

УДК 622.272.6

**“ДЕФОРМАЦИОННО-ВОЛНОВЫЕ” ПРОЦЕССЫ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД  
ПРИ ДВИЖЕНИИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ**

**Г. Я. Полевщиков**

*Институт угля СО РАН,  
Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

Установлены “деформационно-волновые” особенности геомеханических процессов при движении очистного забоя. Показано, что реакция вмещающего массива может рассматриваться как формирование в континууме иерархии критических элементов геосреды. Последовательность развития соответствует избытку упругой энергии за фронтом снижения вертикальных напряжений. Даны основные параметры физической модели процесса с примерами горно-технологических ситуаций.

*Геомеханика, очистной забой, сдвигание, волнообразность, иерархия структур, упругая энергия*

Как известно, движение очистного забоя обычно приводит к “периодическому” изменению размеров зависающих консолей подрабатываемых слоев пород, участвующих в формировании опорного давления. Формирование консолей сопровождается поднятием слоев пород над пластом впереди зоны максимальных напряжений. Известен принцип гармонического ряда, “волн Вебера”, согласно которому с удалением от разрабатываемого пласта амплитуда “волны” снижается, а ее “период” увеличивается [1]. Натурными исследованиями [2] установлено, что даже в слабых породах (аргиллиты) при глубине залегания отрабатываемого пласта около 100 м и длине очистного забоя 100 м поднятие нижней части кровли достигает 3 см на расстоянии 10–15 м от плоскости забоя. В работе [3] показано, что с ростом прочности пород кровли и глубины разработки влияние этого эффекта возрастает, при этом происходит “топтанье” пласта горным давлением. В [4] аналитически и экспериментально доказано, что распределение горного давления на секции механизированной крепи очистного забоя имеет волнообразный характер.

Традиционно изучение геомеханических процессов при ведении горных работ осуществляется деформационными методами и соответствующими измерительными приборами, устанавливаемыми в скважинах, пробуренных в массив из горных выработок, или с поверхности земли. Плотность расположения измерительных датчиков обычно мала, что затрудняет суждения о динамике геомеханических процессов в массиве объемом в сотни миллионов кубических метров (длина очистного забоя до 300 м, длина выемочного столба до 3 км, глубина залегания до 700 м). Возможность снятия этого ограничения при разработке газоносных угольных месторо-

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке СО РАН (интеграционные проекты № 89 2006-2008 гг., № 61 2010-2011 гг., № 100 2012-2013 гг.).

ждений показана в работе [5]. Сущность такого подхода заключается в использовании имеющейся связи изменений газокинетических характеристик углепородного массива с протекающими в нем геомеханическими процессами. В оценке параметров геомеханических процессов по динамике выделения метана в зону ведения горных работ учитывается, что углеметановое месторождение — массив горных пород — можно моделировать своеобразными пластинами-индикаторами, газовый потенциал которых реализуется соответственно разгрузке от горного давления. Непрерывно действующая электронная система рудничного мониторинга угольной шахты позволяет контролировать аэрогазодинамический процесс по распределенной системе датчиков, имеющих инерционность 10–20 с. Уже первый анализ электронных баз данных этих систем на высокопроизводительном выемочном участке (шахта им. С. М. Кирова, Кузбасс) позволил отметить “волнообразность” изменений метанообильности по длине выемочного столба с периодом, много большим шага обрушения [6].

Расширение базы горно-технологических данных на разрабатываемые участки месторождений с различной стратиграфией и последовательностью отработки угольных пластов в свите (свойства пластов по более 15 000 пластопересечениям геологоразведочными скважинами, горно-технологические данные об отработке 20 выемочных участков и проведении 15 подготовительных выработок, длина очистного забоя до 250 м, длина выемочного столба до 2 км, скорость подвигания забоя до 12 м/сут, глубина отработки пластов до 600 м, их газоносность до 30 м<sup>3</sup>/т) позволило обнаружить, что “волнообразность” можно представить совокупностью вложенных (относительно “оггибающей” внешней кривой) периодических функций, параметры которых кратны двум [7, 8]. Следовательно, массив горных пород в области активного развития геомеханических процессов можно представить в виде совокупности породных слоев, мощности которых равны высотам формирующихся в них сводов сдвижения (рис. 1)\*. Этому же эмпирическому правилу соответствуют параметры синусоидальных функций, которые аппроксимируют контуры верхней половины образующихся сводов сдвижения (**сводов**).

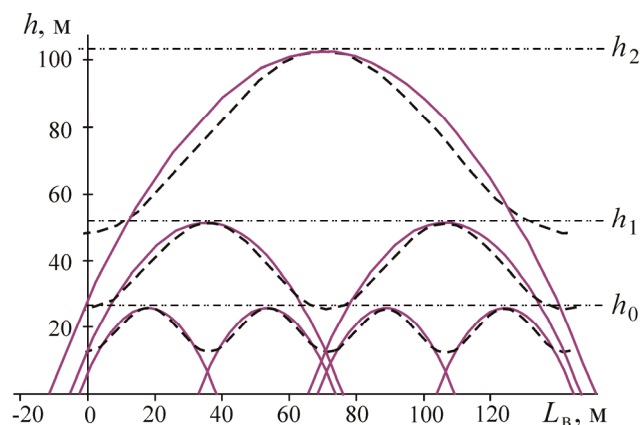


Рис. 1. Вертикальная схема структуризации (самоорганизации) вмещающего массива с формированием “геомеханических слоев”:  $L_b$  — длина выработки;  $h_n$  — мощность “геомеханических слоев” (по “высоте” сводов)

Использование синусоид в качестве аппроксимирующих функций удобно для алгоритмизации этой геомеханической модели процесса при значительной длине создаваемой выработки.

\* Назовем их “геомеханически активными слоями” (или **геомеханическими слоями**).

Аналогичные исследования динамики метанообильности для подготовительных выработок показали [9, 10], что развитие иерархически вложенных структур в приконтурной части выработки происходит канонически [11], в соответствии с масштабным фактором явления зональной дезинтеграции пород  $(\sqrt{2})^n$ , где  $n$  — уровень структурной иерархии.

Для соблюдения единства причинно-следственных связей в газогеохимических процессах как при проведении подготовительных выработок (по радиальной разгрузке), так и при движении длинного очистного забоя (по вертикальной разгрузке) целесообразно иметь единый структурообразующий показатель ( $\Phi = \sqrt{2}$ ): по радиальной разгрузке — выражение  $\Phi^n$ , для вертикальной разгрузки —  $\Phi^{2^n}$ .

Представленные экспериментальные исследования геомеханических процессов методами рудничной аэрогазодинамики являются, в известной мере, косвенными и включают в себя изменение состояния углеметановых пластов с формированием неустойчивых газовых потоков в направлении зоны контроля. По этой причине их дополнили наблюдениями изменений давления в стойках секций механизированной крепи на шахтах Кузбасса “Алардинская” и “Чертинская-Коксовая”. Измерения давления проводили практически ежедневно в ремонтную смену.

Для удобства анализа значения давлений связывались с мощностью слоя пород, вес которого соответствует реакции двухстоечной крепи. Средняя плотность пород кровли принималась равной  $2.5 \text{ т/м}^3$ , что позволило получить значения высоты слоя, нагружающего перекрытия секций крепи:

$$h_{\text{сл}} = (P_{\text{ст},1}S_{\text{ст},1} + P_{\text{ст},2}S_{\text{ст},2}) / \gamma S_{\text{в}},$$

где  $P_{\text{ст},i}$  — давление в гидроцилиндре стойки крепи, МПа;  $S_{\text{ст},i}$  — площадь сечения гидроцилиндра стойки,  $\text{м}^2$ ;  $\gamma$  — удельный вес породы;  $S_{\text{в}}$  — площадь перекрытия секции крепи,  $\text{м}^2$ .

Прежде всего, рассмотрим горно-технологические условия при отработке пласта 3-3а с труднообрушаемой кровлей шахты “Алардинская”. Глубина залегания пласта по длине выемочного столба 520–660 м. Полная мощность до 5.6 м, вынимаемая мощность 4.5 м с оставлением пачки угля у почвы пласта. Угол падения  $14^\circ$ . Длина выемочного столба 1945 м, длина очистного забоя 220 м. Коэффициент крепости угля  $f = 1.5$ .

В кровле пласта залегает углистый алевролит мощностью от 0.4 до 0.95 м средней крепости  $f = 2-3$ . Выше находится слоистый зернистый алевролит мощностью 3.3–20.9 м и крепостью  $f = 6$ . Основная кровля представлена устойчивым крупнозернистым песчаником крепостью  $f = 6-9$ , мощностью от 1.0 до 13.5 м. В почве пласта залегает среднезернистый слоистый алевролит крепостью  $f = 5$ .

Из результатов обработки данных натурных измерений, показанных на рис. 2, видна выраженная периодичность длиной примерно 50 м, что меньше длины забоя в 4 раза. Иерархически вложенные периодичности представлены на рис. 3.

Можно отчетливо видеть параболическую форму свода сдвижений (средняя линия замеренных значений) с длиной основания, близкой длине очистного забоя, и высотой 35 м на интервале подвигания 517–530 м (рис. 3а, минимальное давление) и 43 м на интервале 530–553 м (рис. 3б, повышенное давление). При замерах через 1.8 м (на каждой секции крепи) в средней части забоя замечено небольшое снижение значений, указывающее на присутствие свода периодичности 100 м по линии забоя. При этой плотности замеров проявляется периодичность длиной 12.5 м (см. рис. 3а), а при контроле через 9 м (на каждой 5-й секции крепи) — периодичность длиной 25 м (рис. 3б).

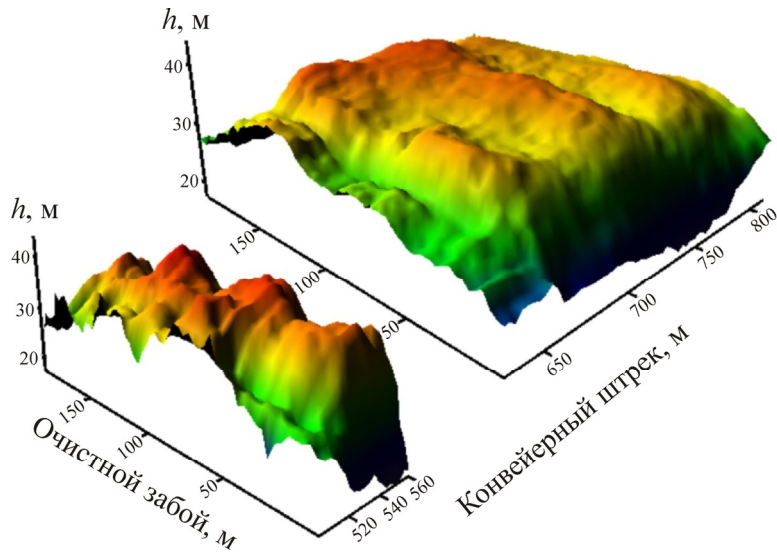


Рис. 2. Периодичность изменения высоты сводов давления на крепь при движении очистного забоя 3-32 шахты “Алардинская”

На втором контрольном интервале горное давление на перекрытия секций крепи возрастает и регистрируются иерархически вложенные своды с периодичностью 50 м.

Таким образом, периодичность изменения высоты сводов давления при движении очистного забоя вполне согласуется с данными, установленными методами рудничной газодинамики [7–10], отражая особенности развития геомеханического процесса с кратностью контролируемых параметров, равной  $\Phi^{2n}$  ( $n$  — целые числа).

За исключением приштрековых зон отклонения кратности замеренных значений относительно параболы основного свода во всех случаях лежат в пределах  $\pm 10\%$ .

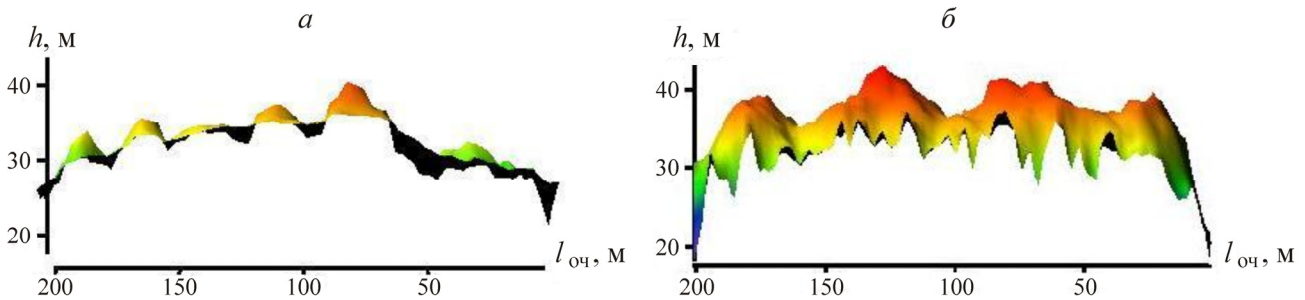


Рис. 3. Своды давления на секции механизированной крепи при отработке пласта 3-3а шахты “Алардинская” с труднообрушаемой кровлей на интервале подвигания 517–530 м (а) и 530–553 м (б);  $l_{оч}$  — длина очистного забоя

Рассмотрим также данные измерений по второму горно-экспериментальному участку на Чертинском месторождении Кузбасса (шахта “Чертинская-Коксовая”).

Длина очистного забоя 180 м, глубина залегания пласта 340 м, мощность 2.8 м. Коэффициент крепости угля  $f = 0.4 - 1.0$ .

Ложная кровля пласта — алевролиты слабые ( $f = 2 - 3$ ),  $m = 0.1 - 0.3$  м. Непосредственная кровля представлена алевролитами мелкозернистыми трещиноватыми, легкообрушающимися ( $f = 4$ ), мощностью до 14 м. Основная кровля пласта — песчаники мелкозернистые слабо-трещиноватые ( $f = 6$ ),  $m = 24 - 30$  м, по длине выемочного столба местами наблюдается выход слоя песчаника непосредственно на пласт.

Замеры давления в стойках механизированной крепи проводились в 30, 60, 75, 90, 105, 120 и 150 м от конвейерного штрека по длине очистного забоя. Как видно из рис. 4, изменения горного давления на крепь также имеют волнообразную форму как по оси обрабатываемого столба, так и по линии очистного забоя. Поскольку расстояния между измерительными секциями крепи составляли 30 м, выявить меньшую периодичность, естественно, не удалось.

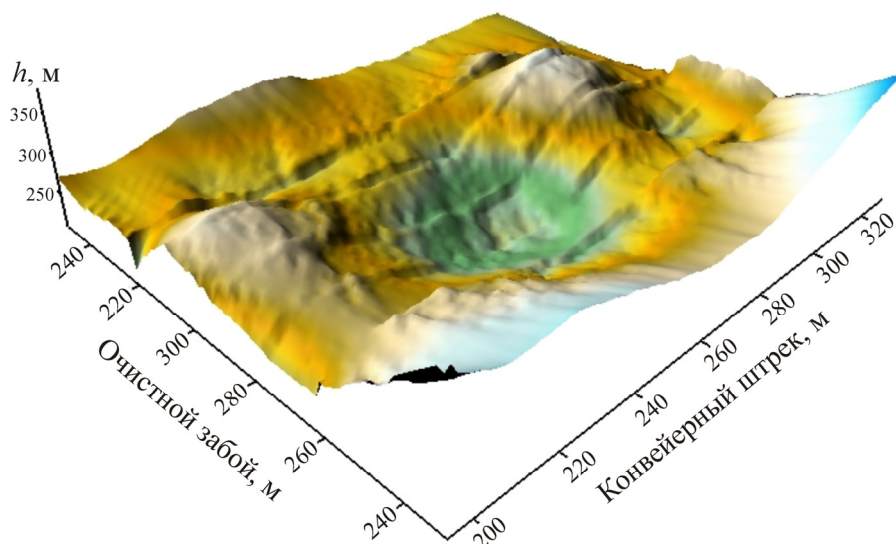


Рис. 4. Изменение давления в стойках механизированной крепи при обработке выемочного столба на Чертинском месторождении Кузбасса

Оценка высот сводов давления по приведенной методике показала, что в данных условиях она примерно в 1.5 раза меньше, чем в условиях с труднообрушаемой кровлей на глубине вдвое большей (рис. 2, 3). Однако период “волнообразных” изменений давлений в стойках также кратен половине длины очистного забоя как по его линии, так и нормально ей.

Логично предположить, что описанная “волнообразность” изменений состояния массива горных пород имеет место и в призабойной зоне пласта. Для такого анализа автором использованы результаты геомеханических измерений в процессе обработки рудных месторождений Норильска [12]. Представив приведенную в указанной работе информацию по изменениям напряженно-деформированного состояния массива в виде средних значений для пятиметровых интервалов (по направлению подвигания забоя) давлений, установлено, что изменения напряжений также носят “волнообразный” характер (рис. 5). С достаточным приближением их распределение может быть аппроксимировано синусоидальными функциями с амплитудами  $A_1 = 12$  МПа,  $A_2 = 13$  МПа и периодами  $T_1 = 36$  м и  $T_2 = 4.5$  м. В данном случае амплитуды распределения напряжений близки, а периоды различаются в 8 раз ( $\Phi^6$ ).

Отметим, что графики осей синусоид соответствуют классической эпюре напряженно-деформированного состояния пласта впереди очистного забоя. Есть выраженные зоны неупругого (0–12 м) и упругого (> 12 м) состояния среды. Причем в неупругой зоне имеем два “элемента” с одинаковыми “волновыми” характеристиками. Отметим, что нередко отклонения экспериментально замеренных напряжений от их классической эпюры относились к погрешности измерений, а в современных моделях самоорганизации геосреды при изменении внешних условий [11] они приобретают принципиальную значимость для описания техногенных геомеханических процессов.

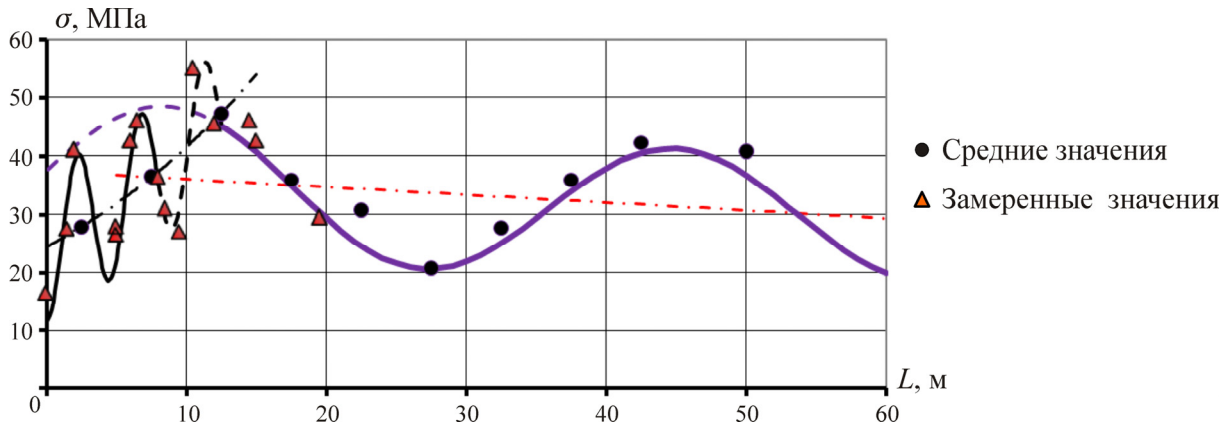


Рис. 5. Зональное распределение опорных нагрузок ( $\sigma$ ) впереди очистного забоя в зависимости от расстояния ( $L$ ) до обнаженной поверхности пласта согласно измерениям по методу фотоупругих датчиков (рудный массив, Норильское месторождение, рудник “Октябрьский” [12])

Например, условие отторжения фрагментов материала при превышении действующего градиента растягивающих напряжений над их допусковым значением минимум в 2 раза известно как для броневых плит [13], так и для образцов угля, насыщенных метаном [14].

Обобщая результаты исследований газогемеханических процессов при движении очистных забоев, можно заключить, что установленные особенности изменения НДС пород, по существу, включают в себя и классические представления об их распределении — как модулирующие. Но повышение разрешающей способности методов измерительного контроля позволяет уточнить эти закономерности, существенно раскрывая практически значимые подробности “деформационно-волновой” природы реакции геосреды на изменяющиеся внешние условия. Это одновременно указывает и на единство причинно-следственных связей в развитии нелинейных геомеханических процессов как при проведении подготовительных выработок, так при движении длинного очистного забоя. В основу описания такого единства, как показывают эксперименты, может быть положен “принцип” удвоения величины упругой энергии на последовательных уровнях техногенно обусловленной структуризации изначально однородного изотропного породного массива в окрестности прямоугольных вырезов. Это позволяет представить изучаемый геомеханический процесс следующей физической моделью.

Модель учитывает условия:

- поверхность обнажения массива формируется технологически в результате ведения горных работ;
- механические и газокинетические свойства и напряженное состояние массива впереди фронта его геомеханической реакции на техногенные возмущения остаются неизменными;
- активизация газовой компоненты пластов (распад углекислотного геоматериала с повышением давления свободного газа и формированием фильтрационных потоков) начинается за фронтом упругого восстановления пород при снижении напряжений;
- породный массив снижает свой упругий потенциал (уровень накопленной упругой энергии) путем “отторжения” некоторых критических по энергоемкости образований структурных элементов, высота которых определяет мощность соответствующих “геомеханических слоев” (см. рис. 1);
- минимальные затраты накопленной упругой энергии на разрушение “геомеханического слоя” соответствуют его делению на две части по наибольшей длине на (технологически) обнаженной поверхности;

— минимальные затраты упругой энергии на формирование в “геомеханических слоях” этих критических структурных элементов при вертикальной разгрузке объемно-напряженного массива соответствуют оконтуриванию тел параболоидной формы;

— упругий энергетический потенциал породного массива, необходимый для его канонической самоорганизации (структуризации), может быть обеспечен только за счет изменения мощностей “геомеханических слоев” (высот параболоидов), так как площадь обнажения массива ограничена технологически создаваемым прямоугольным вырезом;

— влияние свойств “геомеханических слоев” существенно нивелирует деформационно-прочностные особенности текстурных (составных) элементов, согласуя их индивидуальные реакции на снижение напряжений.

Обсуждаемые характеристики модели (рис. 6 и рис. 7) представлены параметрически:

- доминирующим в развитии процесса в приконтурной области массива является слой мощностью  $h_d = l/2$ , где  $l$  — ширина выреза;

- в пределах доминирующего слоя формируется свод-параболоид с диаметром основания за приконтурной областью  $D_d = l\sqrt{2}$ ;

- мощности иерархически вложенных слоев (высот параболоидов) определяются фрактальной размерностью  $\Phi = \sqrt{2}$  для потенциалов их упругой энергии;

- диаметры оснований сводов  $D_n = D_0 / \Phi^{2n}$ , где  $n$  — уровень структурной иерархии;

- в каждом своде  $n$ -го уровня содержатся четыре свода  $n-1$ -го уровня ( $S_i / 4S_{i-1} = 1$ ;  $\mathcal{E}_i / 4\mathcal{E}_{i-1} = 2$ , где  $S$  — площадь боковой поверхности параболоида;  $\mathcal{E}$  — упругая энергия в слое);

- формирование свода  $n$ -го иерархического уровня возможно только после подработки зоны дезинтеграции между двумя вложенными сводами уровня  $n - 1$ ;

- верхние половины вертикальных сечений сводов в каждом “геомеханическом слое” можно аппроксимировать синусоидами, отображающими положение фронта разгрузки;

- оси зон максимальной дезинтеграции пород (“лепестки” на рис.6) выделяют квадраты со сторонами  $l_n = l_{оч} / \Phi^n$  (контролируемый размер структурных элементов);

- средняя ширина “лепестков” относительно стороны квадрата равна 0.1 (по эмпирическим данным В.Н. Опарина 0.05 – 0.11) [12];

- в решениях горно-технологических задач в качестве базового размера для критического элемента “геомеханического слоя” начального иерархического уровня  $n = 0$  принимается  $1/8$  свода первичного обрушения основной кровли.

Адекватность этой модели подтверждается не только приведенными результатами ширококомасштабных горно-экспериментальных исследований относительно плавного развития реальных техногенно обусловленных геомеханических процессов, но и местоположениями горных ударов. Рассмотрение этих горно-технологических ситуаций выполнено в условиях отработки пласта 3-За шахты “Алардинская” с труднообрушаемой кровлей (см. рис. 2, 3). В дополнение к приведенной информации об этом объекте контроля отметим, что очистной забой, в котором велись измерения давления в секциях механизированной крепи, отрабатывал второй выемочный столб с межлавым целиком шириной 35 – 40 м на рассматриваемом интервале отработки (0 – 600 м). Первичный шаг обрушения основной кровли составил около 100 м. На рис. 6 и 7 представлены используемые технологические схемы горных работ с нанесением контуров оснований выделенной иерархии сводов-параболоидов по описанной модели. Здесь же отмечены места динамических разрушений вентиляционного штрека при движении лавы № 2.

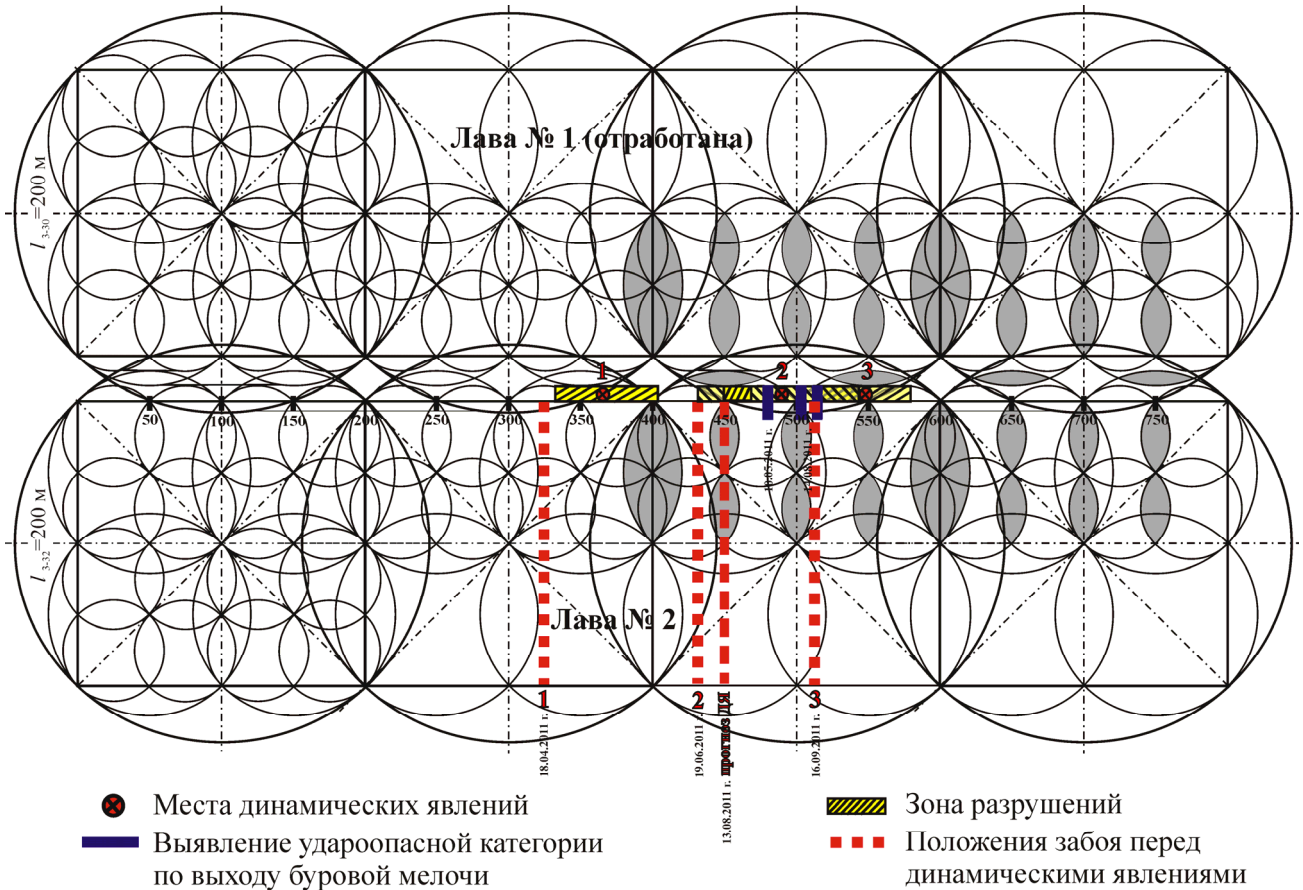


Рис. 6. Горизонтальная схема техногенной структуризации вмещающего массива горных пород

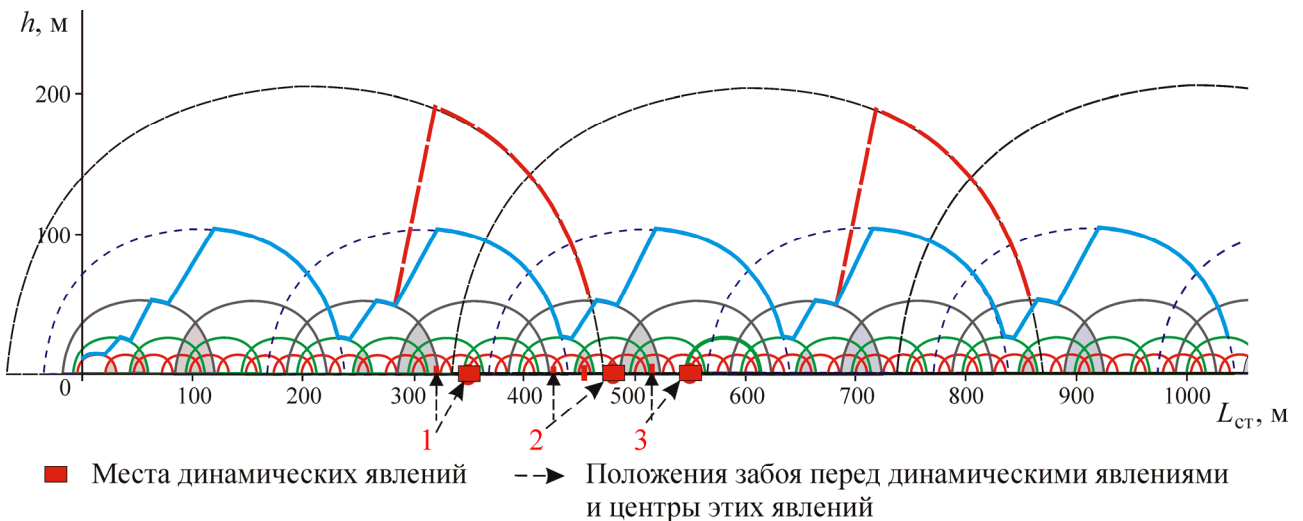


Рис. 7. Вертикальная схема развития геомеханического процесса в подрабатываемом массиве при движении очистного забоя

Предупредительные признаки динамической опасности технологическая служба шахты выявила при отходе очистного забоя от монтажной камеры на 250 м. Было принято решение бурить в борта штрека на глубину 20–30 м разгрузочные скважины диаметром 130 мм с расстоянием между скважинами 1 м. Однако в условиях кластеризации (интеграции) сводов сбли-



женных лав на интервале 275–325 м подрезки опор сводов (“лепестки”) этих профилактических мер оказалось недостаточно, поскольку произошло динамическое разрушение бортов и почвы вентиляционного штрека на расстоянии 110 м. Два последующих динамических явления и установленные текущим контролем опасные зоны также соответствовали интервалам кластеризации подобных структурных элементов массива, но более низкого иерархического уровня, и имели существенно меньшую протяженность разрушения выработки.

Динамические явления в массиве прекратились после увеличения диаметра разгрузочных скважин до 250 мм, сокращения ширины межлавного целика до 26 м и рыхления почвы штрека взрывными работами. С позиций явления зональной дезинтеграции массива эти технологические решения обусловили достаточный рост размеров области неупругого состояния — “защитного пояса”.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Обобщая результаты крупномасштабных горно-экспериментальных работ на угольных шахтах Кузбасса, можно отметить следующее.

1. В прочных породах и (или) при относительно малой ширине выработки пределом развития процесса дезинтеграции вмещающего массива при реализации его упругой энергии за фронтом снижения вертикальных напряжений является основной свод, определяемый шириной выработки (длиной очистного забоя). В случаях, когда прочностные свойства иерархически вложенных “геомеханических слоев” пород у контура выработки оказываются ниже опорного давления основного свода, в подрабатываемом массиве зонально-дезинтеграционный процесс может продолжиться. В подобных условиях деформации вложенных слоев в направлении выработанного пространства у его контура приводят к росту угла полных сдвижений массива вплоть до граничного (более 90°) и формированию “воронки”, если длина выреза равна его ширине (квадрат). Если длина выработки больше ее ширины в 2 раза и более, то формирование “геомеханических слоев” более высоких иерархических уровней возможно путем интеграции пар последовательных “квадратов” (рис. 6) с образованием мульды сдвижений дневной поверхности.

Таким образом, согласно данной модели, **геосреда, стремясь к новому устойчивому состоянию в техногенно изменяющихся условиях, снижает свою потенциальную упругую энергию путем формирования поверхности тел “отторжения” определенного породного объема.**

Этому соответствуют и результаты прямой оценки влияния упругой энергии породного массива на угол полных сдвижений [15].

2. Применение предложенной модели в инженерных решениях требует знания конкретных используемых в ней характеристик “**критического элемента геосреды**”. С этой целью в качестве “опорной величины” можно принять шаг первичного обрушения основной кровли пласта, который является технологически значимым показателем и, как правило, фиксируется для каждого очистного забоя. Его определение (оценка) для угольных шахт Кузбасса представлена с учетом применения соответствующих методик [16, 17]. В них содержится интересная информация, касающаяся отношения первичного шага обрушения к вторичным шагам. Оно, по данным [17], оказалось близким к 5. Это отвечает одному из представителей канонического ряда 2<sup>n</sup>. Расхождение величин  $\sqrt{4}$  и  $\sqrt{5}$  составляет 12 %, причем в большую сторону. В эмпирически построенных функциях [17] также находит свое отражение влияние и взаимодействие сводов сдвижения соседних лав при отработке длинных угольных столбов с межлавными целика-

ми недостаточной несущей способности. Это влияние всегда сказывается в большую сторону. Шаги обрушения интегрально отражают влияние напряжений в породах, их механические характеристики, длину очистного забоя (ширина выреза) и скорость его подвигания. При этом, согласно рассматриваемой физической модели, шаг обрушения связан с размером формируемого упругой энергией структурного параметра в соответствующем “геомеханическом” слое (расстояние между осями “лепестков” на рис. 6). Тогда принимаем в качестве контролируемого по направлению движения забоя размера *минимального критического элемента геосреды* ( $l_{кр}$ ) половину вторичных шагов обрушения или 1/8 первичного шага ( $l_0$ ). Пренебрегая деталями изменения упругой энергии в пределах слоя первичного обрушения пород, критические мощности геомеханических слоев определяются по формуле

$$h_0 = 0.5l_0 \operatorname{tg} \psi_0; \quad h_{кр} = h_0 / \Phi^{2n},$$

где  $h_0$  — мощность слоя первичного обрушения пород, м;  $h_{кр}$  — мощность слоя минимальных критических элементов геосреды, м;  $\psi_0$  — угол полных сдвижений пород основной кровли, град.

3. При мощности “геомеханических слоев” большей  $h_0$ , необходимо учитывать реальное изменение упругой энергии с глубиной их залегания. Для условий вертикальной разгрузки, согласно принятой модели,  $\mathcal{E}_n = 2\mathcal{E}_{n-1}$ , где  $\mathcal{E}$  — упругая энергия в “геомеханических слоях” соответствующих иерархических уровней. В этих условиях имеем

$$h_n = H_p - \sqrt[3]{H_p^3 - 6 \frac{E_n \Phi^{2n} \mathcal{E}_0}{k^2 S_n}},$$

где  $h_n$  — мощность “геомеханического слоя”, м;  $H_p$  — глубина залегания обрабатываемого пласта, м;  $E_n$  — средневзвешенный модуль упругости горных пород в рассматриваемом слое, МПа;  $k = 0.025$  — коэффициент плотности пород, МПа/м;  $S_n$  — площадь основания, м<sup>2</sup>.

Численный расчет с использованием данной формулы показал, что в диапазоне глубин подземной разработки до 1500 м это выражение дает тангенсы для углов 45–65°.

Горной практикой установлено [18]: величина угла полных сдвижений подрабатываемого массива горных пород непосредственно над пластом составляет  $\psi_0 = 45^\circ$ ; при построении сводов сдвижений подрабатываемого массива угол полных сдвижений в пределах средних глубин (~ 400 м, Кузбасс) горных работ принимается равным 50°, а при больших глубинах (~ 800 м, Донбасс) 60°.

Из сравнения этого результата с предварительными построениями иерархии сводов (см. рис. 1) и следствиями их формирования (рис. 2–4 и рис. 6–7) видна значимость уточненных параметров описываемого геомеханического процесса путем введения поправок на изменение реального упругого энергетического потенциала геосреды с ростом глубины ведения горных работ.

Аналогичные процессы происходят и в надрабатываемом массиве, но нелинейность изменений упругой энергии пород здесь приводит к снижению высоты сводов, что легко увидеть при преобразовании приведенной формулы. Следовательно, для повышения надежности расчетов параметров газогеохимических процессов при ведении горных работ необходимо учитывать особенности упругой реакции массива в целом, включая и обрабатываемый пласт. На этом этапе процесса закладываются многие критические значения закономерностей классической геомеханики. Возможно, установленные подобие и каноническая иерархия структур будут востребованы и для математического моделирования процессов методом критических элементов в геомеханике.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Weber H.** Der Gebirgsdruck als Ursache für das Auftreten von Schlagwettern, Blasen, Gasausbrüchen und Gebirgsschlagen, Gluckauf, 1916, Bd 49.
2. **Канлыбаева Ж. М.** Закономерности сдвижения горных пород в массиве. — М.: Наука, 1968.
3. **Черняк И. Л., Зайденварг В. Е.** Периодичность изменения напряженно-деформированного состояния массивов угля и пород впереди очистного забоя // Изв. вузов. Горн. журн. — 1993. — № 3.
4. **Якоби О.** Практика управления горным давлением: пер. с нем. — М.: Недра, 1987.
5. **Полевщиков Г. Я., Назаров Н. Ю.** Влияние сдвижений прочных вмещающих пород на динамику метанообильности выемочного участка // ГИАБ. — 2001. — № 5.
6. **Полевщиков Г. Я., Козырева Е. Н.** Газокинетический паттерн разрабатываемого массива горных пород // ГИАБ. — 2002. — № 11.
7. **Полевщиков Г. Я., Козырева Е. Н., Шинкевич М. В.** Влияние периодичности процессов сдвижений пород на динамику метанообильности выемочного участка / Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: материалы XVIII Междунар. науч. шк. им. акад. С. А. Христиановича. — Симферополь: ТНУ, 2008.
8. **Полевщиков Г. Я.** Волновые геомеханические процессы в динамике метанообильности выемочного участка / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. науч. конф. с участием иностр. ученых (6 – 10 июля 2009, Новосибирск). — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010.
9. **Полевщиков Г. Я., Плаксин М. С.** Газогеомеханические процессы при проведении подготовительных выработок // Вестн. науч. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. Кемерово. — 2010. — № 2.
10. **Полевщиков Г. Я., Плаксин М. С.** Газодинамические следствия зональной дезинтеграции массива при проведении подготовительной выработки // Вестн. КГТУ. — 2011. — № 5.
11. **Опарин В. Н., Танайно А. С.** Каноническая шкала иерархических представлений в горном породоведении. — Новосибирск: Наука, 2011.
12. **Курленя М. В., Опарин В. Н.** Проблемы нелинейной геомеханики. Ч. I // ФТПРПИ. — 1999. — № 3.
13. **Ионов В. Н., Огибалов П. М.** Напряжение в телах при импульсивном нагружении. — М.: Высш. шк., 1975.
14. **Полевщиков, Г. Я.** Динамические газопроявления при проведении подготовительных и вскрывающих выработок в угольных шахтах. — Кемерово: ИУУ СО РАН, 2003.
15. **Полевщиков Г. Я., Шинкевич М. В., Леонтьева Е. В., Черепов А. А.** Фрактальная особенность структуризации массива горных пород в изменениях давления на призабойную часть угольного пласта отрабатываемого длинным очистным забоем // Вестн. науч. центра по безопасности работ в угольной пром-ти. — Кемерово. — 2012. — № 3.
16. **Галанин А. Ф., Шинкевич М. В.** Зависимость параметров первичной посадки основной кровли в механизированных лавах от структуры пород / Вопросы безопасности труда: сб. науч. тр. КузГТУ. — Кемерово, 2004.
17. **Временное руководство** по расчету первичного и последующего шагов обрушения пород кровли при разработке угольных пластов длинными столбами по простиранию в условиях Кузбасса. — Кемерово: ВостНИИ, 1973.
18. **Правила** охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ на угольных месторождениях. — СПб., 1998.

*Поступила в редакцию 14/III 2013*