (кокимбит, роценит, ссомольнокит, ангидрит); в результате обжига и перекристаллизации минералов (муллит, кристобалит, тридимит, маггемит, гематит); при ионных замещениях (галотрихит, пиккерингит, ярозит, алунит).

Учитывая, что горящий и горелый террикон создаёт, по Б. В. Чеснокову [9], локальную зону бедствия для окружающей среды, поскольку выделяет вредные газы (углеводороды, SO₂, H₂S, соединения фтора и хлора), является источником пыли (содержащей сульфаты, хлориды, фториды, углеводороды, сульфиды) и занимает полезную, в том числе, и потенциально сельскохозяйственную (ЧУБ) и лесопромышленную (КУБ) территории, то желательна скорейшая переработка отвалов до полного их удаления и рекультивации нарушенных земель. Кроме того, отвалы наносят вред поверхностным и подземным водам. В связи с развитием карста, сильных водопровявлений и активного окисления пирита и благодаря разносу кислыми шахтными водами по речной системе (вплоть до р. Кама) токсичных элементов, особенно это важна для территории Кизеловского угольного бассейна. Некоторые части отвалов, в частности, красный горельник, могут являться сырьем для строительной индустрии. Но разрабатывать отвал нужно селективно, с учётом знаний о его строении и составе различных частей. При этом высокотоксичные части отвалов (битумные пласты, сульфатные и хлоридные коры) необходимо нужно удалять и перезахоранивать.

Авторы благодарят сотрудников аналитических служб МГУ, ФГУП ЕНИ, ИМин УрО РАН и ИГиМ СО РАН, упомянутых в методическом разделе статьи, за выполнение анализов; коллег из лабораторий минералогии техногенеза и геоэкологии ИМин УрО РАН и геологии техногенных процессов ФГУП ЕНИ за информационную поддержку, обсуждение материалов, организацию и проведении экспедиционных работ и техническую помощь при подготовке статьи.

Литература

1. Потапов С. С., Блинов С. М. Геоэкологическая ситуация в Кизеловском угольном бассейне на основе изучения техногенных минерализаций // Уральский минералогический сборник № 12. Миасс: ИМин УрО РАН, 2002. С. 204-219.
2. Потапов С. С., Блинов С. М. Сульфаты как показатели геоэкологической обстановки в Кизеловском угольном бассейне // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. Вып. 5. Пермь: ПГУ, 2003. С. 54-71.

Потапов С. С., Паршина Н. В., Максимович Н. Г. Минералого-экологические последствия разработки угольных месторождений. Связь с геологическими условиями и способами добычи (на примере Челябинского и Кизеловского бассейнов) // Восьмые Всероссийские научные чтения памяти ильменского минералога В. О. Полякова. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2007. - С.12-34.

3. Потапов С. С., Мороз Т. Н., Потапов Д. С., Титов Т. А. Флюорэлластадит из Кизеловского угольного бассейна – вторая точка находки в техногенном объекте // Минералогия техногенеза–2005. Миасс: ИМин УрО РАН, 2005. С. 70-77.

4. Потапов С. С., Мороз Т. Н., Максимович Н. Г. Калиевые квасцы – первая находка в Кизеловском угольном бассейне // Минералогия техногенеза–2006. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. С. 69-77.

5. Потапов С. С., Максимович Н. Г. К минералогии горелых отвалов Кизеловского угольного бассейна (Пермский край) // Седьмые Всероссийские научные чтения памяти Ильменского минералога В. О. Полякова. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. С.

6. Потапов С. С., Максимович Н. Г., Паршина Н. В. Список минералов горелых отвалов Челябинского и Кизеловского угольных бассейнов // Минеральные ресурсы Урала. 2006. № 6(10). С. 43-52.

7. Чесноков Б. В., Баженова Л. Ф., Щербакова Е. П. и др. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. 70 с.

8. Чесноков Б. В., Баженова Л. Ф., Щербакова Е. П. и др. Новые минералы из горелых отвалов Челябинского угольного бассейна // Минералогия техногенеза и минерально-сырьевые комплексы Урала. Свердловск, 1988. С. 5-31.

9. Чесноков Б. В., Щербакова Е. П. Минералогия горелых отвалов Челябинского угольного бассейна (опыт минералогии техногенеза). М.: Наука, 1991. 152 с.

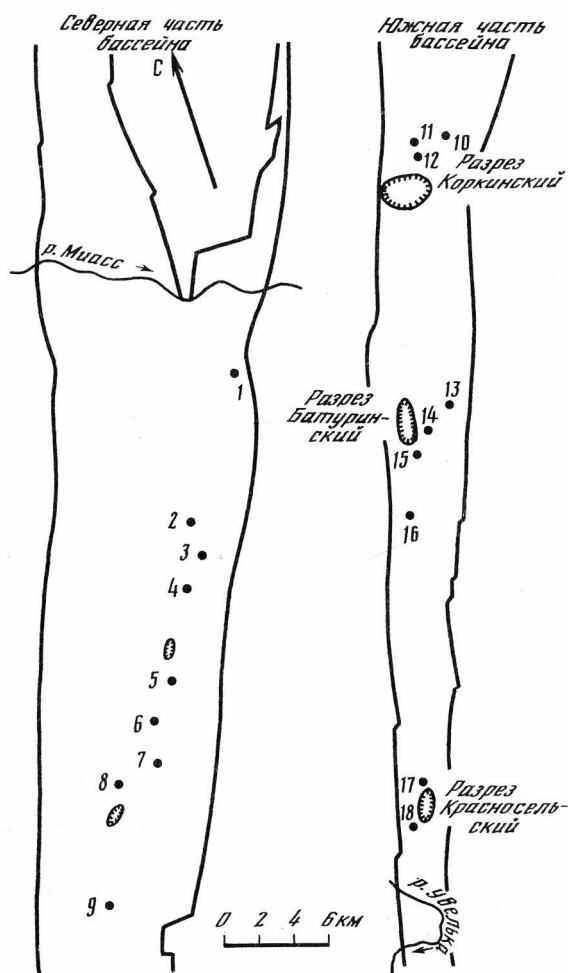


Рис. 1. Схема расположения изученных отвалов в Челябинском угольном бассейне по [9] с указанием шахт:

1 – Миасская, 2 – Северная, 3 – Глубокая, 4 – Красная Горнячка, 5 – Центральная, 6 – Капитальная, 7 – Подозёрная, 8 – Чомсомольская, 9 – Октябрьская, 10 – Калачёвская, 11 – Чумлякская, 12 – Коркинская, 13 – Восточная, 14 – Батуриная, 15 – Южная, 16 – Еманжелинская, 17 – Куллярская, 18 – Красносельская.

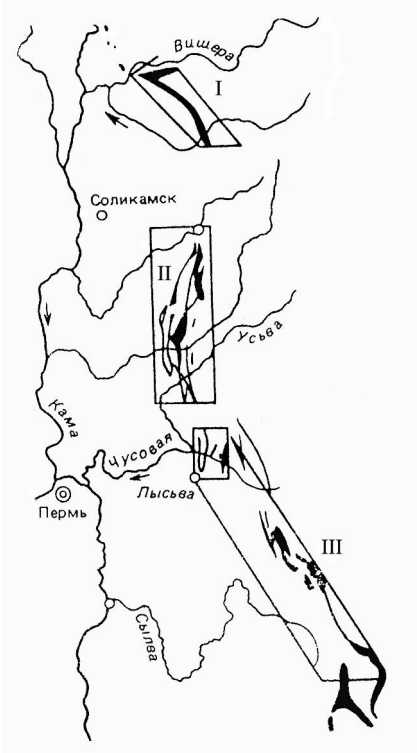


Рис. 2. Схема Кизеловского угольного бассейна с выделением угленосных районов: I – Вишерского, II – Кизеловского, III – Чусовского.

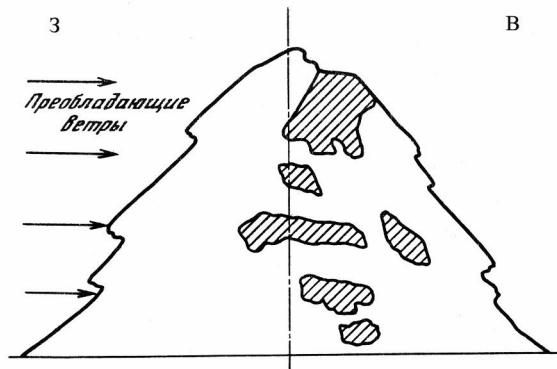


Рис. 3. «Чёрные блоки» (заштрихованы) в подработанном экскаватором терриконе. Вид с юга на отвал шахты № 44 Челябинского угольного бассейна [9].

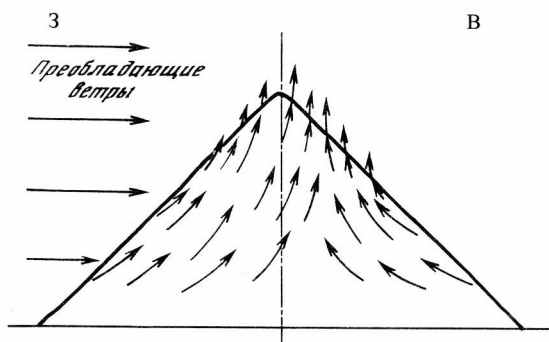


Рис. 4. Схема предполагаемого движения газов в термически активном (горящем) терриконе (вертикальный разрез по [9]).