

УДК 622.271.4.012.3

Е.А. НЕСМАШНЫЙ, д-р техн. наук, проф., Г.И. ТКАЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.,

Криворожский национальный университет

А.В.БОЛОТНИКОВ, канд. техн. наук,

Академия горных наук Украины, КП «Академический дом».

А.А.РОМАНЕНКО, ПАО «Центральный горнообогатительный комбинат»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА СТРУКТУРНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ СКАЛЬНОГО МАССИВА ИНГУЛЕЦКОГО КАРЬЕРА НА ОСНОВАНИИ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Сложная конкурентная среда в горнодобывающей промышленности требует таких подходов и знаний, которые позволяют работать с обобщенной эмпирической, аналитической и синтезированной информацией о разрабатываемых месторождениях. Наиболее удобной формой классификации и структурирования информации является представление ее в виде объединенных объектов по принципу близости характеристик. Это дает возможность прогнозировать реакцию породного массива на различные техногенные воздействия.

Анализ исследований и публикаций. Последние десятилетия характерны бурным развитием теории фракталов и ее применения в нелинейной динамике, теории турбулентности, статистической механики, теории фазовых переходов, материаловедении и др. Фрактальную теорию можно перенести и на процессы в горных массивах, учитывая геологические масштабы времени. Термин «фрактал» относится к статической геометрической конфигурации различных объектов, а фрактальный принцип самоподобия предполагает бесконечное дробление набора объектов с сохранением их свойств.

Математический аппарат фрактальной геометрии позволяет описывать плохо организованные системы со сложной геометрией или хаотически организованных систем, к которым можно отнести и нарушенные трещиноватостью породные массивы в карьерах.

С математической точки зрения фрактал представляет собой множество точек, у которых размерность (фрактальная размерность или размерность Хаусдорфа-Безиковича) превышает их топологическую (евклидовую) размерность. Фрактальная размерность d характеризует любую самой себе подобную систему при изменении линейных размеров в f раз. При этом фрактальная величина (например, длина отрезка или площадь поверхности) изменяется при любом f в f^d раз [1-5].

Фрактальная размерность имеет много способов вычисления, но важным ее свойством является то, что она входит в соотношение вида: $NR^d=1$, где показатель степени d и является фрактальной (дробной) размерностью подобия; R - коэффициент подобия; N -число равных подобъектов. Именно такие подобъекты называют самоподобными фракталами, а величину d - фрактальной. Значение размерности d выражается посредством N и R явном виде следующим образом: $d = \ln N(R)/\ln(R)^{-1}$

Для экспериментального определения фрактальной размерности объектов со сложной или хаотичной структурой, обычно применяется методика на основе анализа изображений, разработанная М.Ю. Яблоковым [3], основные положения которой заключаются в следующем.

На изображение искомого предмета накладываются, поочередно, несколько сеток с квадратной ячейкой разных размеров δ . Определяется количество ячеек N , занятых трещинами при каждом размере ячейки δ . Затем сторона ячейки уменьшается в 2 раза и подсчет производится снова. Данная операция производится до тех пор, пока размер ячейки не станет близким к нулю. Фактически фрактальная размерность показывает насколько плотно трещины заполняют ячейку и выступает в качестве количественной характеристики нарушенности объекта исследования.

При этом рост фрактальной размерности однозначно свидетельствует об увеличении нарушенности объекта исследования.

Таким образом, определяется сетчатая фрактальная размерность D , значение которой вычисляется по величине тангенса угла наклона линии к горизонтالي, полученной построением зависимости: $D = \ln N / \ln \delta^1$.

В соответствии с результатами работы [9], для нерегулярных фракталов, фрактальная размерность больше сетчатой фрактальной размерности D , вычисленной по методу сетки, на единицу, т.е.: $d = D + 1$.

Используя метод сеток А.А. Матвеев провел серию экспериментов по определению фрактальной размерности деформируемых образцов горных пород и закономерностей ее изменения при изменении условий внешнего силового воздействия на образцы [12].

Анализ результатов показал, что деформирование образцов сопровождается зарождением и развитием (ветвление, слияние и т. п.) трещин. Взаимодействующие трещины образуют очаги нарушений – кластеры. Динамику этого процесса можно рассматривать как саморазвитие под действием нагрузки кластерной структуры горных пород. В результате установлен устойчивый нелинейный рост фрактальной размерности дефектов поверхности по мере нагружения образцов горных пород. Для аналитического описания зависимости (рис. 1) автором предложено следующее выражение [12]

$$d = d_0 + k\sigma(\sigma - m),$$

где d_0 - фрактальная размерность поверхности исходной горной породы; σ - нормальное напряжение; k , m - эмпирические коэффициенты.

Коэффициент достоверности аппроксимации (0,95) данной зависимости свидетельствует о статистической надежности полученного выражения.

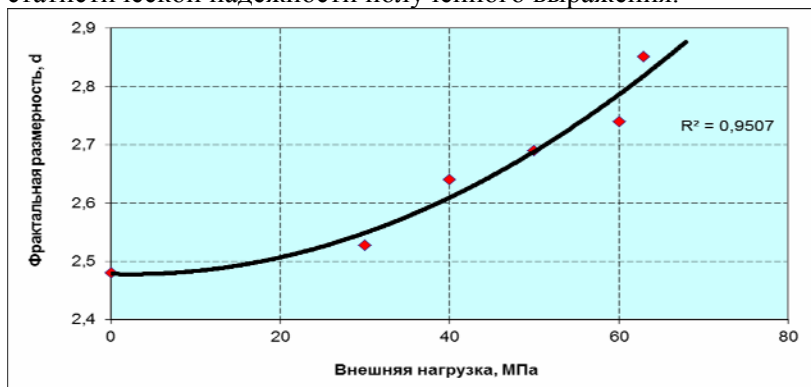


Рис. 1. Рост фрактальной размерности образца горной породы с увеличением нагрузки на него

Положительная кривизна графика, изображенного на рис.1, отражает рост дефектности образцов при увеличении внешней нагрузки, что соответствует современным представлениям о накоплении повреждений в ходе

разрушения горных пород, а фрактальная размерность является надежной оценкой динамики развития трещин, определяющих прочностные и деформационные свойства горных пород и массивов.

Рассмотренные методики могут являться базой для прогноза разрушаемости горных пород, а значит и для определения степени устойчивости как подземных, так и открытых горных выработок.

Постановка задачи. Целью данной работы является определение коэффициента структурного ослабления породного массива в соответствии с изменением его фрактальной размерности.

Изложение материала и результаты. Авторами данной работы предложено фрактальную размерность породного массива определять по фотоснимкам откосов скальных уступов.

Это позволит количественно оценить величину внешнего воздействия на породный массив, например при проведении контурного взрывания перед его постановкой на предельный контур.

Для определения фрактальной размерности скального массива Ингулецкого карьера на основе методики анализа изображений, нами выполнено масштабное фотографирование трех участков спаренных уступов юго-западного борта, поставленных в предельное положение:

методом контурного взрывания, с использованием традиционных гирлянд ВВ;

методом контурного взрывания с использованием укороченных взрывных скважин (метод В.М. Ратушного).

находящихся в предельном положении длительное время и осыпавшихся по природному напластованию.

На спаренных уступах были выбраны участки, на которых наблюдается хаотичное распределение нарушений, представляющих собой сложную картину трещин и имеющих фрактальную структуру.

Для этих трех объектов и определялась фрактальная размерность породного массива с использованием приведенной методики анализа изображений, по формуле

$$d = \frac{\ln N}{\ln\left(\frac{1}{\delta}\right)} + 1 = \frac{\lg N}{\lg\left(\frac{1}{\delta}\right)} + 1,$$

где N - количество ячеек, занятых трещинами при каждом размере ячейки δ .

На рис. 2 представлен пример разбивки уступов на ячейки ($\delta = 8$).

Получены численные значения фрактальной размерности:

для природной трещиноватости породного откоса $d_1 = \operatorname{tg}\varphi_1 + 1 = 2,27$;

для трещиноватости образовавшейся при контурном взрывании с использованием стандартных гирлянд ВВ $d_2 = \operatorname{tg}\varphi_2 + 1 = 2,38$;

при контурном взрывании с использованием укороченных скважин (метод В.М. Ратушного) $d_3 = \operatorname{tg}\varphi_3 + 1 = 2,63$. Результаты выполненных подсчетов, в графическом виде, представлены на рис. 3.



Рис. 2. Спаренные уступы на западном борту карьера ИнГОКа, поставленные в предельное положение по напластованию ($\delta = 8$)

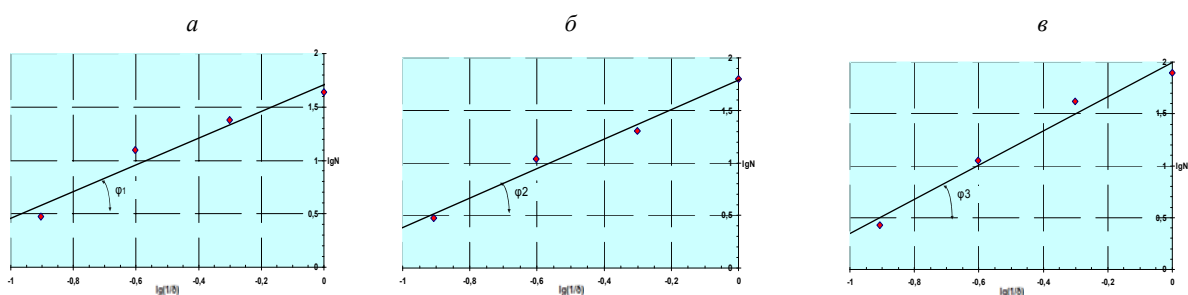


Рис. 3. Результаты определения фрактальной размерности породных массивов в откосах скальных уступов юго-западного борта карьера ИнГОКа: *a* - природная трещиноватость; *b* - после стандартного контурного взрывания; *в* - после контурного взрывания по методу В.М.Ратушного

Фрактальный подход также позволяет иначе интерпретировать масштабный эффект прочности в горных породах, проявляющийся в зависимости прочности σ_p от геометрических размеров тела [11-14].

Причина его связана с механизмом разрушения хрупкого материала, а влияние размеров тела на его прочность, чаще всего описывают с помощью следующего степенного закона

$$\sigma_p \rightarrow V^{-\frac{1}{m}},$$

где V - характерный разрушаемый объем материала; m - коэффициент неоднородности хрупкого материала.

Рассматривая теперь квазихрупкое разрушение тела с учетом того, что разрушенная структура представляет собой фрактальный кластер размерностью d , который, в основном, совпадает с дефектной структурой, то разрушение тела на части должна обеспечивать минимальная дефектная структура, и поэтому, ее фрактальная размерность должна быть не менее двух и проявляться при следующем условии [6]

$$d = 2 - \ln(\sigma_o / \sigma) / \ln(L / \delta) = 2 - \lg(\sigma_o / \sigma) / \lg(L / \delta), \quad (1)$$

где σ_o - прочность материала, нарушенного трещинами и поверхностями ослабления; σ - разрушающее напряжение для структурного элемента (зерна, куса, блока) размером δ ; L - характерный размер твердого тела.

Преобразуем выражение (1) к виду

$$\lg \frac{\sigma_o}{\sigma} = (2 - d) \cdot \lg \frac{L}{\delta}. \quad (2)$$

Учитывая, что конечной целью работы является определение степени устойчивости уступов, групп уступов и бортов карьеров, сложенных скальными породами, отношение σ_o/σ в приведенной формуле, представляет собой не что иное, как коэффициент структурного ослабления k_c .

Отношение линейных размеров L/δ , из формулы (2), применительно к расчетам устойчивости открытых горных выработок необходимо рассматривать как отношение вероятного объема призмы сдвижения V к объему характерного структурного блока V_o . Тогда выражение (2) можно преобразовать к виду, позволяющему определять коэффициент структурного ослабления породного массива в соответствии с изменением его фрактальной размерности

$$\lg k_c = (2 - d) \cdot \lg \frac{V}{V_o}. \quad (3)$$

Откуда получаем выражение для определения коэффициента структурного ослабления породного массива в зависимости от его фрактальной размерности

$$k_c = 10^{(2-d) \lg \frac{V}{V_o}}. \quad (4)$$

На рис. 4. показана графическая зависимость коэффициента структурного ослабления породного массива от величины его фрактальной размерности при различных значениях масштабного фактора.

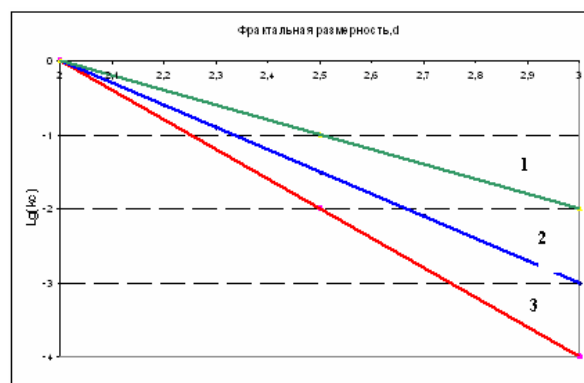


Рис. 4. Зависимость коэффициента структурного ослабления k_c породного массива от величины его фрактальной размерности при различных значениях масштабного фактора: 1 - $V/V_o = 100$; 2 - $V/V_o = 1000$; 3 - $V/V_o = 10000$

С учетом приведенных значений фрактальной размерности для породного массива в районе юго-западного борта Ингулецкого карьера, на основании полученного аналитического выражения (4), определены численные значения коэффициента структурного ослабления:

для природной трещиноватости породного откоса $k_c = 0,021$;

для трещиноватости образовавшейся при контурном взрывании с использованием стандартных гирлянд ВВ $k_c=0,0195$;

при контурном взрывании с использованием укороченных скважин (метод В.М. Ратушного) $k_c=0,015$.

Полученные значения коэффициента структурного ослабления показали, что использование традиционного метода контурного взрывания не приводит к существенному увеличению (всего на 7,1%) степени нарушенности законтурного массива по сравнению с его природной трещиноватостью.

Выводы и направления дальнейших исследований. Разработана методика определения фрактальной размерности скальных массивов на основе анализа фотоизображений их откосов и расчета на этой основе величины коэффициента структурного ослабления скального массива. Для трех участков на южном и западном борту карьера ПАО «ИнГЭК» определены численные значения коэффициента структурного ослабления для:

природной природной трещиноватости породного откоса $k_c=0,021$;

трещиноватости образовавшейся при контурном взрывании с использованием стандартных гирлянд ВВ

нарушенности при контурном взрывании с использованием укороченных скважин (метод В.М. Ратушного).

Полученные значения коэффициента структурного ослабления необходимы для определения степени устойчивости сдвоенных уступов в районе юго-западного борта Ингулецкого карьера при постановке их на предельный или временно нерабочий контур и позволяют конкретизировать информацию о степени нарушенности законтурного массива с учетом изменения состояния породных откосов под влиянием техногенных процессов.

Результаты изучения фрактальных характеристик скальных массивов могут быть использованы для дальнейшего развития методов исследования геодинамики и геофизического мониторинга горнорудных месторождений.

Список литературы

1. Кровер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. -М., 2000.
2. Нифедьев В.И., Додис Я.М. Формирование поля напряжений и энергозатрат при разрушении горных пород взрывом // Вестник КРСУ. - 2001. - Т.1. - № 4. - С. 49-57.
3. Яблоков М.Ю. Определение фрактальной размерности на основе анализа изображений // Физическая химия. - 1999. - №2. - С. 73.
4. Хаусдорф Ф. Теория множеств. -М.; ОНТИ, 1937. -304 с.
5. Безиков Ф.А. Исследование непрерывных функций в связи с вопросом об их дифференцируемости // 7. Математический сборник. -1924. -№4. - С529-556
6. Булат А.Ф., Дырда В.И. Фракталы в геомеханике. - Киев: Наукова думка, 1995. - 356 с.
7. Гуревич В., Волман Г. Теория размерности. -М.: ИЛ, 1948. -231 с.
8. Mandelbrot B. The Fractals Geometry of Nature. -№4. -Freeman. -San Francisco, 1982.
9. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, -1991. -254 с.
10. Латышев О.Г., Карасев К.А., Мартюшов К.С. Фрактальный тренд-анализ изменчивости временных и пространственных рядов свойств пород и массивов // Горный журнал. 2013. № 2.- С. 75-79
11. Гольдштейн Р.В., Мосолов А.Б. Мультифрактальная геометрия и масштабный эффект // ДАН (РАН). - 1993. - 329, № 4. -С. 429-431.
12. Матвеев А.А. Исследование деформационных и реологических свойств горных пород и массивов для прогноза устойчивости подземных выработок с учетом их фрактальной геометрии // Автореф. дисс. канд.техн. наук. -Екатеринбург, -2012.
13. Смирнов Б.М. Фізика фрактальних кластерів. М.: Наука, 1991
14. Фисенко Г.Л. Методы количественной оценки структурных ослаблений массива горных пород в связи с анализом их устойчивости. - В кн.: Современные проблемы механики горных пород. Л., Наука. - С. 21 - 29.

Рукопис подано до редакції 26.02.15