

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПРОГНОЗА ГАЗОВЫХ РЕСУРСОВ УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА

*В.А. Васильковский, Е.П. Калиущенко, Институт физики горных процессов, Украина
М.М. Довбнич, Я.В. Мендрий, Национальный горный университет, Украина*

Приведены данные сейсморазведки поля шахты «Краснолиманская» и сорбционных характеристик угля в зоне пласта l_3 перед выбросом, который произошел 23.05.2008. В указанной зоне сейсмическое зондирование обнаруживает снижение плотности горных пород, вызванное, предположительно, повышенной трещиноватостью. Сорбционные и петрографические исследования показали, что зона пласта накануне выброса характеризовалась высокой концентрацией метана и летучих веществ.

Введение. Тектоническое строение угленосных формаций занимает главенствующее место в комплексе факторов, определяющих условия эксплуатации угольных месторождений. Именно с зонами тектонической нарушенности связаны локальные зоны резкой изменчивости прочностных, деформационных, коллекторских и других физических свойств горного массива. Это, в свою очередь, влияет на устойчивость пород кровли угольных пластов, участки возможных прорывов подземных вод в горные выработки, подвижки массива горных пород и пр. Локальные нарушения сплошности углепородного массива, приуроченные к метановой зоне и не имеющие выхода на поверхность, являются благоприятными для скопления значительного объема свободного и адсорбированного метана в закрытых полостях и трещинах.

Оценка прогноза выброса или образования опасной концентрации метана в шахтной выработке требует учета горно-геологических условий залегания пласта. Разрушение углей в форме выбросов определяет совместное действие таких факторов, как газоносность и пористость угля, его прочностные свойства, давление газа. В силу объективных причин структурные и сорбционные особенности угля, сформировавшиеся в пласте к моменту выброса, до сих пор являются предметом дискуссий среди учёных.

Данная работа представляет собой попытку сопоставления данных сейсморазведки шахтного поля шахты «Краснолиманская» и сорбционных характеристик угля в зоне пласта l_3 перед выбросом, который произошел 23.05.2008.

Основная часть.

1. Изучение характера распределения плотности геологических структур на примере данных сейсморазведки поля шахты «Краснолиманская»

Механохимические превращения в зонах естественной трещиноватости и увеличение суммарной поверхности, вызванное диспергированием угля, приводит к росту объема метана, адсорбированного на поверхности гранул и открытых пор. В работе [1] отмечено, что расконсервация такой зоны в ходе добычных работ должна сопровождаться практически мгновенным переходом адсорбированного метана в свободное состояние, а его энергия при расширении пойдёт на перемещение разрушенного угля вдоль выработки. Авторы работ [2,3] считают, что индикатором области нарушения сплошности углепородного массива является рост содержания летучих веществ. Имеются также данные о том, что метаноёмкость угля уменьшается при его разрушении под воздействием объёмного неравнокомпонентного сжатия [4].

Применение геофизических методов – приоритетное направление при прогнозе тектонических нарушений. Сейсморазведка как ведущий геофизический метод занимает лидирующие позиции в изучении областей деструкции геологической среды тектонического генезиса. Мировой опыт и перспективы его применения в Украине рассмотрены в работе [5].

Зоны нарушения сплошности среды со значительными амплитудами смещений достаточно хорошо проявляются в волновом поле и визуально уверенно прослеживаются. Их выделение не требует дополнительных процедур анализа сейсмических данных. В то же

время малоамплитудные и безамплитудные зоны тектонических деструкций хотя и находят отражение в волновом поле, но их прогноз крайне субъективен и неоднозначен. В этих условиях обязательным является применение специальных вычислительных алгоритмов, ориентированных на усиление аномальных эффектов в волновом поле, обусловленных зонами тектонических деструкций. Существует широкий спектр подходов, использующих в качестве поискового признака отдельные особенности проявления зон нарушений сплошности среды в волновом поле [6].

В настоящей работе для изучения областей потенциальных зон нарушения сплошности углепородного массива использован подход расчета сейсмических атрибутов таких как когерентность и кривизна волнового поля, представленный в работе [7]. Не претендуя на изучение внутреннего строения, оценки степени проницаемости и флюидонасыщенности таких зон, данный подход, тем не менее, позволяет проследить системы зон тектонических деструкций на участке исследований, а в ряде случаев сделать выводы об их генезисе.

Когерентность связана с отношением сигнал-помеха или, что более удобно, с отношением энергии сигнальной компоненты к общей энергии в некоторой локальной области записи. При таком определении отсутствие сигнала характеризуется минимальной когерентностью, равной нулю. В свою очередь, «чистый» сигнал, не искаженный никакими помехами, сопровождается максимальной когерентностью, равной единице. Одной из основных причин аномального поведения когерентности сейсмических изображений в области зон малоамплитудных тектонических нарушений и трещиноватости служит деструктивная интерференция отраженных и дифрагированных волн. Оценка когерентности обычно выполняется из предположения о горизонтальности осей синфазности, т. е. без учета наклонов границ. Для данных с наклонными отражающими границами это ведет к заведомо ложным результатам. В целях повышения эффективности вычислений и геологической содержательности в настоящей работе используются наклонно-управляемые алгоритмы, разработанные авторами. Для учета наклона рефрактора предложено вычислять когерентность вдоль аппроксимирующей поверхности, наличие которой позволяет рассчитывать дополнительную характеристику – кривизну. Этот параметр также можно рассматривать как признак проявления тектонических деструкций в волновом поле. Связь кривизны с плотностью трещин базируется на следующих трех предположениях: порода хрупкая и поэтому подвержена трещинообразованию; рост кривизны предполагает рост напряжения; рост напряжения предполагает рост плотности трещин [8].

В качестве примера реализации описанного подхода при прогнозе зон тектонических деструкций углепородного массива рассмотрим результат повторной интерпретации 3D сейсмических материалов, полученных на поле шахты «Краснолиманская». Работы выполнялись по решению правительственной комиссии по исследованию причин и ликвидации последствий аварии, произошедшей на шахте «Краснолиманская» 23 мая 2008 г. Исследования, проводившиеся в режиме научной кооперации исследовательских и производственных организаций (УкрНИМИ НАН Украины, Приднепровская геофизическая разведочная экспедиция и др.), представляют собой уникальный для Украины геофизический эксперимент в условиях шахт. Полученные исходные полевые материалы целесообразно использовать для сравнительной оценки эффективности различных подходов прогнозирования зон тектонических деструкций в условиях угольных месторождений.

Площадь выполнения 3D сейморазведочных работ расположена в пределах блока шахтного поля, сильно осложненного дизъюнктивными нарушениями. Некоторые из них имеют значительную амплитуду и были зафиксированы буровыми работами на этапе разведки. Заметим, что многие вопросы о деталях тектонической модели исследуемой территории остаются открытыми.

В ходе расчетов получены кубы когерентности и кривизны волнового поля. Далее, используя информацию о гипсометрии угольного пласта l_3 для более детального анализа аномальных эффектов в зонах тектонических деструкций, построено сечение кубов данных атрибутов вдоль указанного пласта (рис. 1).

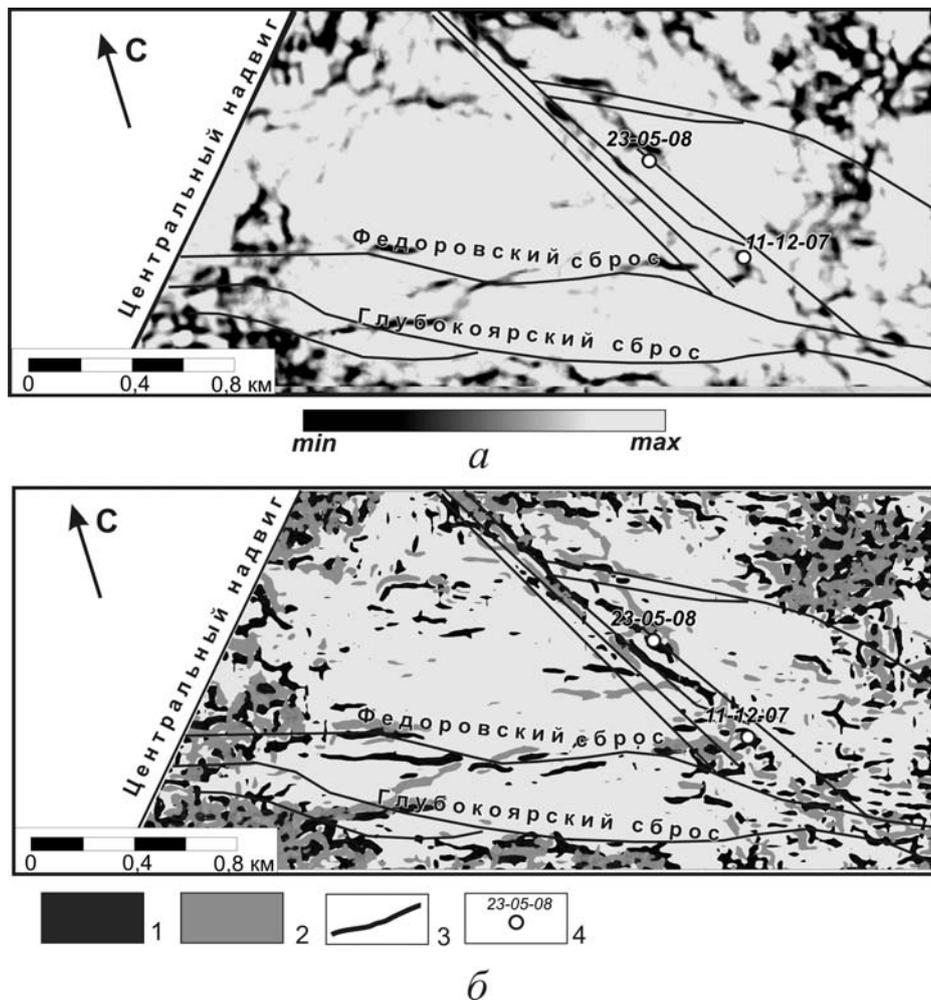


Рис. 1. Срезы когерентности (а) и кривизны (б) волнового поля вдоль угольного пласта l_3 : 1 – наибольшие положительные кривизны; 2 – наибольшие отрицательные кривизны; 3 – тектонические нарушения по данным геологических исследований; 4 – аварии, обусловленные выбросами метана

Распределение атрибутов на срезе хорошо согласуется с геологическими данными, и однозначно указывает на неоднородность тектонических подвижек вдоль нарушений. Для нарушения не представляется возможным выделить одну, четко выраженную плоскость и амплитуду смещения. Другими словами, они представляют собой некоторый объем горных пород, насыщенный разрывами различной амплитуды и трещинами. Элементарные разрывы, образующие общую зону тектонического нарушения, состоящую из отдельных локальных разрывов, формируют эшелонированный ряд. Такое строение зон указывает на преобладающую роль сдвиговых деформаций. На участке исследований за время эксплуатации имели место внезапные выбросы газа, которые привели к авариям. Наиболее крупная авария, повлекшая за собой человеческие жертвы, произошла 23 мая 2008г. Обращает на себя внимание приуроченность аварий к зонам аномальных значений сейсмических атрибутов. Нами проведены исследования особенностей сорбционных и транспортных характеристик угля в указанной зоне.

2. Сорбционные и транспортные свойства угля пласта l_3 шахты «Краснолиманская» перед выбросом 23 мая 2008

Приступая к изучению сорбционных свойств угля в зоне выброса, мы рассчитывали на получение интересной информации, так как известно [3], что приложение к образцу угля некоторых видов напряжений может приводить к изменению фильтрационных и

диффузионных характеристик движения метана в угле. Обсуждение особенностей кинетики сорбционных процессов будем проводить в рамках блочной модели угля. В этой модели каменный уголь представляет собой совокупность мельчайших образований – блоков, свободный объём между которыми составляет объём открытых пор и трещин [9,10]. Блоки, размер которых очень мал, распределены по всему объёму гранул и через систему трещин и открытых пор сообщаются с поверхностью угля. В такой модели диффузия метана происходит из закрытых пор и микропор малых частиц – блоков, средний размер которых не зависит от размера гранулы угля.

Основным резервуаром метана в блоковой модели являются блоки угля. Кроме этого метан содержится также в открытых порах угля. При десорбции наряду с диффузией из блоков происходит фильтрация газа открытыми порами, которая «регулирует» скорость выхода поступающего из блоков газа. Согласно публикации [10], на определенной стадии десорбции устанавливается баланс потоков газа, выделяемого путем диффузии из блоков – $I_d(t) = \partial Q_d(t) / \partial t$ и фильтруемого порами Пуазейля $-I_f = \partial Q_f(t) / \partial t$. В этом случае можно говорить о равенстве всех потоков: десорбции, фильтрации и диффузии: $I_{des}(t) = I_f(t) = I_d(t)$. Характерное время десорбции $\tau^{des}(t)$ газа в условиях баланса потоков представляет собой линейную комбинацию характерных времён процессов фильтрации $\tau^f(t)$ и диффузии $\tau^d(t)$:

$$\tau^{des}(t) = [\tau^f(t)(1+U(t))] + \tau^d(t) \quad (1)$$

Здесь $\tau^f(t) = Q_f(t) / [\partial Q_f(t) / \partial t]$, $\tau^d(t) = Q_d(t) / [\partial Q_d(t) / \partial t]$. Параметры $Q_f(t)$ и $Q_d(t)$ отражают объём газа в открытых порах и теле микроблока, соответственно. Коэффициент $U(t) = Q_d(t) / Q_f(t)$ характеризует изменяющееся в ходе десорбции соотношение количества газа в блоках и открытых порах угля (фильтрационных каналах).

Можно предположить, что уголь, изъятый из различных участков пласта, прилегающих к зоне выброса (и из выброса), подвергался воздействию различных механических напряжений. В терминах диффузионно-фильтрационной модели мы вправе ожидать соответствующих изменений составляющих выражения (1).

Исследования кинетики выхода метана из каменных углей проводились методом десорбции в вакуумированный накопительный сосуд (НС) известного объёма V . Точность метода определяется точностью измерения объёма сосуда, его термостатирования и измерения давления газа $P(t)$, собранного в сосуде. Этот метод свободен от влияния влажности воздуха и позволяет проводить измерения процесса десорбции длительное время. Схема экспериментальной установки была описана ранее [11]. Чтобы исключить дополнительный варьируемый параметр – влажность угля, для опытов использовались предварительно высушенные образцы. Качество высушивания контролировали анализом формы линии спектра ЯМР H^1 по методике, описанной в работе [12]. Объём газа в НС при температуре измерения (293K) и нормальном давлении P_n определяли по формуле $Q(t) = P(t)V / P_n$.

Информация о ходе изменения объёма $Q(t)$ газа в накопительном сосуде используется для компьютерной оптимизации параметров интерполяционной функции имеющей наименьшее среднеквадратичное отклонение от экспериментальных точек. Для интерполяции использовалась функция вида:

$$Q(t) = Q_1(1 - \exp(-t / \tau_1)) + Q_2(1 - \exp(-t / \tau_2)) \quad (2)$$

В указанном приближении параметры τ_1 и τ_2 представляют собой усреднённые значения характерных времен истечения «быстрого» и «медленного» метана, а Q_1 и Q_2 — его объёмы в угле [9]. В двухвременной модели десорбции первая составляющая в (2) определяется, в основном, фильтрационными процессами, а вторая — диффузионными.

В процессе подготовки и проведения экспериментов выполнялись условия:

- а) насыщение всех образцов метаном производилось при одинаковом давлении газа — 2,1 МПа;
- б) регистрация десорбции прекращалась после того, как изменение давления газа в накопительном сосуде было меньше 200 Па за сутки.

Чтобы выявить, как меняется кинетика десорбции метана из углей, претерпевших изменения в естественных условиях (при выбросе), изучались сорбционные характеристики трёх образцов угля в гранулах 0,2—0,25 мм: из спокойной области — 1, из поверхностного слоя ниши выброса — 3 и из выброса — 2. В процессе подготовки и проведения экспериментов выполнялись следующие условия:

- а) насыщение всех образцов метаном производилось при одинаковом давлении сжатого газа 3 МПа;
- б) регистрация десорбции прекращалась после того, как изменение давления газа в накопительном сосуде было меньше 200 Па за сутки.

Масса каждого образца угля 20 г.

Отметим, что в экспериментах определяли объем метана, который оставался в угле после «сброса» сжатого газа из контейнера в атмосферу. (Во время «сброса» вместе со свободным метаном из открытых пор и трещин удаляется также метан, адсорбированный на открытых поверхностях угля).

На рис. 2 показаны результаты десорбометрических измерений.

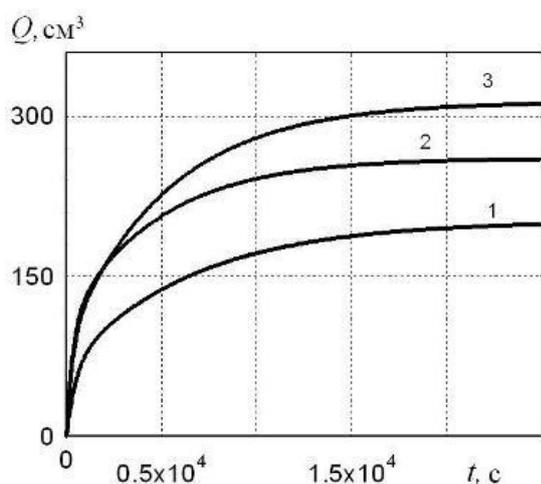


Рис. 2. Изменение объёма метана в накопительном сосуде в процессе десорбции из угля, отобранного: из спокойной области — 1, из приповерхностного слоя в нише выброса — 2 и из выброса — 3. Кривые 1, 2 и 3 построены на основе интерполяционных функций с параметрами: Q_1 — 64,8; 107; 88; τ_1 — 8,07; 5,87; 4,96; Q_2 — 137; 154; 226; τ_2 — 110; 80,2; 88, соответственно

Видно, что объем метана, который содержался в образце 2 из выброса, больше, чем в образце 1 из спокойной области, но меньше, чем в образце 3 из ниши выброса. Показательны величины параметров интерполяционной функции (2), описывающей ход десорбции метана: для образца 1.

В отобранных образцах определяли содержание летучих веществ V^{daf} . Анализ показал, что V^{daf} возрастает от 31,4% в образце 1 до 34,6% в образце 2 и 36,8% в образце 3. Сравнение данных петрографии и опытов по десорбции обнаруживает корреляцию между долей летучих веществ и объемом метана в образцах. Можно предположить, что для низко-метаморфизированных углей, таких, как в нашем случае, их сорбирующая ёмкость формируется углеводородной составляющей.

Тот факт, что газоносность и значение V^{daf} в выброшенном угле больше, чем в угле из спокойной зоны, на первый взгляд, не согласуется с выводами работы [3]. Согласно этой

работе уголь, который предварительно подвергался воздействию объёмного неравнокомпонентного сжатия, имел меньшую газоносность.

Результаты, относящиеся к образцу 3, являются ключом для обоснованной и логически последовательной интерпретации данных петрографических и десорбционных исследований. Для этого достаточно предположить, что выброс был спровоцирован повышенной долей летучих веществ в некоторой области угольного пласта. На это косвенно указывает более высокое значение V^{daf} в образце 3, который отобран в поверхностном слое ниши, образованной выбросом. Параметры сорбционной кинетики и петрография выброшенного угля претерпевают изменения при газодинамических явлениях ГДЯ, подобны тем, какие происходят под действием искусственно прикладываемых разрушающих напряжений [3]: и в том и в другом случае объем метана в угле уменьшался.

Для того чтобы разобраться в причинах наблюдаемых изменений, следует учесть, что в ходе десорбции происходит трансформация механизма выделения газа. Согласно работе [13], ещё во время подготовки к измерениям, когда мы производим сброс избыточного давления в камере насыщения, имеет место начальная фаза десорбции: происходит эвакуация метана из открытых пор и трещин угля. Отличительной особенностью начальной фазы является фильтрация газа в открытых порах угля. В этой фазе за несколько десятков секунд давление метана в открытых порах угля уменьшается от исходного (равновесного) значения в несколько МПа до единиц кПа.

Заключительная фаза, наоборот, отличается большой продолжительностью и слабой интенсивностью выделения газа. Между начальной и заключительной фазами десорбции метана из угля имеет место продолжительная переходная фаза, в которой происходит смена ведущей роли механизмов выхода метана – от фильтрации к диффузии.

Учитывая реализуемые в данных опытах условия подготовки к измерениям, следует заключить, что регистрация десорбции в нашем случае начинается только с переходной фазы. Иными словами, значительный вклад в поток газа в самом начале регистрируемой десорбции обусловлен не завершённым ещё процессом фильтрации газа транспортными каналами (открытыми порами и трещинами).

На рис. 3 заметно различие начальной скорости десорбции метана из угля этих образцов. Согласно теории вязкого ламинарного фильтрационного течения газа [14], его поток I пропорционален перепаду квадрата давления газа в открытых порах и проницаемости k угля - $I \sim k \cdot \Delta(P_{on}^2)$. Как видно из рис.3, при переходе от образца 1 угля к образцам 2 и 3 поток газа возрастает в 2 раза.

Это однозначно указывает на то, что структура, которую имел уголь перед выбросом (и после ГДЯ) отличается от структуры угля из спокойной области.

Если предположить, что в момент начала регистрации десорбции перепад давления метана в открытых порах во всех образцах угля был одинаков, то обнаруженный рост газового потока следует связывать с таким же увеличением проницаемости угля. Рост фильтрационных характеристик при переходе от образца 1 к образцам 2 и 3 можно заметить и по характеру изменения параметра τ_1 интерполяционной функции. Уменьшение газоносности угля в результате ГДЯ логично связать с разрушением наиболее крупных закрытых пор в крупных блоках угля.

Для более детального анализа, включающего количественные оценки изменений фильтрационных и диффузионных характеристик угля, необходимы аналогичные сведения о кинетике десорбции из образцов угля в более крупных гранулах [15].

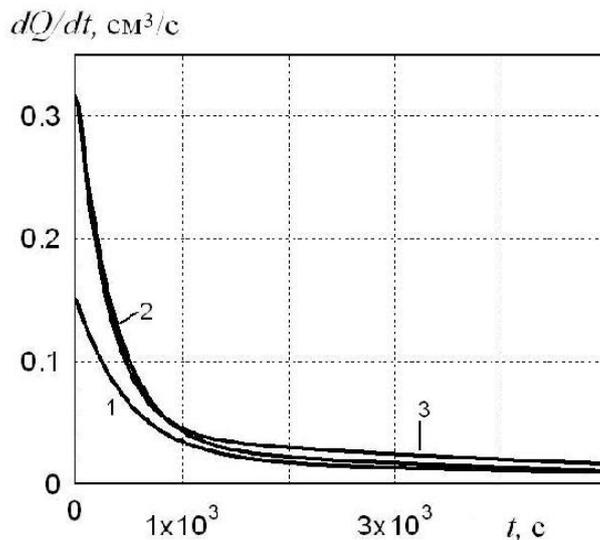


Рис. 3. Зависимость скорости изменения объема метана в накопительном сосуде при десорбции метана из образцов угля. Обозначения такие же, как и на рисунке 2

Выводы. Таким образом, анализ кинетики десорбции метана указывает на то, что структура пор в угле чувствительна к условиям залегания угольного пласта. Обнаружено, что повреждения угля во время выброса приводят к уменьшению содержания летучих веществ и объема метана в блоках угля. Исследования дают основание полагать, что зона пласта перед выбросом, который произошел 23.05.2008, характеризовалась повышенной концентрацией метана и летучих веществ в закрытых элементах угольного вещества. Эти факторы послужили одним из условий возникновения газодинамических явлений.

Сопоставление данных сейсмического зондирования поля шахты «Краснолиманская» и сорбционных характеристик угля в зоне пласта l_3 перед выбросом указывает на то, что аномалии когерентности и кривизны волнового поля связаны с неоднородностью плотности, трещиноватости и проницаемости угольного пласта и могут служить прогностическим критерием зон повышенной метаносности, в пределах которых вероятно возникновение газодинамических явлений.

Список литературы

1. Иванов Б.М. Механические и физико-химические свойства углей выбросоопасных пластов / Б.М. Иванов, Г.Н. Фейт, М.Ф. Яновская. – М.: Наука, 1979. – 195 с.
2. Хренкова Т.М. Исследование продуктов механодеструкции газового угля, применяемого в процессе гидрогенезации. / Т.М. Хренкова, Н.Л. Голденко // Химия твердого топлива. – 1978. – № 5. – С. 44-45.
3. Ревва В.Н. Влияние уровня шарового тензора на физико-механические свойства углей при их разрушении в объёмном поле сжимающих напряжений / В.Н. Ревва, В.А. Васильковский, А.В. Молодецкий // Геотехническая механика: Межвед. зб. науч. тр. Ин-т геотехнической механики им. М.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2010, – №. 91. – С. 128-140.
4. Особенности структуры угля выбросоопасных зон / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский, Е.В. Ульянова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – М.: «Горная книга». – 2010. – Вып. 8. – С.164-179.
5. Применение сейсморазведки при решении проблемы добычи метана угленосных формаций / А.В. Анциферов, В.А. Анциферов, М.Г. Тиркель [и др.] // Геофизический журнал. – 2010. – Т. 32. – № 5. – С. 117-125.

6. Перспективы геофизики и геомеханики при прогнозе зон тектонических деструкций угленосного массива / М.М. Довбнич, Я.В. Мендрий, А.И. Компанец, И.А. Виктосенко // Уголь Украины. – 2012. – №1. – С. 44-48.
7. Мендрий Я.В. Развитие технологии расчета когерентности на основе усовершенствованных моделей сейсмической записи / Я.В. Мендрий, Ю.К. Тяпкин // Геофизический журнал. – 2012. – № 3. – С. 102-115.
8. Chopra S. Volumetric curvature attributes for fault/fracture characterization / S. Chopra, K. Marfurt // First Break. – 2007. – v. 25, № 7. – P. 35-46.
9. Алексеев А. Д. Физика угля и горных процессов: монография / А.Д. Алексеев; Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Киев: Наук. думка, 2010. – 423 с.
10. Васильковский В.А. Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля / В.А. Васильковский, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, – 2006. – №9. – С. 62-70.
- 11 Алексеев А.Д. Кинетика и механизмы десорбции метана из угля / А.Д. Алексеев, В.А. Васильковский, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства: сб. научн. тр. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2005. – Вып. 8. – С. 9-21.
12. Радиофизика в угольной промышленности / А.Д. Алексеев, В.У. Зайденварг, В.В. Синолицкий, Е.В. Ульянова. – М.: Недра, 1992. – 184 с.
13. Васильковский В.А. Трансформация механизма десорбции метана из угля. Три фазы десорбции / В.А. Васильковский // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. трудов. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2009. – №12. – С. 4-10.
14. Лейбензон Л.С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. / Л.С. Лейбензон. – М.-Л.: ОГИЗ. – 1947. – 244 с.
15. Васильковский В.А. Метод определения фильтрационной и диффузионной составляющих характерного времени десорбции метана из каменного угля / В.А. Васильковский // Вести Донецкого горного института. – 2008. – № 1. – С. 101–108.

О ПРИЧИНАХ И МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВ ТЕХНОГЕННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Б.С. Ищенко, В.В. Соболев, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепрпетровск, Украина

Проявления катастрофических событий независимо от масштабов (землетрясения, внезапные выбросы породы, горные удары) являются заключительным этапом в сценарии деструктивных процессов, формирующих состояние неустойчивости некоторой части (очага) массива пород. Насыщение породного массива избыточным запасом энергии главным образом заключается в увеличении концентрации зарядов в дефектах микроструктуры и межзерновых границах минералов, на межфазных границах и на межслойных поверхностях пород. Насыщение зарядами достигается как последовательными, так и одновременными воздействиями различных механических и физических факторов, «быстрой» заменой вещественного состава фазы, заполняющей поровое пространство, и др. Предполагается, что основные физико-химические процессы формирования в массиве пород очага, характеризующегося состоянием неустойчивости, обусловлены электромагнитными эффектами.