

УДК 622.02:551.24:533.6

Исследование влияния геодинамической позиции углепородных отвалов на их эндогенную пожароопасность

А.С.БАТУГИН¹, А.С.КОБЫЛКИН² ✉, В.Р.МУСИНА¹

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия*

² *Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Батугин А.С. Исследование влияния геодинамической позиции углепородных отвалов на их эндогенную пожароопасность / А.С.Батугин, А.С.Кобылкин, В.Р.Мусина // *Записки Горного института*. 2021. Т. 250. С. 526-533. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.5

Аннотация. В работе исследуется гипотеза, согласно которой одним из факторов, влияющим на самовозгорание углепородных отвалов, является его геодинамическая позиция, т.е. расположение в геодинамически опасной зоне (ГОЗ) на границе блоков земной коры. Данная гипотеза выдвинута на основе научных представлений о блочном строении земной коры и имеющихся статистических данных о расположении горящих отвалов и изучается с применением компьютерного моделирования. В качестве объекта исследования выбран отвал, находящийся в районе Восточного Донбасса. Результаты моделирования показывают, что проникновение воздуха в тело отвала из шахты через ГОЗ, которая пересекает зону ведения горных работ, возможно при избыточном давлении 1000 Па, создаваемым шахтными вентиляторами главного проветривания. Появление очага возгорания в теле отвала вызывает повышение температуры отвальной массы и становится своеобразным триггером, «включающим» аэродинамическую связь между отвалом и окружающей средой, осуществляемую через ГОЗ. Сделан вывод, что установление аэродинамической связи между горными выработками и отвалом через ГОЗ может являться важным фактором, способствующим эндогенной пожароопасности углепородных отвалов. Результаты моделирования могут быть использованы при разработке проектов мониторинга углепородных отвалов и мероприятий по борьбе с их самовозгоранием.

Ключевые слова: углепородный отвал; самовозгорание; геодинамически опасная зона; проницаемость; пористость; моделирование; граничные условия; фильтрация воздуха

Введение. Несмотря на развитие технологий добычи и переработки угля, часть его попадает в отвалы, что создает среду для их самовозгорания [12, 21], особенно при повышении температуры [22]. Вредные газы, выделяющиеся при горении отвалов, продукты горения, химические элементы отвальной массы отрицательно влияют на экологическую ситуацию в углепромышленных районах [24, 25], создают угрозу для здоровья населения [12, 20], необходимость выполнения работ по мониторингу ситуации [10, 26]. На ряде отвалов наблюдаются рецидивы самовозгорания после тушения пожаров и рекультивации по современным противопожарным технологиям [11].

Постановка проблемы. Несмотря на то, что механизмы самовозгорания углепородных отвалов до конца еще не изучены, основным способствующим фактором признается поступление воздуха к отвальной массе. Поэтому для снижения пожароопасности отвалов и ограничения действия на них воздушного потока рекомендовано выбирать для их размещения долинообразные места, длинные оси отвала ориентировать в направлении господствующих ветров. Технологии отсыпки отвалов предусматривают операции по уплотнению, послышной укладке и другие профилактические меры, препятствующие поступлению атмосферного воздуха в тело отвала [19].

В работе [14] была выдвинута гипотеза, развитая в [16], что поступлению воздуха к отвальной массе и последующему самовозгоранию отвалов способствует их расположение в геодинамически опасных зонах (ГОЗ). Свое название ГОЗ получили в связи с тем, что к ним приурочены опасные геодинамические явления при освоении недр – горные удары, аномальное развитие деформаций в массиве и на поверхности, аварии на инженерных сооружениях [9]. Во многих случаях ГОЗ представляют собой зоны современной тектонической активности земной коры и поэтому представлены в массиве как линейные зоны повышенной нарушенности [15]. Повышенная нарушенность ГОЗ придает им высокую проницаемость, которая может еще более увеличиваться за счет реактивации трещиноватости и нарушений при развитии процессов сдвижения. При расположении углепородного отвала в такой зоне поступление воздуха к отвальной массе возможно за счет его переноса из горных выработок шахт (рис.1), что является основной идеей представляемой работы.

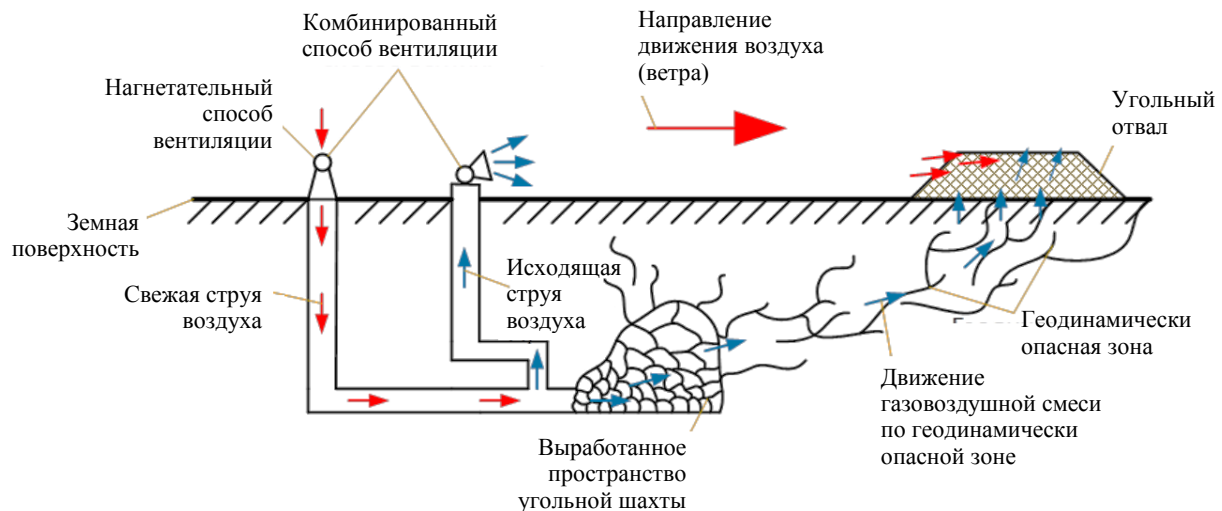


Рис.1. Схема аэродинамической связи горных выработок и отвала на поверхности посредством ГОЗ

Уверенность в том, что предполагаемый процесс массопереноса газов через ГОЗ может реализоваться в действительности, опирается на уже имеющиеся исследования по приуроченности горящих отвалов к ГОЗ [14, 16], а также на исследования по дегазации земных недр через зоны разломов [7], мульды сдвижения в процессе затопления шахт [6, 11], другие результаты исследований [2-4, 10].

В настоящей работе рассматривается задача компьютерного моделирования процессов массопереноса газов через ГОЗ в тело расположенного на ней отвала. В отечественной и зарубежной практике широко применяется инструмент «компьютерное моделирование» для решения аэродинамических вопросов в области горной науки [5].

Методология и результаты исследований. *О геодинамической природе ГОЗ.* Практикой ведения горных работ на многих месторождениях в 20 в. была установлена зональность проявления геодинамических явлений. Возникшая в связи с этим идея заблаговременного выявления таких геодинамически опасных зон (ГОЗ) привела к появлению метода и концепции геодинамического районирования, изложенных в работе [15] и в более поздних исследованиях. Данная концепция основана на идее о взаимодействии глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов в земной коре, возникающих при освоении недр и земной поверхности. Обнаружение такого взаимодействия рассматривается как один из важнейших результатов геомеханико-геодинамических исследований 20 в. [1]. Крупные блоки земной коры, участвующие в современном тектоническом процессе, состоят из блоков более низкого иерархического ранга, разделенных на еще более мелкие блоки. Так последовательно можно прийти к блочному строению шахтных полей. Из-за своей тектонической активности блоки и их границы находят отражение в современном рельефе земной поверхности, что позволяет их обнаруживать и идентифицировать. Хотя некоторые границы современных тектонических блоков земной коры и наследуют крупные тектонические нарушения в массиве, но часто они представлены в массиве линейными зонами повышенной тектонической нарушенности и трещиноватости без значительного смещения угольных пластов и поэтому не выделялись геологами на геолого-промышленных картах [15]. Например, для Кузбасса имеются оценки, согласно которым только 35 % всех границ блоков, активных на последнем отрезке геологической истории, выражены как крупные нарушения. Остальные являются новообразованными [13]. Требование учитывать наличие ГОЗ содержится в ряде инструктивных и методических документов по безопасности в горнодобывающей промышленности. При постановке задачи предлагаемого исследования авторы опирались на данную концепцию геодинамического районирования.

Классификация взаимного расположения ГОЗ и углепородных отвалов. В Восточном Донбассе (Ростовская обл.) в 2015 г располагалось 202 углепородных отвала, 33 из которых находились в стадии горения. В районе проведены работы по геодинамическому районированию и анализу приуроченности горящих углепородных отвалов к границам блоков земной коры, или ГОЗ,

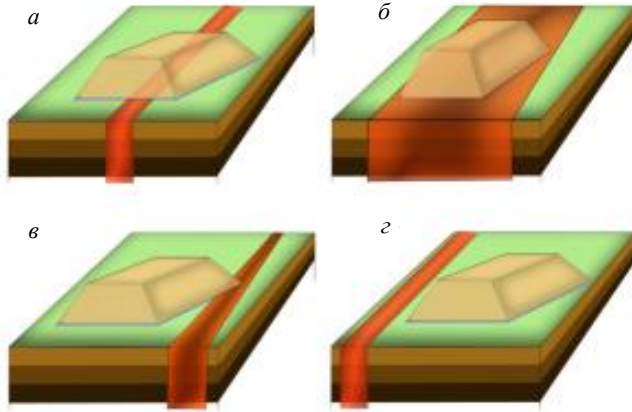


Рис.2. Классификация взаимного расположения отвалов и ГОЗ:
 а – ГОЗ пересекает отвал; б – отвал расположен в ГОЗ; в – ГОЗ имеет контакт с отвалом; г – ГОЗ не пересекает отвал

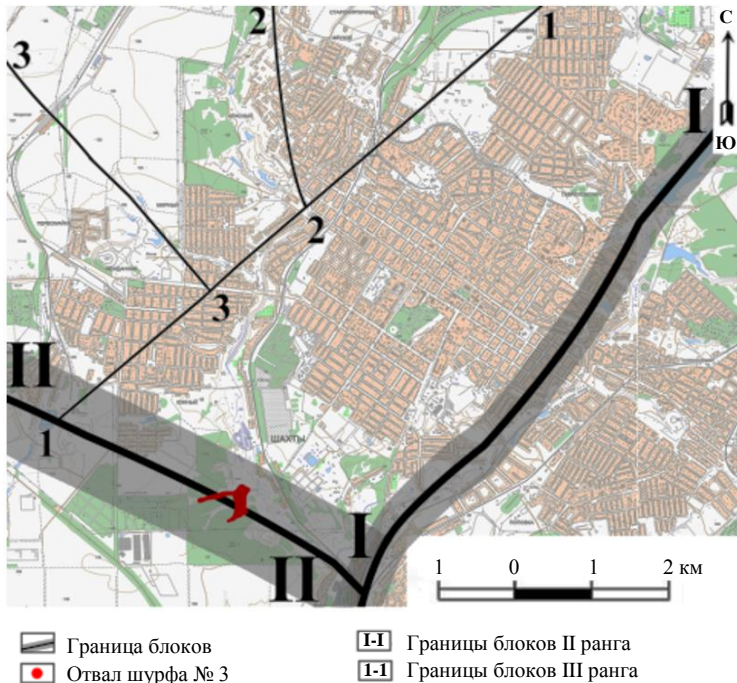


Рис.3. Схема расположения отвала шурфа № 3 шахты «Южная» относительно ГОЗ различного порядка

имеющих определенную ширину [14]. ГОЗ идентифицированы на местности, а их ширина оценена по формуле [8] $V = 10N$, где N – амплитуда взаимного перемещения соседних блоков одного ранга. Формула получена на основе практического опыта изучения зон трещиноватости вблизи разрывных нарушений и в целом коррелирует с другими подобными оценками ширины зон влияния нарушений [17].

В районе городов Шахты и Новошахтинск Восточного Донбасса сформированы отвалы различной формы и размеров. Площадь отвалов S составляет от 0,04 до десятков гектаров, т.е. их линейные размеры R составляют от первых десятков до нескольких сотен метров. При этом ширина зон влияния границ блоков (ГОЗ) r , выделенных при проведении работ по геодинамическому районированию, составляет от 50 до 1200 м. С учетом этих данных составлена классификация относительного расположения отвалов и ГОЗ (рис.2).

Рис.2, а характеризует ситуацию $r < R$, т.е. когда ширина ГОЗ r меньше ширины отвала R и ГОЗ пересекает углепородный отвал, разделяя его на две части. Рис.2, б характеризует случай $r > R$, когда ширина ГОЗ r больше ширины отвала R , в результате чего отвал полностью расположен в ГОЗ. Этот тип характерен для отвалов, расположенных на границах блоков I-II рангов большой ширины. Рис.2, в – отвал касается ГОЗ одной из своих частей. Рис.2, г – ГОЗ проходит в стороне от углепородного отвала, не пересекая его.

В работе [14] принято, что при любом из взаимных расположений (рис.2) отвал приурочен к ГОЗ. При общей площади геодинамически опасных зон, занимающих примерно 10 % от изучаемой территории, в них располагается 40 % горящих отвалов, т.е. концентрация горящих отвалов в этих зонах выше в несколько раз, чем в среднем на данной территории. Такое статистическое распределение горящих отвалов рассматривается нами как подтверждение гипотезы о приуроченности горящих отвалов к ГОЗ.

Компьютерное моделирование. Для моделирования и исследования процессов массопереноса воздуха к отвальной массе из горных выработок через ГОЗ решено было выбрать отвал, полностью размещенный в ГОЗ (рис.2, б). Примером является отвал шурфа № 3 шахты «Южная», расположенный на границе блоков II ранга II-II шириной 1200 м (рис.3). Этот отвал расположен на юго-западе г. Шахты. Отвал был запущен в эксплуатацию в 1975 г. и к 1990 г. был полностью сформирован. Форма отвала платообразная с максимальной высотой 21 м. На 2015 г. отвал относился к горящим, несмотря на проведенные в 2013 г. рекультивационные работы. Для тушения отвала применялась



глина, толщина изолирующего слоя составляла 0,2-0,6 м. В северо-восточной части отвала зафиксирован водоток и размывы. На отвале выявлено 10 очагов горения. В соответствии с паспортом на отвал, по экологической опасности объект относится к категории «очень опасен» и является неперспективным для переработки.

Граница блоков II-II на исследуемом участке фиксируется такими фрагментами рельефа как спрямленные и коленообразные участки русел рек, тальвеги балок и оврагов, седловина. С запада на восток эти фрагменты представлены участком русла р. Большой Несветай ниже пос. Самбек; балкой, проходящей через пос. Нижнесоленный; седловиной в районе высотной отметки 162 м; верховьем балки Уюк; балками Бугултай и Цурюпа; серией оврагов на крутом берегу р. Аюта севернее пос. Новогригорьевка; верховьем балки Булухта в районе пос. Майский; коленообразным изгибом русла балки Турбута; далее ГОЗ проходит под отвалом шахты «Южная» и отвалом шурфа № 3 шахты «Южная», фиксируется спрямленным участком русла в нижнем течении р. Атюхта, коленообразным изгибом р. Грушевка в месте сочленения границы I-I.

В тектоническом плане граница блоков II-II возможно наследует крупную линейную тектоническую структуру мезозойского возраста, так как соответствует ей по простиранию и местоположению.

Начальные и граничные условия. Моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS CFD. Рабочая гипотеза подразумевает поступление воздуха в тело отвала из шахты, находящейся рядом с отвалом и также пересекаемой ГОЗ. По данным о геометрических характеристиках объекта исследования (отвал шурфа № 3 шахты «Южная») и данным о ГОЗ (рис.3) разработана геометрическая модель отвала и окружающего пространства. Мы предполагаем, что поскольку отвал полностью расположен в ГОЗ, то чем ближе к шахте он находится, тем пористость и проницаемость пород выше за счет реактивации трещин процессами сдвижения. В связи с этим массив разделен на три зоны с различными показателями пористости и проницаемости и соответственно представлен в модели тремя доменами (рис.4, а). Отвал представлен отдельным доменом. Над отвалами и горными породами сформирован домен, представляющий атмосферный воздух. Источник воздуха, проникающего в отвал, задан на нижней поверхности зоны 3. Внутри тела отвала сформирован очаг разогрева отвальной массы в виде поверхности с повышенной температурой.

Полученная геометрическая модель разбита на конечные элементы, а значения пористости и проницаемости (см. таблицу) заданы для соответствующих доменов по данным из справочной литературы ([23] и др.). Аэродинамические показатели модели представлены на рис.4, б.

В модели газовоздушная смесь движется к отвалу со стороны шахты за счет избыточного давления 1000 Па. Такое давление обычно создается в горных выработках вентилятором главного проветривания. Состав газовоздушной смеси формируется за счет эмиссии метана при добыче угля и атмосферного воздуха, используемого при вентиляции, т.е. содержит кислород [18].

Предполагается, что поступление кислорода к отвальной массе способствует развитию экзотермических реакций и повышению ее температуры. В связи с этим в модели температура поверхности, моделирующей очаг разогрева отвальной массы, задается равной 100, 200, 300 и 400 °С.

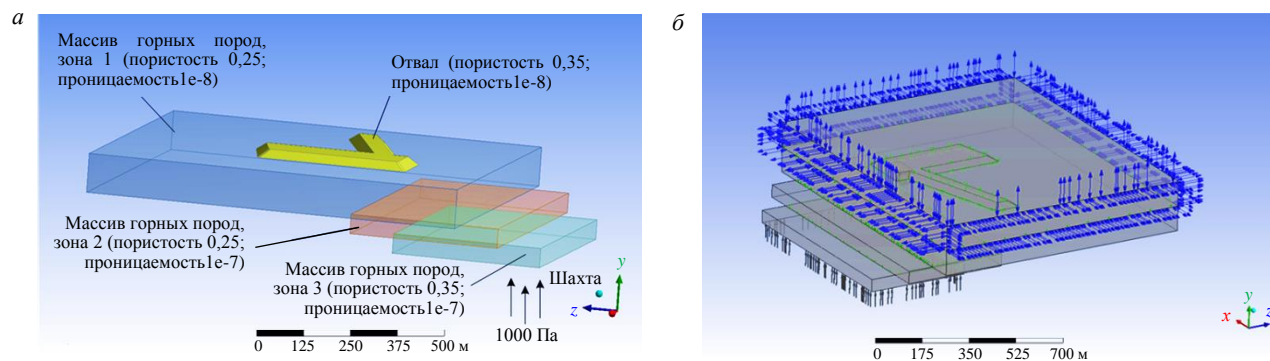


Рис.4. Модель отвала шурфа № 3 шахты «Южная», начальные условия: а – общий вид модели, с указанием характеристик свойств пород и отвала; б – визуализация поверхностей с заданными вводными параметрами



Пористость и проницаемость горного массива и отвала в различных зонах (в соответствии с рис.4)

Зоны	Пористость, %	Проницаемость, м ²	Примечание
Отвал	35	1e-8	Тело отвала, над ГОЗ
Массив горных пород, зона 1	25	1e-8	Горные породы, находящиеся в ГОЗ
Массив горных пород, зона 2	25	1e-7	Горные породы, находящиеся в ГОЗ
Массив горных пород, зона 3	35	1e-7	Горные породы, находящиеся в ГОЗ

Результаты моделирования представлены на рис.5-7. Моделирование в теле отвала поверхности с повышенной температурой (100, 200, 300, 400 °С) показывает, что при увеличении температуры нагретой поверхности температура газов над ней повышается пропорционально (рис.5). Температурный градиент не симметричен относительно центра рисунка, это связано с траекторией движения потоков газов, поступающих из шахты.

При повышении температуры газов увеличивается скорость их восходящих потоков внутри отвала, что отражено на рис.6. Вектора движения воздуха построены по секущей плоскости, проходящей по отвалу и пересекающей нагретую поверхность. Скорость движения воздуха соответствует цвету, в которой окрашен вектор. Шкала скоростей приведена на рис.5, 6.

Для подтверждения вывода о влиянии свойств пород (пористость и проницаемость) слагающих основу, на которой размещается отвал, на возможность движения газов, было проведено дополнительное моделирование для условий расположения отвала вне ГОЗ (рис.7). В дополнительном моделировании на основании данных [16, 23] для пород основания вне ГОЗ пористость принята 15 %, проницаемость 1e-14 м², для пород, находящихся в ГОЗ, пористость принята 25 %, проницаемость 1e-8 м².

На рис.7 видно, что движение воздуха фиксируется только в части пород, расположенных в ГОЗ, в ненарушенных ГОЗ породах скорость движения воздуха близка или равна нулю. На рис.7, а движение воздуха представлено линиями тока с соответствующей окраской в зависимости от скорости движения воздуха. Линии тока построены в доменах, представляющих собой породы, на которых расположен отвал. На рис.7, б отображено движение воздуха в породах под отвалом с помощью векторов, цветом также характеризуется скорость движения воздуха.

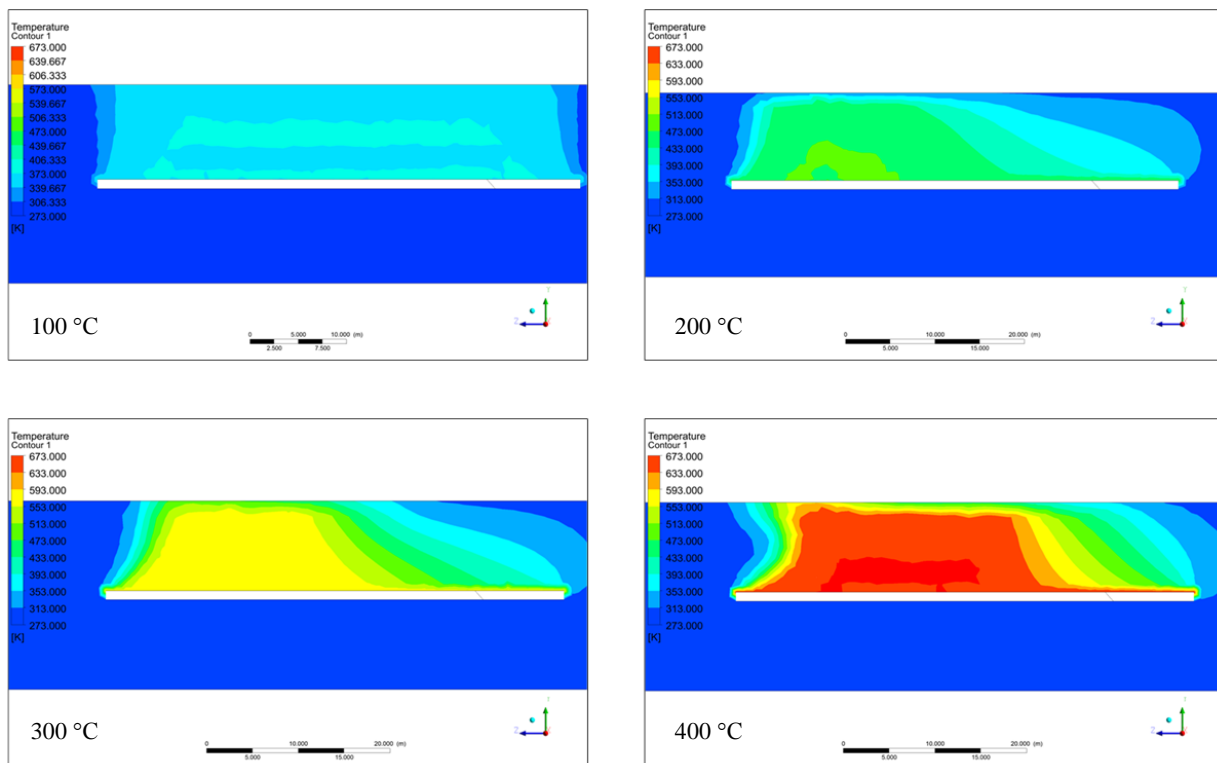


Рис.5. Температура воздуха над нагретой поверхностью

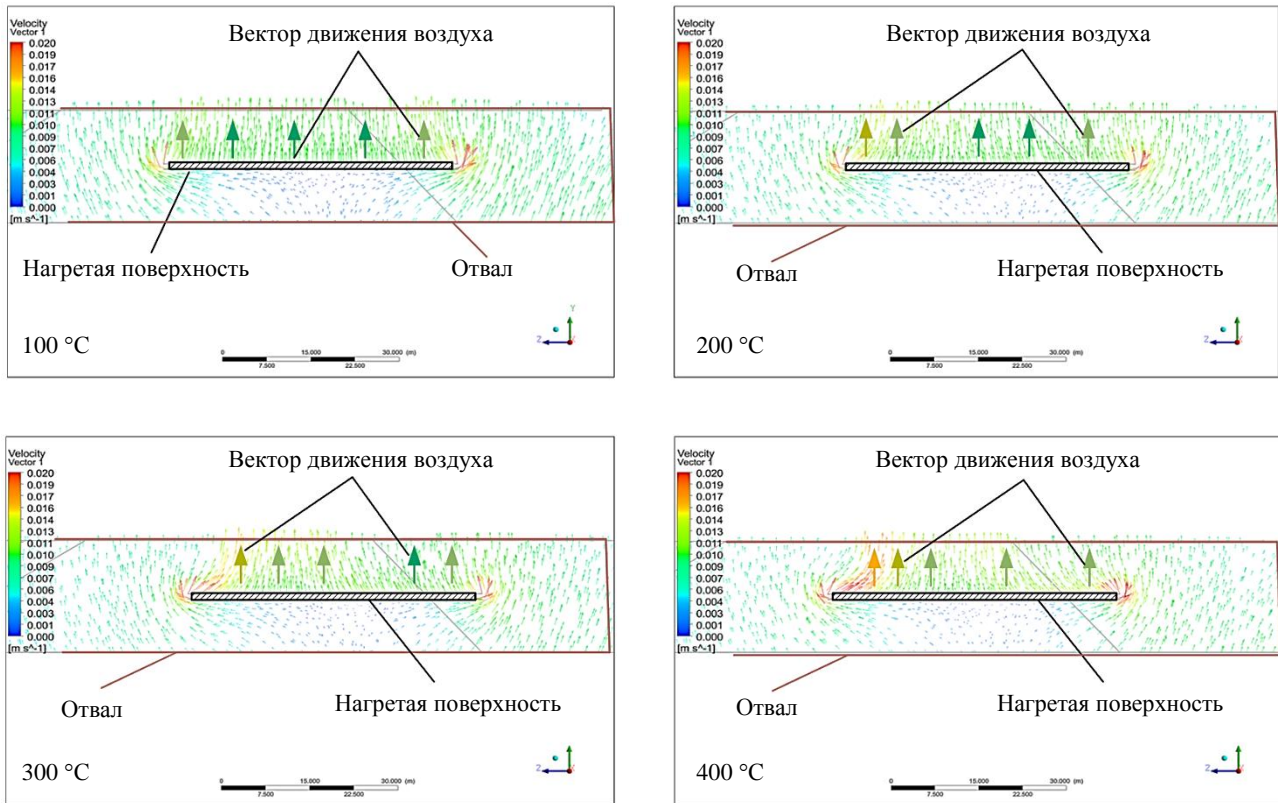


Рис.6. Векторы движения воздуха в зоне у нагретой поверхности

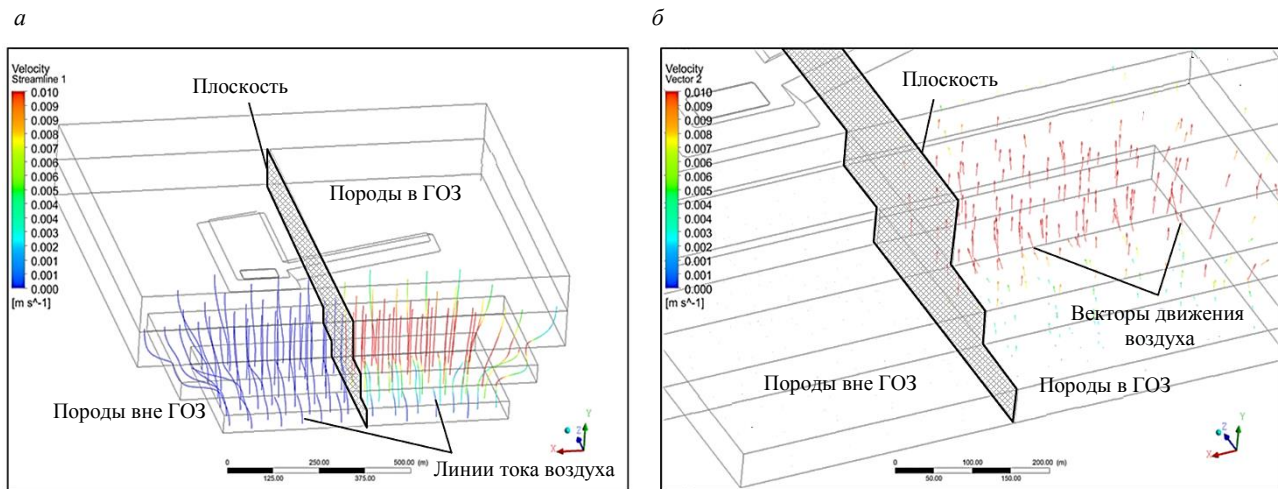


Рис.7. Сравнение скоростей движения воздуха в породах с разными показателями пористости и проницаемости (разделено плоскостью): *а* – токи воздуха, с цветовой индикацией; *б* – векторы, показывающие направление и скорость воздуха

Обсуждение результатов. В основу проводимого исследования положена концепция геодинамического районирования, основанная на идее о взаимодействии глобальных геодинамических и локальных геомеханических процессов при освоении недр и земной поверхности. Для исследования влияния ГОЗ на условия возгорания углепородных отвалов выбрана одна из типичных ситуаций, когда отвал полностью располагается в широкой геодинамически опасной зоне. Такой ситуации соответствует положение отвала шурфа № 3 шахты «Южная», поле которой связано с отвалом через ГОЗ и принято в компьютерной модели как источник поступления воздуха в тело отвала.



Полученные результаты исследования движения воздуха от шахты через ГОЗ и далее в тело отвала можно интерпретировать как подтверждение гипотезы о приуроченности горящих углепородных отвалов к геодинамически опасным зонам. Из представленных на рис.6 результатов моделирования скорости движения воздуха в отвале видно, что ее значения могут находиться в диапазоне от 0,001 до 0,020 м/с. Имеются данные исследований диапазона пожароопасных скоростей фильтрации воздуха через скопление угольного вещества, при которых создаются наиболее благоприятные условия для самонагрева угля. Поступление шахтного воздуха к отвалу через ГОЗ оказывается вполне достаточным для запуска экзотермической реакции и разогрева отвальной массы. Далее, при наличии внутри отвала нагретой поверхности и возрастании ее температуры возрастает и скорость движения потока воздуха над ней внутри отвала, что становится дополнительной причиной притока газов к этой зоне с повышенной температурой и в отвал в целом. Создается ситуация, способствующая появлению эндогенного пожара и увеличению его площади.

Наличие кислорода в зоне очага возможного возгорания признается основным лимитирующим фактором для начала самовозгорания. Именно на предотвращение поступления воздуха к внутренним частям отвалов в основном направлены мероприятия по профилактике этого явления. Из результатов моделирования следует, что наличие ГОЗ, выполняющей роль канала для подвода газа извне, снимает ограничение на поступление воздуха в отвал. При наличии нескольких факторов, способствующих появлению очага возгорания внутри отвала, действие изучаемого фактора усиливается при повышении температуры и в какой-то момент, по-видимому, может стать определяющим, обеспечивая достаточный подвод воздуха к зоне горения.

Выводы

1. Проведенные исследования показывают, что ГОЗ, как региональные элементы геодинамического состояния массива, могут выполнять роль каналов, подводящих воздух в тело отвалов, расположенных в их границах. Расположение отвала в ГОЗ снимает ограничения на поступление воздуха в тело отвала из действующих шахт. Эффект усиливается при наличии внутри отвала очага повышенной температуры, что может делать изучаемый фактор определяющим для самовозгорания и обеспечивать наблюдаемую приуроченность горящих отвалов к ГОЗ.

2. Результаты проведенных исследований находятся в русле представлений о комплексном воздействии ГОЗ на окружающую среду горнопромышленных районов. Отмеченный эффект возможного массопереноса газов к отвалам может проявляться и в других ситуациях и объяснять поступление шахтного «мертвого» воздуха к жилым и производственным помещениям.

3. Авторы считают, что отмеченный эффект необходимо учитывать в проектах комплексного развития территорий горнопромышленных районов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах / Н.Н.Мельников. Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. Т. 1. 539 с.
2. Грязев М.В. Математические модели аэрогазодинамических и теплофизических процессов при подземной добыче угля на различных стадиях отработки месторождений / М.В.Грязев, Н.М.Качурин, С.А.Воробьев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 99-108. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.99
3. Ефимов В.И. Аэрогазодинамические процессы, влияющие на радоновую опасность в угольных шахтах / В.И.Ефимов, А.Б.Жабин, Г.В.Стась // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 109-115. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.109
4. Кобылкин С.С. Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки / С.С.Кобылкин, А.Р.Харисов // Записки Горного института. 2020. Т. 245. С. 531-538. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.4
5. Кобылкин С.С. Трехмерное моделирование при проведении инженерных расчетов по тактике горноспасательных работ / С.С.Кобылкин, А.С.Кобылкин // Горный журнал. 2018. № 5. С. 82-85. DOI: 10.17580/gzh.2018.05.13
6. Метановыделение на земную поверхность для территорий горных отвалов ликвидированных шахт Кузбасса / Н.М.Качурин, Д.Н.Шкуратский, Л.Л.Рыбак, Р.В.Сидоров // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 2. С. 42-48.
7. Новые данные о линейном контроле современных очагов метановой дегазации морей Восточной Азии / Р.Б.Шакиров, А.И.Обжиров, А.С.Саломатин, М.М.Макаров // Доклады Академии наук. 2017. Т. 477. № 1. С. 1287-1290. DOI: 10.1134/S1028334X17110241



8. Разрывные нарушения угольных пластов (по материалам шахтной геологии) / И.С.Гарбер, В.Е.Григорьев, Ю.Н.Дупак и др. Л.: Недра. 1979. 190 с.
9. Шабаров А.Н. Научные основы геологического обеспечения безопасной отработки пластовых месторождений в геодинамически опасных зонах: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Московский государственный горный университет. М., 2004. 44 с.
10. Экологический мониторинг аэрогазодинамических и тепловых процессов при закрытии угольных шахт: Монография / М.В.Грязев, Н.М.Качурин, В.И.Ефимов, Т.В.Корчагина. Тула: Изд-во Тульского государственного университета, 2020. 265 с.
11. Экологический мониторинг при ликвидации шахт и разрезов / Под ред. А.П.Красавина. Пермь: Межотраслевой научно-исследовательский и проектно-технологический институт экологии топливно-энергетического комплекса, 2010. 315 с.
12. Энергетическая модель самовозгорания углепородных отвалов / С.Б.Алиев, В.Н.Захаров, Б.М.Кенжин, Ю.М.Смирнов // Уголь. 2018. № 12. С. 86-91. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-12-86-91
13. Этапы активации и тектоническая делимость Кузнецкого угольного бассейна (Южная Сибирь) / И.С.Новиков, О.В.Черкас, Г.М.Мамедов и др. // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 3. С. 424-437.
14. Batugin A.S. Analysis of Geodynamical Conditions of Region of Burning Coal Dumps Location / A.S. Batugin, V.R. Musina, I.V. Golovko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 95. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042023.
15. Batugina I.M. Geodynamic zoning of mineral deposits for planning and exploitation of mines / I.M. Batugina, I.M. Petukhov. CRC Press, 1990. 169 p.
16. Batugin A.S. Effect of geodynamic setting on spontaneous combustion of coal waste dumps / A.S. Batugin, A.S. Kobylkin, V. Musina // Eurasian Mining. 2019. № 2. DOI: 10.17580/em.2019.02.14
17. Fault zone hydrogeology / V.F. Bense, T. Gleeson, S.E. Loveless et al. // Earth-Science Reviews. 2013. Vol. 127. P. 171-192. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.09.008
18. Kaledina N.O. Ventilation of blind roadways in coal mines: Problems and solutions / N.O. Kaledina, S.S. Kobylkin // Eurasian Mining. 2015. Vol. 10. P. 26-30. DOI: 10.17580/em.2015.02.07
19. Shenghua Chen. Construction of isolation layers for preventing spontaneous combustion of coal gangue dump and its effects / Shenghua Chen, Zhenqi Hu, Shengyan Chen // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering. 2014. Vol. 30. № 2. P. 235-243. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.02.031 (in Chinese).
20. Tanapon Phenrat. Community citizen science for risk management of a spontaneously combusting coal-mine waste heap in ban chaung, dawei district, myanmar // GeoHealth. 2020. Vol. 4. Iss. 6. DOI: 10.1029/2020GH000249
21. The spontaneous combustion of coal-mine waste and stream effects in the el bierzo coalfield, Spain / J. Ribeiro, C.O. Ania, I. Suárez-Ruiz, D. Flores // Coal and peat fires: A global perspective. 2018. P. 98-124. DOI: 10.1016/B978-0-12-849885-9.00007-X
22. Thermal analysis of spontaneous combustion behavior of partially oxidized coal / Jun Deng, Jingyu Zhao, Yanni Zhang et al. // Process Safety and Environmental Protection. 2016. Vol. 104. Part A. P. 218-224. DOI: 10.1016/j.psep.2016.09.007
23. Thiab D. Petrophysics: Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties: 3rd edition / D. Thiab, E.C. Donaldson. Gulf Professional Publishing, 2011. 976 p.
24. Trace element geochemistry of self-burning and weathering of a mineralized coal waste dump: The novátor mine, Czech Republic / B. Křibek, I. Šýkorová, F. Veselovský et al. // International Journal of Coal Geology. 2017. Vol. 173. P. 158-175. DOI: 10.1016/j.coal.2017.03.002
25. Yanci Liang. Mercury emission from spontaneously ignited coal gangue hill in Wuda coalfield, Inner Mongolia, China / Yanci Liang, Handong Liang, Shuquan Zhu // Fuel. 2016. Vol. 182. P. 525-530. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.05.092
26. Zhenqi Hu. An integrated methodology for monitoring spontaneous combustion of coal waste dumps based on surface temperature detection / Zhenqi Hu, Qing Xia // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 122. P. 27-38. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.019

Авторы: А.С.Батугин, д-р техн. наук, профессор, as-bat@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9227-1160> (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия), А.С.Кобылкин, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, aleksandr@kobytkin.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1512-890X> (Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В.Мельникова РАН, Москва, Россия), В.Р.Мусина, канд. техн. наук, старший преподаватель, musinavaleriya@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3344-2572> (Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.10.2020.

Статья принята к публикации 28.07.2021.