

Т.А. Паламарчук, д-р техн. наук,
С.И. Скипочка, д-р техн. наук,
Б.М. Усаченко, д-р техн. наук, проф.,
А.А. Яланский, д-р техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

**КЛАСТЕРНО-ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ В МАССИВЕ
ГОРНЫХ ПОРОД КАК ОДНА ИЗ ФОРМ САМООРГАНИЗАЦИИ
ПОРОДНОГО МАССИВА**

Різні рівні кластерно-ієрархічних структур розглянуто як результат процесів самоорганізації масивів гірських порід.

**CLUSTER-HIERATIC STRUCTURES IN THE ARRAY
OF MOUNTAIN BREEDS AS ONE OF FORMS OF
SAMOORGANIZATSIИ OF PEDIGREE ARRAY**

Different levels of cluster-hieratic structures are considered as a result of processes of self-organizftion of rock's.

В механике горных пород важную роль играют понятия подобия механических явлений, самоподобия процессов деформирования и разрушения, масштабный фактор прочности пород, которые достаточно подробно рассматриваются в литературе в своем историческом развитии как составная часть приложения фрактальных представлений в науке о геоматериалах. Дискретные и самоподобные структуры характерны также в целом для геологических систем и объектов. Наблюдающиеся преимущественные размеры блоков, разломов и отдельностей земной коры подчиняются своим закономерностям подобия с устойчивыми коэффициентами пропорциональности, что может быть интерпретировано только с позиций фрактальных представлений.

Фундаментальным свойством геоматериалов является их неоднородность. Горные породы и породные массивы сложены из блоков и отдельностей с различными физико-механическими свойствами, представляют структурно-несвязную среду, разбитую системой стохастически или упорядоченно распределенных трещин. Весьма часто встречаются ситуации, когда объекты природных исследований содержит границы раздела, на которых существенно меняются как свойства геоматериала, так и напряженное состояние, поэтому методы усреднения для данных объемов становятся нерациональными. Применимость методов анализа структурно-неоднородных сред также сильно ограничена из-за того, что дискретность геоматериалов проявляется на любых масштабных уровнях рассмотрения, что вносит недопустимые ошибки в расчеты деформаций или напряжений. Важной особенностью иєрархичности дискретного и блочного строения геологических сред является их автомодельность (самоподобие), что позволяет сопоставлять между собой разнородные свойства и процессы, находить методы их моделирования при переходе с одного масштабного уровня на другой [1].

Необходимо особо подчеркнуть, что горные породы – это изначально неод-

нородная среда как по структуре, текстуре, составу, так и физико-механическим свойствам. Степень неоднородности разделяют на четыре группы: 1) неоднородности крупного масштаба, включающие фациальную изменчивость, тектонические разрывы, зоны выветривания и разгрузки, техногенную неоднородность; 2) неоднородности структуры и состава пород в пределах отдельной пачки, слоя, включая трещиноватость, наличие мелких тектонических дислокаций; 3) неоднородность состава пород в пределах элементарного объема (образца), различие в химическом и минеральном составе, форме и размерах зерен, микротрещин; 4) неоднородности реальных кристаллов, дефектность кристаллической решетки, дислокации [2].

Фрактальные (клеточные) размерности горных пород и породных массивов изменяются в широких пределах и имеют весьма высокие значения как при площадных (1,5-1,9), так и при объемных измерениях размерности поверхности пор методами молекулярной адсорбции или электронной эмиссии (2,6-2,9), что подтверждает как их высокую неоднородность, так и пористость [3], табл. 1. Фрактальность среды, в особенности изначально структурированной, имеющей свою кристаллическую структуру, пористость, микрослоистость, микротрещиноватость и так далее и подверженной динамическим воздействиям, играет весьма существенную роль в механике накопления повреждений, определяет эволюцию развития ансамбля дефектов различного масштабного уровня. Для демонстрации процесса разрушения прочностных связей наиболее наглядным аппаратом является фрактальное «дерево» Кейли [1,4].

Таблица 1 – Фрактальные размерности некоторых горных пород и поверхностей

Тип	Порода	Фрактальная размерность
Объемная фрактальность структуры	Гранит (штат Невада)	2,88
	Доломиты Бельвью (штат Огайо)	2,91
	Почва (каолинит со следами галлуазита)	2,92
	Почва (полевошпатовый кварц и доломит)	2,29
	Бурый уголь	2,56
	Доломит из Вудвилля (штат Огайо)	2,58
	Исланский шпат (Мексика)	2,16
Поверхностная фрактальность структуры	Поверхность взлетной полосы	1,5
	Поверхность почвы (содержание камней)	1,1-1,8
	Поверхность почвы (содержание песка)	1,6-1,8
	Тектонические нарушения Горловской зоны	1,33

Самоподобные структуры возникают вследствие протекания гравитационных, термомеханических, тектонофизических, геофильтрационных и механических процессов в массивах горных пород, в результате которых возникают иерархии неоднородностей, изменчивости строения, трещиноватости и блочности геологических материалов на различных масштабных уровнях. В зависимости от интенсивности воздействия напряжений на самоподобные по структуре материалы проявляется избирательный механизм включения в работу соответствующих неоднородностей и дефектов [1,5,6].

Описание в геологии и геофизике геомеханической системы в целом с по-

мощью усложненных модельных представлений (накопления повреждений, кинетики структурных изменений и др.) не учитывает топологии разрушенной области, обусловленной распределением параметров системы различного масштабного уровня. Поэтому объединение классических постановок задач для материалов с развитой дефектной структурой и фрактальных подходов позволит учесть многоуровневый и масштабный характер деформирования и разрушения элементарных связей.

Со структурной неоднородностью геологических систем непосредственно связаны и такие механические процессы, происходящие в недрах Земли, как землетрясения, которые проявляют характерные свойства иерархической самоподобной системы в распределенности их по пространству и энергии. Одним из методов, пригодных для изучения подобных явлений и процессов, являются синергетический подход и фрактальный анализ [1].

В работе [7] отмечается, что горный массив может находиться, аналогично твердому, жидкому и газообразному, в трех псевдоагрегатных состояниях: 1) техногенно ненарушенный массив; 2) разупрочненный массив; 3) газугольный (газо-породный) поток. Фазовые переходы, разупрочнение и разрушение одновременно протекают (происходят) в краевой части горной выработки (скважины) и краевой части трещины, растущей из этой выработки [5].

Углеводородное топливо в природе также существует в трех псевдоагрегатных состояниях: 1) газообразном (газовые месторождения); 2) жидком (нефтяные месторождения) и 3) твердом (угольные месторождения) и их комбинациях. "Диссипативная структура" – это агрегатное состояние агрегатного вещества. Например, жидкость, как агрегатное состояние, при подогреве расчленяется (дробится) на ячейки Бенара. По аналогии с разупрочненным массивом (псевдожидкостью) эта ячеистая структура имеет вторичные свойства жидкости и может быть названа "разупрочненная жидкость". А это уже псевдоагрегатное состояние жидкости, которая, в свою очередь, уже является агрегатным состоянием [7].

Разобраться в полной иерархии состояний вещества и переходов между этими состояниями можно, например, используя теорию фрактальных множеств и теорию катастроф Р. Тома [5,7]. Агрегатных состояний вещества должно быть не три, как это принято считать, а столько, сколько элементарных катастроф по Р. Тома для четырехмерного пространства, т.е. семь.

Техногенные трещины в краевой части массива, интерпретируемые как диссипативные структуры, наблюдаются не перед вторым псевдофазовым переходом "разупрочненный массив – газугольнопородный поток", как под действием температуры (ячейки Бенара наблюдаются в жидкости перед ее вскипанием, т.е. вторым фазовым переходом), а перед первым переходом "ненарушенный массив – разупрочненный массив".

При синергетическом подходе представляется очевидным, что фазовые переходы под действием тепловой и механической энергии, а также энергии любовью природы, агрегатные состояния и агрегатные состояния этих состояний (диссипативные структуры) имеют фрактальную иерархию, т.е. стационарные

масштабные уровни своего существования.

Фазовые состояния – это типичная задача синергетики. Основное противоречие, которое стремится разрешить синергетика, задается оппозицией порядка – хаосом. В греческой мифологии "хаос" означало первобытное состояние мира, из которого образовался космос – мыслимый как упорядоченное единство. В современном массовом представлении хаос – беспорядочное, бесформенное, неопределенное состояние вещей, так что антитезой хаосу обычно является порядок, причем хаос – это бесструктурность, неустойчивость, стихийность; порядок – это структурность, устойчивость, организованность. Отчетливо напрашивается вывод, что хаос – это плохо, а порядок – это хорошо.

Абсолютный порядок и абсолютный беспорядок одинаково грозят гибелью. Выходит, что при всем стремлении к упорядочению какая-то доля хаоса для жизни необходима. И синергетика как раз раскрывает, восстанавливает эту позитивную роль хаоса.

Фрактальный подход позволяет с других позиций интерпретировать масштабный эффект прочности в горных породах, причина которого связана с механизмом разрушения, структурно-масштабными характеристиками материала и геометрией дефектных множеств. Было обнаружено, что коэффициент неоднородности материала непосредственно связан с вероятностными характеристиками дефектного множества и определяется его фрактальной размерностью [1, 8].

Использование фрактальных идей оказывается перспективным при компьютерном моделировании роста трещин раскола в горных породах. Было установлено, что анизотропия процессов образования и диффузии элементарных дефектов структуры приводит к уменьшению фрактальной размерности образующейся двумерной трещины. Такой подход позволяет объяснить ряд механических эффектов, наблюдающихся при испытании образцов горных пород при сжатии: самоорганизация возникающих трещин, спонтанное увеличение акустической эмиссии, пространственная и временная кластеризация дефектов, а также образование фрактальной структуры трещин. Дело в том, что процессы самоорганизации неупорядоченных систем характерны не только для физики нелинейных процессов и явлений, но и для структурных геомеханических систем, для описания которых используются дифференциальные уравнения Фоккера-Планка [1].

Тектонические процессы, в частности землетрясения, подготавливаются и протекают в многократно структурированной среде земной коры. Происходящие при этом явления разрушения больших масс горных пород связаны с перестройкой структуры на различных масштабных уровнях. Поэтому необходимо изучение закономерностей последовательного формирования иерархии структур в горных породах, подвергаемых различным, в первую очередь, механическим воздействиям [1]. Наблюдаемые признаки подобия подготовки разрушения и структур разрушения в различных масштабах приводят к заключению, что на разных ступенях иерархии структур горных пород в общих чертах эти закономерности остаются одинаковыми.

Одно из возможных направлений развития иерархии структур – формирование ее снизу вверх, так что каждая из структур, имеющих относительно большие элементарные представительные ячейки, образуется в результате активности значительно меньших. Процесс, приводящий к таким последствиям, известен: это локализация реакции среды на внешнее воздействие. Условия локализации, например, деформации в континуальных средах, обсуждаются в ряде работ [9 и др.] Локализация процессов разрушения может быть прослежена в рамках дискретных моделей сред, в которых оказываются существенными локальные взаимодействия элементов и конечность размеров элементарных ячеек среды.

Существование структур и текстур наименьшего масштаба (низшего ранга), развившихся в процессе генезиса горных пород (пористость, слоистость и т.п.), а также связь их параметров с предельными нагрузками при разрушении [10] свидетельствуют о том, что зарождение структур разрушения, по крайней мере на первых ступенях иерархии, происходит в результате активности элементов этих базовых структур.

Зарождение структуры на каждом из уровней начинается в характерной элементарной ячейке среды. Влияние этой ячейки затем распространяется на другие такие же ячейки в виде локального возмущения. Поэтому многие особенности процесса развития структуры можно проанализировать, рассматривая эволюцию изолированного элемента и его взаимодействие с соседними элементами, инициирующее их активность. При анализе развития структур разрушения элементарными ячейками служат объемы среды, содержащие поры, трещины или другие концентраторы напряжений. Их трансформацию можно проследить, анализируя поля напряжений, возмущенные присутствием элемента структуры. Для линейных сред их можно получить, используя, например, решения соответствующих задач теории упругости. Заметим, что анализ полей, создаваемых системой одиночных образований, в полном виде может быть выполнен лишь при моделировании на ЭВМ. При изучении процесса зарождения структуры в системе, содержащей большое число элементарных ячеек, недостаточно пользоваться описанием этой системы с помощью эффективных характеристик, как это можно делать при рассмотрении деформирования среды в целом (см., например, [11]). При формировании структуры некоторого масштаба определяющим является локальное поле, возникающее в окрестности элементарной ячейки среды этого масштаба и масштаба, соответствующего структуре предшествующего ранга.

Реальный массив горных пород имеет сложное строение, обусловленное его структурными и текстурными особенностями, сформулированными в результате геологических и тектонических процессов [12]. Минеральное строение горного массива обладает существенной анизотропией физико-механических свойств, которая проявляется в его текстуре. Внутри и на границе структурных элементов силы связи существенно отличаются, что проявляется в ассоциировании (объединении) их в целостный элемент (кластер). Вследствие этого в массиве всегда существует иерархически упорядоченная структура вложенных

кластеров, связь между которыми обусловлена не только силами, связывающими элементы внутри кластера, но и силами, действующими на контактах его с другими кластерами. Согласно современным данным геологии и геомеханики системно можно представить иерархическую структуру массива горных пород с учетом масштабного фактора влияющих подземных горных выработок, размер которых обычно не превышает десятков метров (табл. 2).

В основе, на самом нижнем структурном уровне – наноуровне частицы (атомы и ионы) под действием электрических сил формируют не только широко известные кристаллические и аморфные вещества, но также и такие мало изученные, как фуллереноподобные наноболочки [13].

Однако в современной геомеханике рассматриваются только кристаллические и аморфные вещества, слагающие кластеры различных уровней. Кластеры 1-го уровня – это кристаллы или их части, образованные в результате нарушения порядка расположения элементов дислокации, а также частицы аморфного вещества, сопоставимые по размерам с кластерами 1-го порядка, которые размещаются в пространстве между кристаллами – зернами в кластерах-ассоциатах 2-го уровня. Ассоциаты кластеров 1-го уровня образуют кластеры 2-го уровня. Очевидно, что силы связи между кластерами в ассоциате существенно слабее, чем внутри кластеров, что является необходимым условием устойчивости внутренней структуры ассоциатов, а также возможности перераспределения внешних силовых воздействий (перколяции сил) по структурным взаимодействиям внутри. Аналогичным образом формируются все вышележащие структурные уровни массива горных пород.

Согласно теории упругости в массиве горных пород вокруг выработки происходит перераспределение напряжений. Кроме изменения абсолютных величин напряжений, в каждой точке массива по сравнению с исходным состоянием существенно изменяется их ориентация вблизи выработки. Траектории главных напряжений в реальном массиве на каждом масштабном структурном уровне представляют собой перколяционный кластер передачи сил.

Исходное напряженное состояние характеризуется ортогональным семейством прямых линий главных напряжений, а новое напряженное состояние, сформировавшееся после проведения выработки, характеризуется семейством кривых. Известно, что единственной фундаментальной силой, которая интегрирует вещество, является сила электрического взаимодействия. Эта сила на наноуровне вещества формирует не только широко известные кристаллические упаковки кубического или гексагонального типа, но и замкнутые оболочки – фуллерены.

Проведем исследования физико-механических свойств образцов горных пород (кластерно-иерархический уровень 1 соответствует микромасштабному уровню, см. табл. 2). Определение физико-механических свойств горных пород – важный раздел высокоэффективного геомеханического мониторинга, который постоянно развивается как в научном, так и технологическом направлениях. С помощью серийной ультразвуковой аппаратуры УК-10ПМС, разработанной с участием ИГТМ НАН Украины [5], выполнены лабораторные исследова-

ния на гипсовых образцах Артемовского месторождения и кернах горных пород Западного и Центрального районов Донбасса.

Таблица 2 – Иерархические уровни вложенных кластерных структур массива горных пород

Масштаб уровня	Порядок величин, м	Характеристика взаимодействий	Характеристика структуры уровня
Мега	> 10	Упругопластическое взаимодействие элементов литосферы	Кластеры 10 уровня, ассоциаты кластеров от 9 до 1 уровня
Макро	1	Упругопластическое взаимодействие макроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 9 уровня, ассоциаты кластеров от 8 до 1 уровня
Субмакро	10^{-1}	Упругопластическое взаимодействие субмакроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 8 уровня, ассоциаты кластеров от 7 до 1 уровня
Микро	10^{-2}	Упругопластическое взаимодействие микроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 7 уровня, ассоциаты кластеров от 6 до 1 уровня
Субмикро	10^{-3}	Упругопластическое взаимодействие субмикроотдельностей массива с формированием зон упругого и пластического деформирования материала	Кластеры 6 уровня, ассоциаты кластеров от 5 до 1 уровня
	10^{-4}	Взаимодействие ассоциатов кластеров (зерен, кристаллов) с формированием зон вязкопластического течения	Кластеры 5 уровня, ассоциаты кластеров от 4 до 1 уровня
	10^{-5}	Взаимодействие ассоциатов кластеров (зерен, кристаллов) с образованием собственных однородных включений фазово-пустотное	Кластеры 4 уровня, ассоциаты кластеров от 3 до 1 уровня
	10^{-6}	Взаимодействие ассоциатов кластеров (зерен, кристаллов) с формированием площадок скольжения	Кластеры 3 уровня, ассоциаты кластеров от 2 до 1 уровня
	10^{-7}	Субзерновое граничное взаимодействие кластеров (зерен, кристаллов)	Кластеры 2 уровня, ассоциаты кластеров 1 уровня
	10^{-8}	Дислокационное взаимодействие кластеров в решетках	Кластеры 1 уровня, образованные нарушением порядка в решетках
Нано	10^{-9}	Ионно-электронное взаимодействие атомов и ионов	Кластеры 1 уровня – кристаллы и фуллереноподобные оболочки
	$< 10^{-9}$	Полевые взаимодействия частиц	Структуры, формирующиеся по законам квантовой механики

Так, на образцах гипса различных длин измерялись времена распространения продольных и поперечных волн. Испытания проводились следующим образом. Отбирались керны гипса длиной 0,60-0,80 м, а затем последовательно отпиливались части образцов по 0,15 м и по методике ультразвукового контроля кернов с неотработанными торцами измерялись времена распространения в них продольных и поперечных волн. С этой целью излучатель и приемник размещались так, чтобы оси их симметрии располагались в плоскости, проходящей через ось керна или в непосредственной близости от образующей, а точка приема – на образующей у противоположного торца [2,5]. При таком расположении образец прозвучивается на наибольшей базе, расстояние между излучателем и приемником по поверхности керна приближается к максимально возможному, что обеспечивает подавление поверхностной волны. Для оптимального использования диаграммы направленности поперечной волны излучатель наклонялся в той же плоскости до положения, в котором главный лепесток диаграммы направленности поперечной волны совпадает с точкой контактов приемника. Уточнялось положение точки приема путем перемещения приемника вдоль образующей керна. Технологически при большой базе такое уточнение выполнить значительно проще, чем точно установить направленность излучателя. Затем приемник наклонялся в сторону излучателя до максимального подавления продольной волны и выделения вступления поперечной. Излучатель, снабженный согласованным коническим концентратором, излучает продольные волны, которые в точке контакта трансформируются в другие типы волн. При этом продольные и поперечные волны, кроме различий в диаграммах направленности, обладают различными векторами направления колебаний. Поворотом приемника в сторону излучателя добивались совпадения вектора направленности поперечных волн с направленностью максимальной чувствительности приемника, диаграмма направленности которого аналогична диаграмме направленности излучателя. Для лучшего выделения продольной волны достаточно осуществить поворот приемника в сторону от излучателя. Таким образом, способ позволил реализовать направленности излучателя и приемника, различие в диаграммах направленности волн и векторную направленность колебаний при прозвучивании керна горных пород с неотработанными торцами. Кроме того, способ достаточно эффективно подавляет поверхностные волны.

Из результатов испытаний слоистых и однородных образцов гипса, приведенных в табл. 3 и 4, следует, что средние скорости распространения продольных и поперечных волн в слоистых образцах равны: $V_p = 5191$ м/с, $V_s = 2159$ м/с, а в однородном – $V_p = 5231$ м/с, $V_s = 2270$ м/с. Кроме того, анализ полученных данных свидетельствует о том, что скорости распространения продольных волн в образцах большей длины превышают скорости распространения продольных волн в образцах горных пород меньших размеров. Этот результат можно объяснить тем фактом, что для малых образцов вклад нелинейных эффектов на границе "датчик-образец" вносит существенные поправки в значения измеряемых скоростей, тогда как для больших образцов эти нелинейные краевые эффекты нивелируются [5].

Таблица 3 - Физико-механические параметры образцов, определенные методом ультразвукового прозвучивания (горные породы месторождений Центрального и Западного Донбасса, гипсы - Артемовского, Новомосковского и Пешеланского месторождений)

Литотипы пород	Плотность осадочных горных пород, $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	Скорость продольных волн в образцах, V_p , км/с	Скорость поперечных волн в образцах, V_s , м/с	Динамический модуль упругости, E_d , ГПа	Статистический модуль упругости, E_c , ГПа	Модуль сдвига, G , ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	Коэффициент трещиноватости, $K_{тр}$	Коэффициент затухания a_s , м ⁻¹	Коэффициент вязкости, η_s , ГПа·с	Время релаксации, τ , с
Гипс	2,1-2,5	1,5-5,2	0,75-2,76	2,9-50,6	1,5-26,6	1,2-19,0	0,22-0,33	0,28	0,2-30,6	(0,4-1,1)·10 ³	(0,02-1,0)·10 ³
Песчаник	2,0-2,9	0,8-4,5	0,40-2,70	0,5-59,2	0,5-58,5	0,2-21,1	0,26-0,37	0,18	1,4-71,0	(0,31-40,7)·10 ³	(0,15-2034)·10 ³
Алевролит	1,8-2,8	0,8-4,0	0,40-2,40	0,7-42,8	0,6-41,4	0,3-16,1	0,22-0,33	0,20	1,98	(0,4-51,3)·10 ³	(0,20-2566)·10 ³
Аргиллит	1,7-2,9	0,9-4,5	0,56-2,25	0,5-39,0	0,2-14,2	0,2-14,7	0,18-0,33	0,20	1,94	(0,6-71,6)·10 ³	(0,39-3580)·10 ³
Известняк	1,8-2,9	1,0-5,5	0,60-3,30	1,1-84,0	0,4-0,33	0,4-31,6	0,15-0,20	0,18	1,92	(0,6-109,1)·10 ³	(0,39-2730)·10 ³

Таблица 4 – Акустические и упругие параметры для слоистых и однородных образцов

	Слоистые образцы					Однородные образцы					
l , мм	63,8	48,4	33,4	18,4	14,7	76,8	61,3	46,3	31,6	16,4	15,0
V_p , м/с	5214	5239	5235	5111	5158	5260	5230	5240	5249	5222	5190
V_s , м/с	2185	2407	2185	1973	2046	2421	2284	2047	2367	2265	2240
E , МПа	30516	36403	30516	21955	26573	36668	33115	26796	28716	32567	31852
G , МПа	10981	13325	10981	7785	9628	13481	11998	9637	13593	11799	11540
ν	0,39	0,37	0,39	0,38	0,38	0,36	0,38	0,39	0,37	0,38	0,36

Для слоистых образцов такая закономерность не просматривается, что связано с наличием нелинейных эффектов не только на границе "датчик-образец", но и на границе раздела между слоями.

Для кернов горных пород длиной около 0,15 м, полученных после распиливания проб, измерены как динамические, так и статические модули упругости. По скоростям распространения ультразвуковых волн в образцах до и после разрушения оценены коэффициенты трещиноватости образцов и установлено, что скорости распространения продольных ультразвуковых волн в разрушенных образцах в 1,5-2 раза меньше, чем в ненарушенных.

Ко второму кластерно-иерархическому макроуровню относится зона массива горных пород вблизи выработок.

Известно, что создание выработки нарушает равновесие массива – статичное гармоническое состояние и инициирует движение его элементов, которое гармонизируется динамическим модулем $\sqrt{2}$ и модулем золотого сечения Φ . Впереди забоя выработки образуются сферические фуллереноподобные оболочки с радиусами, определяемыми по формулам [14]

$$r_i = \alpha^i r_0, \quad (1)$$

$$\Delta r_i = (0,05 - 0,11)r_i, \quad (2)$$

где i – номер зоны дезинтеграции, отсчитываемый от контура выработки; $\alpha^i = \sqrt{2}^i$ – модуль масштабного фактора; Δr_i – толщина оболочки мелкомасштабной дезинтеграции.

Ширина зоны мелкомасштабной дезинтеграции определяется по формуле

$$K_i = (\Phi - \sqrt{2})\sqrt{2}^{i-1}, \quad (3)$$

где $\Delta r_i = K_i r_0$ – коэффициент интенсивности мелкомасштабной дезинтеграции.

Геомеханические условия, в которых развивается явление зональной дезинтеграции, целесообразно представить через параметр – критерий образования упругопластических зон [14]

$$q = \frac{\gamma H}{R_c}, \quad (4)$$

где γ – объемный вес горных пород; H – глубина расположения выработки; R_c – предел прочности пород на сжатие.

$q \leq 0,5$ – реализуется равномерное всестороннее сжатие массива в радиальном направлении к центру выработки за счет подвижности его структурных элементов;

$0,5 \leq q \leq 1,6$ – подвижность структурных элементов исчерпывается и начинается разрушение элементов вблизи выработки;

$q = 1,4-1,6$ – формируется первая зона дезинтеграции;

$q \geq 1,6$ – формируются после первой последующие зоны дезинтеграции.

Рассмотрим **второй кластерно-иерархический уровень** массива горных пород, соответствующий макромасштабному уровню (см. табл. 1) [5].

С целью установления закономерностей изменения напряженного состояния в призабойной части слоистого массива выполнен экспресс-контроль участков массива с повышенными концентрациями напряжений с помощью ультразвуковых измерений вблизи очистного забоя подготовительной выработки. Так, по пласту «Дерезовка» шахты «Красный Профинтерн» было пробурено 5 шпуров диаметром 46 мм и длиной 1,5 м.

Скорости продольных и поперечных волн определены параллельно, перпендикулярно и под углом к слоистости. При этом на основе теоретических исследований вычислены модули упругости λ_m трансверсально-изотропного массива, а также модули Юнга, сдвига и коэффициенты Пуассона в направлении, перпендикулярном слоистости (табл. 5).

Таблица 5 – Изменение упругих свойств слоистого массива при увеличении расстояния от контура выработки вглубь массива

L , м	V_{px1} , м/с	V_{sx1} , м/с	V_{px3} , м/с	V_{sx3} , м/с	V_{p4s} , м/с	Модуль Юнга $E \cdot 10^{-2}$, МПа	Модуль сдвига $G \cdot 10^{-2}$, МПа	Коэффициент Пуассона	$\lambda_1 \cdot 10^2$, МПа	$\lambda_2 \cdot 10^2$, МПа	$\lambda_3 \cdot 10^2$, МПа	$\lambda_4 \cdot 10^2$, МПа	$\lambda_5 \cdot 10^2$, МПа	λ_3/λ_5 , МПа
0,4	5500	2650	4300	2060	4580	270	114,6	0,18	499,2	180,5	47,4	100,9	28,6	1,66
0,6	4060	2350	3550	1700	3780	210,7	78,0	0,35	340,2	92,6	37,2	124,3	19,5	1,91
1	4370	2450	3800	2070	4000	296	115,7	0,28	289,2	94,4	40,5	116,4	28,9	1,4
1,1	4770	2500	4060	2110	4700	314,9	120,2	0,31	445	132,4	42,2	228,7	30,1	1,4
1,2	5170	2560	4170	2410	5050	385,7	156,8	0,23	469	158,3	44,2	249,6	39,2	1,12

Из представленных в таблице данных следует, что по мере удаления от контура выработки первоначально наблюдается снижение, а затем возрастание скоростей акустических волн, упругих постоянных λ_m , а также модулей Юнга и сдвига, которые характеризуют упругие свойства (в отличие от λ_m) только в одном направлении. Это говорит о том, что вблизи контура подготовительной выработки образуется волнообразная зона опорного давления, то есть происходит перераспределение напряжений, вызванное процессами самоорганизации, спровоцированными буровзрывными работами в период проведения выработки [2].

Следует отметить, что даже по истечении весьма длительного периода времени из-за влияния очистных работ релаксационные процессы полностью не стабилизируются, наблюдается затухающая волна.

Таким образом, для призабойной части слоистого массива горных пород (второй кластерно-иерархический макроуровень) подтверждены волновой характер изменения деформационных характеристик массива и тенденция к самоорганизации протекающих в нем процессов.

При характеристике геологических объектов как относительно обособленных систем необходимо начать, как уже отмечалось выше, с пород [15]. Горные породы – системы, лежащие на границе атомно-молекулярного и планетарного

уровней организации вещества. По одну сторону этой границы структуры систем определяются ионными и другими видами химических связей, по другую – они имеют существенно иную природу и определяются связями, возникшими при доминирующем влиянии гравитационного поля Земли. Природа горных пород как пограничных систем является двойственной, т.е. с одной стороны физико-химической, а с другой – геологической (планетарной). Не исключив, что принадлежность горных пород одновременно к двум уровням организации вещества и обуславливает те объективные трудности, которые возникают при попытках создать общую классификацию пород.

Тектоника касается пород через структурную геологию, в которой классифицируются формы геологических тел, выполненных той или иной породой, и через петроструктурный анализ – при определении отношений и ориентировки минеральных зерен в породе. Обе структурные задачи целесообразно сосредоточить в рамках петротектоники.

Из пород конструируются новые объекты – геологические формации. Учение о формациях как закономерных ассоциациях пород развивалось внутри тектоники и уже оформилось в самостоятельное направление. Но за тектоникой по-прежнему сохраняется структурный аспект изучения геологических формаций. Сюда относится выделение и описание типов ритмичности флишевых формаций, типов слоистости угленосных формаций, особенностей структуры метаморфических формаций и т. д.

Создание в тектонике формационного направления позволило по-новому подойти к характеристике объектов следующего ранга – геосинклиналей, плит, впадин, глубинных разломов вулканогенных поясов и др. – через представление их как определенных рядов формаций. В практике тектонических исследований стало обычным обращаться к понятиям о геосинклинальных, платформенных и ортогенных рядах формаций и выделять на их основе соответствующие структурные ярусы и этажи. Каждый из таких рядов отличается не только специфическим набором формаций, но и видами связей между ними, т.е. структурой. Дисциплину, изучающую строение формационных рядов, можно назвать тектоникой формационных рядов, включая сюда исследование всей совокупности структурных признаков – формы тел формаций, их размеров, ориентировки в пространстве, положения центров масс, взаимоотношений и т.д.

Из формационных рядов конструируются объекты еще более крупного ранга, названные условно формационными комплексами. Обобщающего термина для обозначения всего множества этих объектов пока не имеется. На тектонических картах они имеют складчатые (геосинклинальными) комплексы, покрывными (платформенными, плитными) комплексами, орогенными комплексами. Это, например, докембрийские складчатые комплексы древних платформ, байкальские, каледонские, герцинские, мезозойские, альпийские складчатые комплексы молодых платформ и соответствующие им по положению в слоистой структуре ортогенные и плитные комплексы. Иными словами, речь идет о фундаментах и чехлах древних и молодых платформ. Дисциплину, изучающую структуру формационных комплексов, можно назвать тектоникой

формационных комплексов.

Наконец, в компетенцию тектоники входит описание структуры геосфер Земли, в особенности ее верхней сферы – земной коры, в этом отношении наиболее изученной. Соответствующую дисциплину можно назвать тектоникой геосфер.

Завершается иерархический ряд наук о структуре тектоникой планет, задачей которой является изучение формы, размеров, ориентировки, взаимоотношений и т.д. геосфер.

Итак, структурные исследования целесообразно вести соответственно рангу изучаемых объектов и в рамках сложившихся или формирующихся дисциплин о структуре этих объектов. Разграничение важно еще и потому, что для каждого ранга объектов потребуются свои методы исследования структуры.

Электрометрическими исследованиями выявлены волновой характер деформационных и синергетических процессов, как вдоль лавы, так и от контура выработки вглубь массива.

Выполнены экспериментальные исследования третьего кластерно-иерархического уровня массива горных пород, к которому относятся и тектонические нарушения. Исследовано изменение электрического сигнала, индуцированного каналовой волной в породах, слагающих тектоническое нарушение и обладающих эффектом Е. Установлено, что преобладающая частота в механоэлектрическом сигнале составляла около 260 Гц, что подтверждает его инициирование каналовой волной (частота в фазе Эйри составляла около 250 Гц).

Исследование кривых, построенных методом засечек (с радиусом $r = V_k \Delta t$, где V_k – скорость каналовой волны), позволило установить, что границы нарушения совпадают с границей, полученной по данным обработки сейсмограмм, что подтверждает целесообразность использования механоэлектрического метода, базирующегося на эффекте Е вмещающих пород, в пластовой сейсморазведке.

В качестве информативного параметра определения границ влияния пустот целесообразно использовать нормированное по фоновому значению количество импульсов естественного электромагнитного поля Земли. Среднее фоновое значение на участке измерений составило 485 импульсов в секунду. Установлено, что площадь влияния луговен на земной поверхности не существенно отличается от площади проекции луговен. Некоторое смещение границ влияния по отношению к проекции на юго-запад объясняется падением рудного тела под углом на северо-восток. Мульды сдвижения над луговенами отсутствуют, а перемещения в массиве происходят либо по контакту рудного тела с породой, либо по напластованию пород.

Таким образом, разработан геомеханический мониторинг подземных геотехнических систем с учетом их кластерно-иерархического уровня, который состоит из трех основных направлений:

- оперативного определения физико-механических свойств пород на образцах произвольной формы, в том числе непосредственно на объекте (как первый кластерно-иерархический уровень);

- контроля свойств и состояния ближней зоны массива горных пород (до 10 м от контура выработки как второго кластерно-иерархического уровня), а именно: наличия и размеров заколов, отслоений, трещин; параметров зон аномальных напряжений, неупругих деформаций и опорного давления; векторно-силовых характеристик взаимодействия в системе “крепь - массив”; состояния арочной, анкерной, железобетонной и бетонной крепей и закрепного массива; качества тампонажа, газоносности угольного пласта и т.д.;

- контроля дальней зоны породного массива (от 10 до 200 м от контура выработки как третьего кластерно-иерархического уровня), в частности, определения наличия и параметров карстов, тектонических нарушений, техногенных пустот, структурных неоднородностей типа границы раздела пород с различными физическими свойствами, а также прогноза газодинамических явлений и горных ударов.

Показано, что для исследования кластерно-иерархических уровней массива горных пород комплексный геофизический мониторинг весьма информативен, он позволяет не только выявлять деформационные и синергетические процессы в исследуемых структурах, но и прогнозировать их изменение во времени и пространстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А.Ф. Фракталы в геомеханике / А.Ф. Булат, В.И. Дырда.- К.: Наук. думка., 2005. – 357 с.
2. Глушко В.Т. Геофизический контроль в шахтах и тоннелях / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – М.: Недра, 1987. – 278 с.
3. Федер Е. Фракталы. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
4. Горобець Ю.І. Фрактальна геометрія у природознавстві: Навчальний посібник / Ю.І. Горобець, А.М. Кучко, І.Б. Вавилова. – К.: Наук. думка, 2008. – 232 с
5. Паламарчук Т.А. Элементы механосинергетики породного массива / Т.А. Паламарчук, В.Я. Кириченко, Б.М. Усаченко. - Днепропетровск: «Лири ЛТД», 2006. - 307 с.
6. Открытие № 318 Закономерность пространственно-временной структурно-фазовой самоорганизации грунтовых и породных массивов вокруг протяженных подземных выработок / Л.В. Байсаров, М.А. Ильяшов, В.В. Левит, Т.А. Паламарчук, В.Н. Сергиенко, В.Б. Усаченко, А.А. Яланский // Научные открытия, идеи, гипотезы (1992-2007). Информационно-аналитический обзор. – М.: МААНОН, 2008. – С. 298-299.
7. Шестопапов А.В. Сквжинный способ получения электроэнергии и подтверждение представлений о его механодинамике / А.В. Шестопапов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ, - 2000. - №5. - С. 134-137.
8. Фрактальный анализ в механике разрушения твердых тел / В.И. Дырда, Г.Т. Рубец, Г.Н. Агальцов и др. // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2005. – С. 132 – 136.
9. Varenblatt G.I. Self-maintaining regime for deformation and fracture of solids / G.I. Varenblatt, V.M. Entov, R.L. Salganik // Int. J. Fracture. - 1975. - V. 11, № 5. - P. 887-892.
10. Mogi K. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow / K. Mogi // Bull. Earth. Res. Inst. Tokyo Univ. - 1966. - V.44, № 1. - P. 215-232.
11. Салганик Р.Л. Механика тел с большим числом трещин / Р.Л. Салганик // МГТ. - 1973. - №4. - С. 149-158.
12. Кайло И.И. Кластерная модель явления зональной дезинтеграции массива вокруг подземных выработок / И.И. Кайдо // ГИАБ. - 2009. - № 6. - С. 48-57.
13. Макаров П.В. Нагружаемый материал как нелинейная динамическая система. Проблемы моделирования / П.В. Макаров // Физическая мезомеханика. - 2005. - Т.8, №6. - С. 18-21
14. Процеси самоорганізації в матеріалах різної природи: Навч. посіб. / А.П. Шпак, Ю.А. Куницький, В.А. Прокопенко, С.Ю. Смик. - К.: ІМ ім. Г.В. Курдюмова НАН України, 2004. - 113 с.
15. Иерархия геологических объектов и тектоника / Ю.А. Косыгин, О.А. Вотах, В.А. Соловьев, Р.Ф. Черкасов // Доклады АН СССР. - 1972. - Т. 207, № 2. - С. 411-414.