

УДК 622.235.1:530.1:528.8 (575.2) (04)

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАССИВА
В ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ
БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ**

В.И. Нифадьев – акад. НАН КР, докт. техн. наук

Я.М. Додис – докт. техн. наук

Modern approaches for assessment of interpolating and extrapolating capacities of drilling tools taking into account a rock factor are considered.

Известно, что распространение свойств массива для различных по генезису месторождений подчинено определенным законам. Их исследование дает возможность выявить структурные особенности, будь то прочностные свойства, качество полезного компонента и т.п. Как правило, структурные признаки рассматриваются как некоторые закономерности в их пространственном положении, они то, собственно, и образуют структуру. Характер структур зависит от плотности информационной сети.

При получении информации о взрываемости проявление структуры выражается как случайными, так и закономерными признаками. Эти явления чередования в случайности закономерного, так и закономерного в случайном устанавливаются через тренд или на основе фрактального анализа. Дискретное получение информации в точках случайного поля аналогично броуновскому движению и соответствует случайным фракталам или мультифракталам, в данном случае прочностных свойств. Дискретный характер расположения точек отбора проб на то или иное свойство обуславливает тот факт, что геологическому объекту, как любому природному явлению, при моделировании присуща случайность распределения его показателей в пространстве. Поэтому имеются убедительные основания

предполагать, что подобные явления могут быть успешно описаны как случайные фракталы.

Следует определиться, к какому виду фракталов относится вариант установления основных свойств массива. Известны фракталы самоподобия [1, 2], для которых численно совпадают размерности Хаусдорфа, подобия, поточечная и размерность кластера. Известны фракталы самоаффинные [1–4], которые характеризуются локальной и глобальной размерностями и связаны с показателями Херста (H) [5], который еще называется аффинным показателем и может находиться в пределах $0 < H < 1$.

Массив горных пород с множеством свойств, часто взаимообусловленных, абсолютные величины которых случайным и в то же время каким-то квазизаконным образом расположены в пространстве, является сложным объектом и принадлежит к мультифракталам. Стохастическое описание мультифракталов предложено в [6], где, в частности, рассматривался процесс случайного дробления больших структур на меньшие.

В настоящее время для бурения взрывных скважин используются высокопроизводительные станки, способные обуривать участки недр больших размеров, включающие горные породы различной прочности. При стремлении к относительно равномерному дроблению возникает технологическая задача распределения

массы ВВ в скважинных зарядах в соответствии с взрываемостью горных пород, что может быть достигнуто при наличии оперативной информации об их прочностных свойствах.

Известно, что качество дробления, при прочих равных условиях, зависит от свойств ВВ и параметров расположения скважин на взрываемом участке. Современными и технологичными в отличие от нетехнологичных способами управления параметрами БВР в рамках задачи качественного взрывного дробления пород массива являются:

- статические, в основу которых положено районирование массивов карьерного поля по взрываемости;
- динамические, когда нагрузка на скважину, т.е. сетка скважин, изменяется вслед за изменением взрываемости.

Районирование, естественно, выполняется достаточно крупными участками месторождения и не учитывает локальных особенностей, например, включение в массив даек с резко отличными физико-механическими свойствами и прочих включений. Районирование подразумевает наличие информации по всей площади поля и еще по нескольким горизонтам вглубь карьера, чтобы можно было наладить прогнозирование свойств по глубине и по площади, что, естественно, можно реализовать с определенной надежностью, зависящей от генезиса месторождения, средств и методов получения подобной информации.

Этот первый вариант управления сводится к экспериментальному установлению для каждого условно выделенного участка сетки скважин при данном диаметре заряда и типе ВВ. Тогда взрываемость пород, определяемая удельным расходом ВВ, будет меняться автоматически в зависимости от нагрузки на скважину, находящейся с взрываемостью в обратной зависимости, а высота заряда должна быть постоянной так же, как и столб забойки в соответствии с Правилами техники безопасности.

Динамические или оперативные способы подразумевают получение и обработку информации о прочностных и структурных особенностях массива пород в ходе производственных процессов и выбор на основании этого параметров БВР. Для реализации этого вари-

анта управления необходимо доказать возможность распространения показаний данной информационной точки на последующие или на заданное расстояние. Иначе, речь идет о решении задачи оперативного прогнозирования свойств или точнее о специальной задаче теории распознавания образов.

Если в качестве показателя взрываемости принять удельный расход ВВ, причем растущий пропорционально прочностным свойствам пород, то управление качеством дробления возможно в основном двумя способами, вписывающимися в общую технологию разработки и являющиеся технологически приемлемыми:

1) изменением массы зарядов при постоянной сетке скважин, т.е. постоянной “нагрузке” на каждый скважинный заряд;

2) изменением сетки скважин и, следовательно, расстоянием между скважинами с принятием постоянной массы заряда.

Первый способ, не учитывающий локальное изменение взрываемости пород на небольших базах, является традиционным и осуществим при известных прочностных свойствах пород на отдельных, как правило, большой площади участках, при этом невозможно оперативное реагирование на изменение взрываемости.

Второй способ, иначе называемый оперативным методом изменения параметров БВР, позволяет изменять сетку скважин в ходе бурения по информации, полученной при бурении предыдущей скважины [7]. Здесь в качестве показателя прочности пород массива выбрана энергоемкость шарошечного бурения [8]. При этом связь между шагом передвижки станка и, следовательно, величиной нагрузки на скважинный заряд диаметром 250 мм и при высоте уступа 15 м выражается соотношением, установленным для Саякского карьера:

$$a = 11,0 \exp^{-0,190E},$$

где a – расстояние между скважинами, м;
 E – величина энергоемкости бурения, квтч/м.

Нетрудно заметить, что максимальное расстояние, на котором можно пробурить следующую скважину при наименьшей прочности пород для данного диаметра заряда, со-

ставляет около 11 м с учетом принятой высоты уступа, равной 15 м.

Способ оперативного изменения параметров БВР реализован на Саякском карьере при буровзрывной подготовке одного из участков. Основанием к использованию этого метода явились экспериментальные работы по определению взрываемости двух смежных блоков (рис. 1). В ходе подготовки блока I одновременно обуривали блок II и измеряли энергоемкость бурения на базе второй штанги, т.е. в интервале 7–15 м от поверхности уступа (обозначена цифрами). После взрыва участка I скважины блока II были нарушены, поэтому принято решение перебурить его заново с получением повторной информации о взрываемости после его разупрочнения от взрыва на смежном участке. Таким образом, появилась информация о прочности одного и того же

участка до и после взрывного нагружения (рис. 2).

Выполненные экспериментальные работы позволяют поставить и решить несколько важных вопросов в методическом отношении:

1. О правомерности использования информации о прочности по предыдущей скважине для прогнозирования (экстраполирования) ее на последующую, по которой выбирается новое расстояние между скважинами, имея в виду, что оно обратно пропорционально энергоемкости бурения.

2. Об оценке степени разупрочнения массива.

Для решения первой задачи нами использованы основные понятия тренд-анализа и изменение структуры нарушенного массива по изменению величины фрактальной размерности.

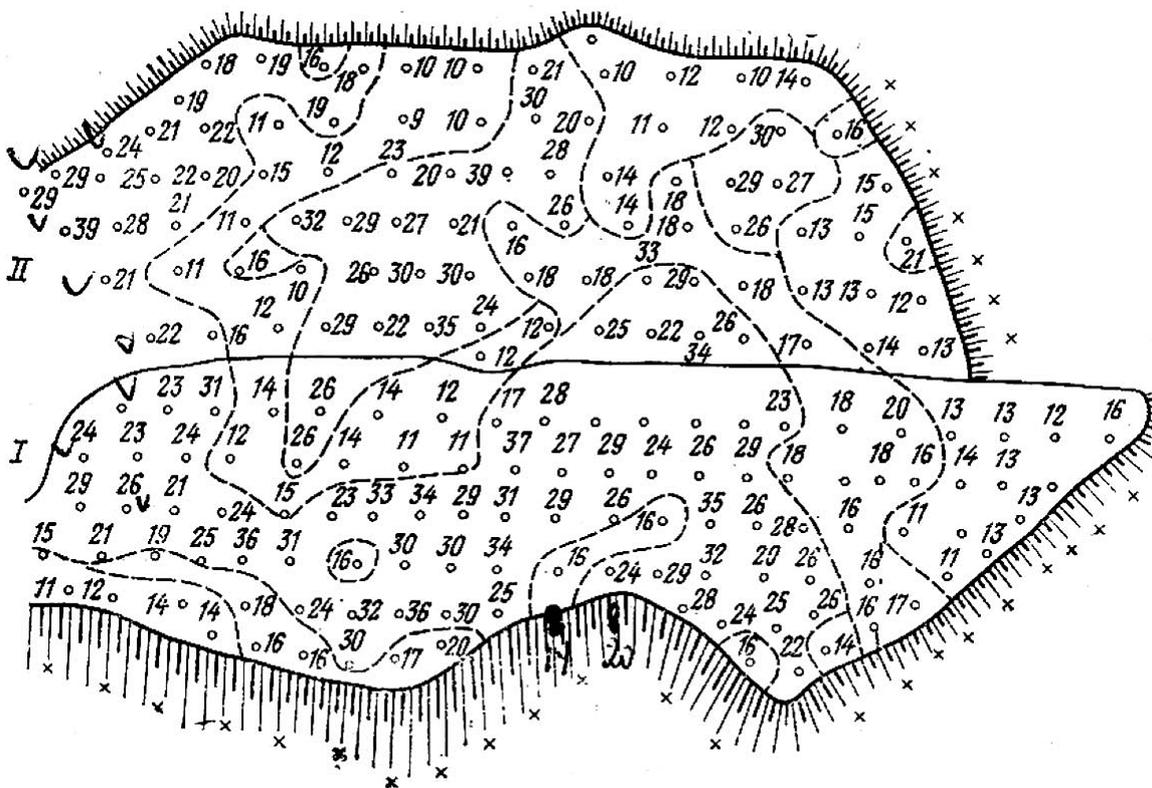


Рис. 1. Экспериментальные блоки:
I – блок, взорванный в первую очередь, II – разупрочняемый блок.

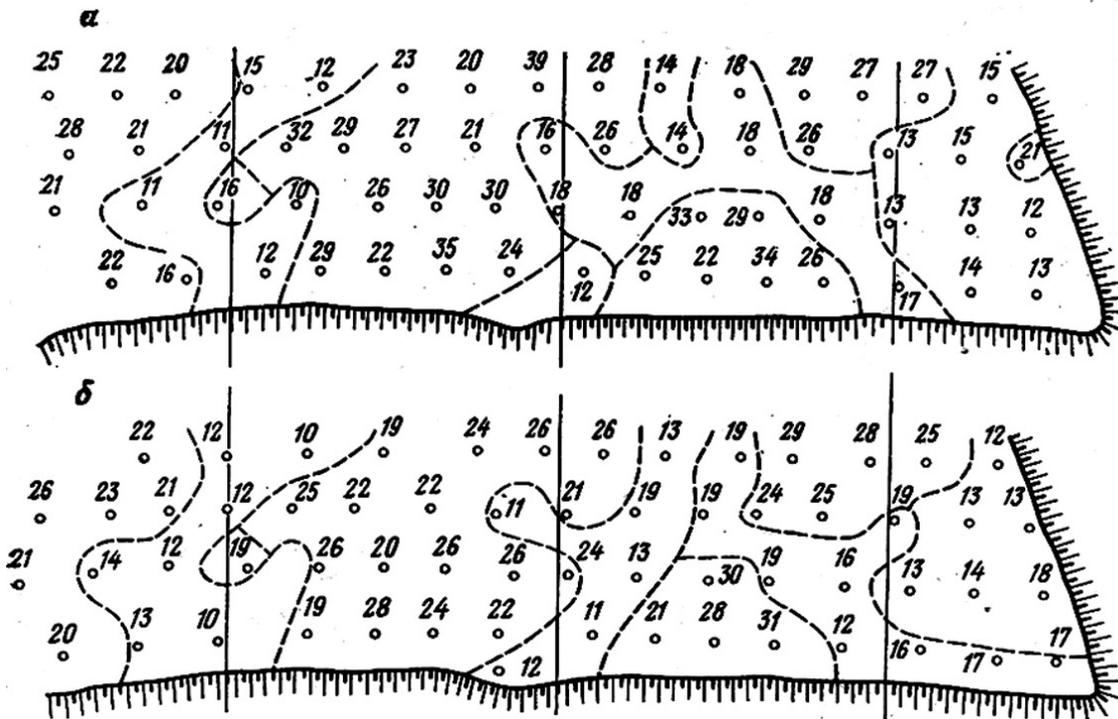


Рис. 2. Распределение величин энергоёмкости бурения на блоке II до (а) и после разупрочнения (б)

При разработке тренд-анализа исходили из того, что если существует тренд, то оправдано экстраполирование с учетом оценки возможного риска. Тренд-анализ выполнен методом “смены знака” при переходе от предыдущего значения энергоёмкости к последующему, для чего соответственно устанавливались математическое ожидание (M_e) числа смены знака, дисперсия (σ_e) и по ним оценка вероятности (Z_e) подтверждения или отклонения гипотезы о наличии тренда по статистике:

$$\begin{aligned} M_{(e)} &= \frac{2N - 4}{3}; \\ \sigma_{(e)}^2 &= \frac{16N - 29}{90}; \\ Z_{(e)} &= \frac{M_{eTM} - M_{(e)}}{\sigma_{(e)}} \end{aligned} \quad (1)$$

Наличие или отсутствие тренда устанавливали как по ряду скважин, так и в целом по боку табл. 1.

Анализ сведений табл. 1 свидетельствует о существенном изменении ситуации на блоке после взрыва на смежном участке. Если до взрыва только по двум рядам скважин (во 2-м и 4-м) не отмечались тенденции тренда с надежностью вывода около 0,68, а в 1-м и 3-м, наоборот, наличие с вероятностью 0,74 (рис. 2), то после взрыва тренд наблюдается как в среднем по блоку, так и по рядам скважин с надежностью не менее 0,8. Очевидно, что более прочные локальные участки на блоке (до взрыва) в результате взрывного нагружения смежного блока аккумулировали большой запас энергии и разрушились больше, чем слабые. Это привело к нивелировке и сбросу случайных величин.

Результаты определения вероятности наличия тренда уровня прочности пород массива

Показатель	После взрыва на смежном блоке					До взрыва на смежном блоке				
	Ряд скважин				в целом по блоку	Ряд скважин				в целом по блоку
	1	2	3	4		1	2	3	4	
M(e)	9,33	9,33	9,33	9,33	39,33	9,33	9,33	9,33	7,33	38,66
$\sigma^2(e)$	2,52	2,52	2,52	1,99	10,52	2,52	2,52	2,52	1,99	10,34
Z(e)	-0,924	-0,924	-0,924	-1,673	-1,26	-0,527	0,663	-0,527	-0,667	-0,450
P(e)	0,179	0,179	0,179	0,047	0,104	0,301	0,745	0,301	0,745	0,326
Наличие тренда	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть слабый	Нет	Есть слабый	Нет	Есть слабый

Обратимся теперь к исследованию фрактальной структуры поверхностей. Такую структуру можно представить, используя данные по измерению энергоемкости бурения, следующим образом. Если от условной горизонтальной плоскости, за уровень которой принять наименьшую величину энергоемкости E(квтч/м), от нее по оси У откладывать фактически измеренные величины E по каждой из скважин, затем все вершины соединить между собой, то получим некоторую “гористую поверхность” [10]. В данном случае исследуемый процесс соответствует нестационарному процессу Винера-Леви, при котором проявляется броуновское движение с дисперсией приращений ΔE :

$$W(\Delta E) = \left\{ [Z(E + \Delta E) - Z(E)]^2 \right\} \quad (2)$$

и тогда дисперсия $W(\Delta E)$ зависит только от разности соседних величин энергоемкости и мало зависит от их абсолютной величины [1]:

$$W(\Delta E) \approx |\Delta E|^{2H}, \quad (3)$$

где H – показатель Херста.

Поскольку приращения независимы, то броуновское движение является марковским процессом, т.е. при переходе от E(x1) к E(x2) вероятность появления E(x2) зависит только от x1 и x2 при x2>x1. Эта вероятность не зависит от поведения E(x) при x<x1 и, следовательно, в процессе случайного блуждания каждый шаг

делается без какой-либо информации о том, каким образом процесс достиг текущего значения.

Между тем при переходе от E(x1) к E(x2) и в том случае, если встречаются минимальные и

$$\Delta E = |E_{max} - E_{min}|$$

максимальные значения показателя энергоемкости бурения, возникает риск ухудшения качества дробления и в целом подготовки горной массы взрывом. С точки зрения надежности подготовки горной массы случай перехода от E_{min} к E_{max} более опасен, чем обратный, поскольку при E_{min} задается максимальное расстояние до следующей скважины, которая может оказаться в очень крепких породах.

Степень риска будет определяться вероятностью встречи сочетания E_{min} – E_{max} при условии равномерного расположения скважин на уступе, т.е. при постоянной сетке или традиционной технологии буровзрывных работ и районировании массивов по взрываемости. Очевидно, для однородного блока должно выполняться условие:

$$P = 1 - P(E_{min} - E_{max}),$$

где P_i – надежность подготовки горной массы при данной технологии.

Результаты взрывных работ свидетельствуют о том, что надежность подготовки горной массы взрывом находится в экспоненци-

альной зависимости от взрываемости пород массива и с повышением крепости пород падает.

Наша модель поверхности энергоемкости бурения есть двумерный вариант броуновского движения и по аналогии с одномерным (если двигаться по рядам скважин) гауссовский процесс будет двумерным броуновским движением, если он имеет следующие свойства [10]:

$$E(0,0) = 0 \text{ и функция } E(x)$$

почти всегда непрерывна ; (4)

Случайная величина

$$\Delta E = E[(x+\Delta x), (y+\Delta y)] - E(x,y) \quad (5)$$

имеет математическое ожидание, равное 0, и дисперсию, определяемую соотношением

$$K_E^2 \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}, \text{ где } K - \text{положительная константа.}$$

Двумерное броуновское движение почти наверное недифференцируемо, а его фрактальная размерность D должна быть равна 2,5, так как в [1] доказано, что для одномерного движения она равна 1,5.

Условия использования модели, когда вероятность достижения $E(x_2)$ при заданном $E(x_1)$ и $x_1 < x_2$ зависит только от x_1 и x_2 , а не от поведения $E(x)$, побуждают к отысканию процесса, который бы обладал некоторой памятью.

В [1] Мандельброт такой процесс назвал фрактальным броуновским движением (ФБД) [9]. ФБД удобно определять при помощи показателя Херста, который связан с фрактальной размерностью соотношением:

$$H = 2-D - \text{для одномерного процесса}$$

$$\text{и } H = 3-D - \text{для двумерного} \quad (6)$$

Поскольку установление D для ФБД весьма проблематично, то проще всего фрактальную размерность определить из (6):

$$D = 2-H \text{ и } D = 3-H \quad (7)$$

Херст [8] установил, что для многих явлений показатель H находится в пределах $0 < H < 1$, а определить его можно по закону:

$$\frac{R}{S} \approx a^H, \quad (8)$$

где $R(a) = E(x)_{max} - E(x)_{min}$ – максимальный размах амплитуд случайного процесса, S – среднеквадратическое отклонение, a – шаг изменения X или расстояние передвижки станка.

Методы определения D дают правильный результат при условии однородности и изотропности явления [10], а при отсутствии таких свойств необходимо ориентироваться на определение локальной размерности.

Приступая к вычислению показателей Херста и соответственно локальных и глобальных фрактальных размерностей ФБД на нашем блоке в двух его состояниях, следует предположить, что вследствие случайного дробления (разупрочнения) первоначальной структуры размерностью D_0 получим ослабленную структуру размерностью D_1 , причем $D_1 > D_0$.

В табл. 2 приведены результаты вычислений показателя Херста, локальных и глобальных фрактальных размерностей блока до и после разупрочнения.

Таблица 2

Результаты определения структурных характеристик блока

Показатель	До взрыва смежного блока					После разупрочнения				
	Ряд скважин				В целом по блоку	Ряд скважин				В целом по блоку
1	2	3	4	1		2	3	4		
R	23	23	21	27	29	21	18	15	19	21
S	7,03	7,84	6,55	7,18	7,77	6,54	5,62	4,84	5,82	5,82
H	0,658	0,601	0,633	0,74	0,74	0,653	0,649	0,631	0,659	0,716
D*	1,342	1,399	1,367	1,26	–	1,347	1,351	1,369	1,341	–
Do(D1)					2,26					2,284

Анализируя данные табл. 2, в частности, показателя Херста и величин размерностей, можно заметить, что показатель Херста всегда больше 0,5. При высоких значениях H выясняются достаточно очевидные отклонения статистики энергоемкости бурения от нормального закона Гаусса. Мандельброт [1] рассматривает три случая: $H = 0,5$, $H < 0,5$ и $H > 0,5$. При $H \neq 0,5$ имеем случай персистентности или антиперсистентности, т.е. процесс обладает памятью, а при $H < 0,5$ – случай персистентности, т.е. сохраняется тенденция. Следовательно, при $H > 0,5$ поддерживается имеющаяся тенденция, это означает, что если приращения были положительными в прошлом, то и впредь в среднем будет происходить увеличение E при произвольных a . Для случая $H < 0,5$ рост в прошлом означает уменьшение в будущем, и наоборот.

Эти выводы подкрепляются [10] исследованием процесса (2) и (3), т.е.

$$[W_H(\Delta E_2) - W_H(\Delta E_1)]^2 \approx |a_2 - a_1|^{2H}, \quad (9)$$

В нашем случае $a = 6$ м, для которого мы получили глобальную фрактальную размерность “поверхности” энергоемкости бурения, равную для блока до и после разупрочнения соответственно 2,26 и 2,284, что полностью совпадает с исследованиями [10], где они установлены для гравитационных волн поверхности моря, равными 2,25 и 2,33.

Определенный интерес вызывает установление связи показателя Херста при его значении, равном 0,5 или близкого к нему и расстоянием между скважинами a . Так как H есть функция от a , то подбором a можно определить H . В нашем случае $H \cong 0,5$ при $a = 16$ м, при этом корреляция (9) между приращениями и шагом передвижки равна 0, а фрактальная размерность D составит 2,5, что характерно для марковского процесса.

Таким образом, доказано наличие тренда и памяти процесса, что дает основание для правомерного экстраполирования прочностных свойств массива при шаге броуновского движения до 6–8 м, а также невозможности таких действий при расстояниях более 16 м.

Установлено также, что эффект разупрочнения характеризуется увеличением фрактальной размерности.

Литература

1. *Mandelbrot B. B.* Fractals: Chance and Dimension. – San Francisco: Freeman, 1977.
2. *Федер У.* Фракталы / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991.
3. *Мандельброт Б.Б.* Самоаффинные фрактальные множества. Фракталы в физике. – М.: Мир, 1988. – С. 9–47.
4. *Paladin. G and Vulpiani. A.* Anomalous Scaling Laws in Multifractal Objects // Phys. Rep. – 1987. – Vol.156. – № 4. – P. 147–225.
5. *Hurst. H.E., Black. R.P. and Simaika. Y.M.*, Long-Term Storage: An Experimental Study. – London: Costable, 1965.
6. *Schertzer. D., and Lovejoy. S.* Hard and Soft Multifractal Processes // Phys. A. – 1992. – Vol.185. – № 4. – P. 187–194.
7. *Тангаев И.А., Додис Я.М., Голопуров А.Г.* Оценка относительной крепости пород по величине удельной энергоемкости шарошечного бурения // Горн. жур. – 1975. – №3. – С. 54–56.
8. *Тангаев И.А., Додис Я.М., Харьковский В.И.* Опыт оперативного регулирования параметров взрывных работ на карьере Саяк-1 // Цветная металлургия. Цветметинформация. – 1975. – 22. – С. 15–18.
9. *Кроневер Р.М.* Фракталы и хаос в динамических системах. – М., 2000.
10. *Потанов А.А.* Фракталы в дистанционном зондировании // Зарубежная радиоэлектроника. – 2000. – № 6. – С. 3–64.