

Рис. 5. Зависимость параметра $K_{\text{вл}}$ в крепи ствола от размера локальной зоны разрушения пород t_2

Литература

1. Плешко М.С. О взаимном влиянии факторов, определяющих эффективность строительства и эксплуатации вертикального ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 8. – С. 53 - 56.

УДК 622.02: 539.2/8: 530.1

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ БЕЗОПАСНОГО ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ДОНБАССА

Пимоненко Л.И.¹, Макеев С.Ю.¹, Каргаполов А.А.¹, Ткаченко А.В.²

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины ²Публичное акционерное общество «Шахта им. А.Ф. Засядько»

Для обеспечения безопасности проведения очистных и подготовительных выработок на основе совершенствования известных методов и технологий оперативного контроля рассмотрен вопрос применения теории фракталов. В результате обработки результатов сейсмологических наблюдений при выемке угля на трех лавах сформулирован диагностический критерий прогноза состояния углепородного массива.

Увеличение глубин разработки действующих шахт ведет к усложнению горно-геологических условий: снижению устойчивости выработок, изменению напряженно-деформированного состояния массива, увеличению газоносности и выбросоопасности, ухудшению экологии окружающей среды. Наибольший экономический и социальный урон наносит газодинамические явления. Ликвидация последствий выбросов снижает темпы проведения горных работ и требует дополнительных непроизводительных затрат, что удорожает стоимость угля, делает его не конкурентно способным. По-

мимо экономического ущерба, газодинамические явления на многих шахтах явились причиной аварий, унесших жизни сотен шахтеров.

Накопленные за многие годы знания о подземных динамических явлениях не позволяют в достаточной мере осуществить надежный прогноз времени и места их возникновения. Поэтому первоочередной задачей исследований является заблаговременное определение потенциально опасных участков и предсказание моментов проявления выбросов и горных ударов. Ввиду сложности структуры залегающих горных пород в массиве, большого количества осложняющих геологических факторов (глубина, пористость, литология, тектоника и др.), продолжает оставаться актуальной разработка способа прогноза выбросоопасности, комплексно учитывающего все перечисленные особенности, что обеспечит решение целого ряда экономических, экологических и социальных проблем шахтерских регионов Донбасса. Для решения этой задачи авторами предлагается применение современных математических методов, использующих основные положения теории фракталов.

Исследования проводились на шахте им. А.Ф. Засядько, расположенной в центральной части Донецко-Макеевского района Донбасса при отработке пласта m_3 . Для определения состояния горного массива использованы результаты наблюдений, проводимых на шахте с применением многоканальной сейсмоакустической системы, разработанной польской компанией EMAG [1], включающей в себя датчики-геофоны, размещенные в выработках, каналы передачи сигналов и наземные регистрирующие модули. Данная система регистрирует сейсмические явления и определяет величину их энергии и координаты очага.

В течение месяца в среднем на шахте регистрируется 300-400 проявлений активности горного массива с относительными величинами сейсмических энергий от 70 до 200 тысяч условных единиц. На основе полученных результатов наблюдений составлена база данных, которая используется для изучения сейсмоакустического режима шахты, выделения неспокойных зон и динамики их развития.

С помощью этой системы осуществляли контроль состояния массива при работе 18 восточной лавы, восточной уклонной лавы (ВУЛ) и 18 западной лавы пласта m_3 . По площади сейсмические явления различной интенсивности проявлялись крайне неравномерно как на отработанных, так и неотработанных участках.

Работы по пласту m_3 осуществляются в чрезвычайно сложных горно-геологических условиях. 18 восточная лава отрабатывалась по простиранию пород, слева по ходу от нее находилось выработанное пространство 17 восточной лавы. ВУЛ проходила по восстанию, причем слева и справа от нее – нетронутый массив, осложненный мульдами и прогибами. 18 западная

лава обрабатывалась по простиранию пород с пересечением зоны тектонических нарушений. Справа по ходу от нее находилось выработанное пространство 17 западной лавы.

При обработке 18 восточной лавы регистрация сейсмоакустических (СА) явлений была начата с середины работы лавы (май 2009 г.), область их концентрации перемещалась вслед за продвижением забоя. Формирование очагов при этом частично приурочено к шагу посадки основной кровли и частично – к перераспределению напряжений впереди забоя при очистных работах. Здесь, по мере отработки целика и уменьшения его геометрических размеров, происходило смещение концентрации напряжений в массиве от периферии к центру целика. Обработка лавы закончена в декабре 2009 г.

В первые месяцы обработки ВУЛ (май 2009 г.) по мере продвижения забоя очаги сейсмической активности располагались, как правило, в его окрестностях. После того как была пройдена приблизительно одна треть от общей длины лавы, впереди забоя начала формироваться зона повышенной сейсмической активности, приуроченная к перегибам пласта. В последующем очаги выстроились в виде линии, отходящей, примерно, от середины лавы и ориентированной в сторону конвейерного ходка под углом около 45°. Затем зона концентрации СА явлений переориентировалась и сосредоточилась практически перпендикулярно линии забоя [2]. Обработка лавы закончена в мае 2011 г. Область концентрации СА явлений при обработке 18 западной лавы приурочена к Ветковской структуре (на западе) и к зоне тектонических нарушений (на востоке).

Основой интерпретации полученных данных послужили два положения.

Первое – в работах [3, 4] теоретически обосновано и подтверждено экспериментально, что основное количество сигналов акустической эмиссии связано с зарождением микротрещин, а интенсивность энергии акустического сигнала – пропорциональна их амплитуде.

Второе – углепородный массив шахты, как и Донбасса в целом, представляет собой мелкослоистую среду, состоящую из угольных пластов и вмещающих пород (аргиллитов, алевролитов, песчаников) различной мощности с различными по величине и генезису нарушениями. В общем, массив представляет систему различных по величине и физико-механическим свойствам природных неоднородностей (блоков). Очевидно, что столь сложное строение обуславливает хаотичное распределение природных микродислокаций в массиве. Деформирование такой среды под действием горных работ неизбежно сопровождается проскальзыванием по границам блоков, что приводит к излучению упругих волн, то есть СА эмиссии. Таким образом, СА эмиссия связана с деформационными процес-

сами и параметрами дислокаций (дефектов) в массиве. Под действием горных работ дислокации возникают, движутся, сливаются, тормозятся на границах блоков, разрывных нарушений, горных выработок и образуют на них локальные скопления. Вследствие протекания тектонофизических и механических процессов в массиве возникают иерархии неоднородностей, изменчивости строения, трещиноватости и блочности геологических материалов на различных масштабных уровнях, то есть появляются самоподобные структуры. В зависимости от интенсивности напряжений воздействия возникает избирательный механизм включения в работу соответствующих неоднородностей и дефектов. Именно этот процесс самоорганизации массива (принцип Ле-Шателье), изменяющийся во времени и пространстве, отражают полученные результаты. Они характеризуют образовавшуюся в пределах участка исследований сложную систему трещин – фрактальную, что позволяет использовать фрактальный анализ для интерпретации полученных данных [5].

Для количественной оценки состояния горного массива обрабатываемых участков полученные неоднородные распределения точек на плоскости рассмотрены как недетерминированные (стохастические) фракталы, известные также как мультифракталы [6]. Алгоритм вычисления фрактальной размерности основан на подсчете числа примитивов (клеток) необходимых для покрытия фрактала в зависимости от их размера. Мультифракталы описывают с помощью спектра обобщенных размерностей D_q :

$$D_q = \frac{1}{1-q} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q}{\ln \varepsilon},$$

где q может принимать любые значения в интервале $-\infty < q < \infty$,

$N(\varepsilon)$ – число заполненных ячеек, а p_i – вероятность попадания точки фрактала в ячейку размера ε .

Для практических целей чаще вычисляют Хаусдорфову размерность (D_0) методом разбиения на квадраты (box-counting method). В этом случае фрактал покрывается квадратами со стороной ε и подсчитывается число заполненных ячеек $N(\varepsilon)$. Затем сторона ячейки уменьшается в 2 раза и фрактал покрывается заново. Данная операция производится до тех пор, пока размер ячейки ε не станет числом близким к нулю. Так как при малых ε справедливо соотношение $N(\varepsilon) \approx 1/\varepsilon^{D_0}$, то фрактальную размерность D_0 можно вычислить как угловой коэффициент графика, где $\ln(N(\varepsilon))$ – функция от $\ln(\varepsilon)$ [7].

Расчеты выполнены с использованием программы “Image J” [8] и найдены значения фрактальной размерности для трех обрабатываемых лав. В данном случае фрактальная размерность характеризует количество ячеек, заполненных СА сигналами (трещинами), вне зависимости от их интенсивности. Увеличение фрактальной размерности вызвано увеличением количества ячеек и отражает увеличение трещиноватости [9]. Величину фрактальной размерности D_0 определяли для каждой из лав в виде интегрального показателя, а также в динамике по мере перемещения забоя каждые два месяца. Динамика изменения D_0 представлена на рис. 1-3, а интегральные показатели приведены в таблице 1.

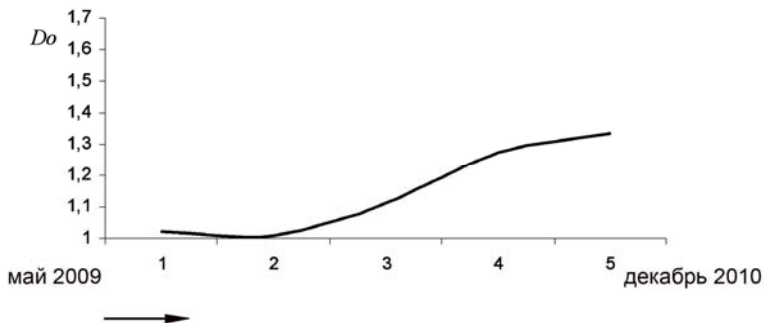


Рис. 1. Изменение фрактальной размерности во времени при отработке 18 восточной лавы

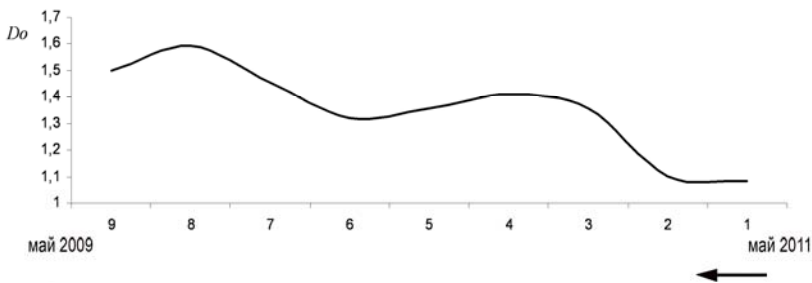


Рис. 2. Изменение фрактальной размерности во времени при отработке восточной уклонной лавы

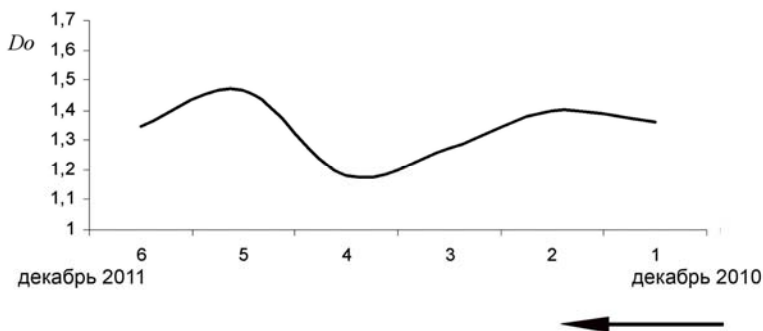


Рис. 3. Изменение фрактальной размерности во времени при отработке 18 западной лавы

Таблица 1 – Интегральные показатели фрактальной размерности для обрабатываемых лав

Лава	Фрактальная размерность
18 восточная лава	1,2674
Восточная уклонная лава	1,5990
18 западная лава	1,4611
Массив вблизи ВУЛ	1,1727
15 восточная «бис» лава	1,5827

Во всех лавых (рис. 1-3) отмечается общая закономерность роста фрактальной размерности со временем работы; кривые имеют волнообразный характер. Присутствующие на графиках спады и подъемы объясняются встречающимися при отработке геологическими нарушениями и особенностями строения пласта. Так, 18 восточная лава обрабатывалась вдоль простирания пород. На рис. 1 видно плавное увеличение значений фрактальной размерности D_0 с величины 1,020 до 1,3366, связанное с уменьшением неотработанного целика и приближением к системе геологических нарушений.

ВУЛ обрабатывалась вкрест простирания пород почти два года; за это время величина D_0 менялась по возрастающей синусоиде. Для начала работ характерно пониженное значение $D_0 = 1,0863$ (рис. 2). Дальнейшее ее плавное повышение связано с проседанием кровли и формированием в массиве напряжений, вызывающих увеличение нарушенности. Затем около 6 месяцев наблюдается практически неизменные значения $D_0 \approx 1,38$. Некоторое понижение значений D_0 согласуется с зоной перегиба пласта,

где величина фрактальной размерности снизилась до 1,32. Последующее повышение D_0 до 1,5926 объясняется уменьшением целика и приближением к области с интенсивно проводимыми взрывными работами.

Положение начала отработки 18 западной лавы находится вблизи Ветковской флексуры в зоне малоамплитудных дислокаций, что сказывается на высоких значениях D_0 (1,36) в первые месяцы работы. По мере удаления от структуры значения фрактальной размерности снизились до 1,18, а затем перед зоной геологического нарушения вновь возросли и достигли максимума 1,47 при его пересечении (рис. 3).

Для всех лав характерно, что в конце работ происходило уменьшение D_0 , связанное с перераспределением и релаксацией напряженного состояния массива. Таким образом, анализируя динамику фрактальной размерности для всех лав, можно предположить, что наименее опасной является 18 восточная лава, в которой разгрузка происходила равномерно. Две другие лавы более опасные, ввиду большего влияния горно-геологических условий.

В работе [4] установлено, что при выемке угля в породах кровли развиваются межслоевые циклические деформации, которые отчетливо (с определенным шагом) проявляются при отсутствии изменений геологического строения массива. При появлении впереди забоя каких либо геологических неоднородностей (нарушений) происходит задержка деформаций и перераспределение нарушений, которое приводит к накоплению потенциальной энергии, определенное количество которой и является причиной выбросов угля и газа. Полученные результаты подтверждают эти данные.

Анализ интегральной фрактальной размерности СА явлений (табл. 1) показал, что наименьшая величина $D_0 = 1,1727$ отмечена в ненарушенном массиве и в менее нарушенной 18 восточной лаве ($D_0 = 1,2674$). Очевидно, это связано с тем, что в неподработанном массиве формируется небольшое количество природных трещин, в отличие от участков активного ведения горных и взрывных работ (15 восточная «бис» лава, где $D_0 = 1,5827$).

Рассчитанные интегральные показатели фрактальной размерности для отработанных лав показали, что большое количество и интенсивность СА приурочены к ВУЛ. Замеры напряженного состояния массива, полученные методом гидроразрыва, согласуются с полученными сейсмологическими данными. Так, для участка, расположенного на юго-западе ВУЛ (между зоной малоамплитудных нарушений и Григорьевским надвигом), характерно наибольшее сжатие, что косвенно подтверждается показателями работы поверхностных дегазационных скважин (ПДС). Конструкция ПДС и качество их обсадки, а также литолого-фациальные характеристики пород массива одинаковы, но дебит газа в зоне сжатия практически в два раза больше, чем на западе.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что величина фрактальной размерности сейсмоакустических явлений отражает степень нарушенности горного массива и может служить характеристикой предрасположенности массива к разрушению. Величина $1 < D_0 < 2$. Чем меньше D_0 , тем меньше сейсмоакустическая активность, характеризующая нарушенность. То есть, при малых D_0 образование дефектов находится в начальной стадии разрушения, а если фрактальная размерность стремится к 2, приближается стадия окончательного разрушения массива, которая может перерасти в лавинообразный процесс. Использование этих данных может служить основой для разработки диагностических критериев опасности проведения горных работ.

Литература

1. Документация установки и обслуживания устройств системы ARAMIS M/E. – ЕМАГ, г. Катовице, 2005.
2. Контроль изменения состояния массива многоканальной сейсмоакустической системой на шахте им. А.Ф. Засядько / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, А.А. Каргаполов и др. // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 88. – С. 26-33.
3. Журков С. Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. – 1968. – № 3. – С. 46-52.
4. Акустический контроль динамики напряженно-деформированного состояния горного массива / А.М. Брюханов, В.П. Коптиков, Г.И. Колчин, А.В. Никифоров // Горная геология, геомеханика и маркшейдерия: Сб. науч. докладов. Ч. II. – Донецк: УкрНИМИ Украины, 2004. – С. 459-463.
5. Булат А.Ф. Фракталы в геомеханике / А.Ф. Булат, В.И. Дырда. – К.: Наук. думка, 2005. – 358 с.
6. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
7. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы: пер. с нем. – М.: Изд-во ИКИ, 2002. – 656 с.
8. Конохов А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: Учебное методическое пособие. – Томск: ТУСУР, 2012. – 105 с.
9. Додис Я.М. Оценка фрактальной размерности разрушенного взрывом массива горных пород // Вестник КРСУ. – 2002. – № 2.