

Д-ра техн. наук Т. А. Паламарчук,  
А. А. Яланский,  
гл. технолог Н. Т. Бобро  
(ИГТМ НАН Украины),  
д-р техн. наук В. П. Куринной  
(ГВУЗ «НГУ»)

## **КЛАСТЕРНО-ИЕРАРХИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ ПРОЯВЛЕНИЯ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРОЧНОСТИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

На основі розгляду кластерно-ієрархічних структур, як результату прояву масштабного ефекту міцності геомеханічних систем, зроблено висновок, що для оцінки переважних розмірів блоковості, багаторівневих властивостей гірських порід і масиву необхідно залучати статистичний апарат полімодальних законів розподілу, що дозволяє розділяти багатомодальні розподіли і компонувати сумарний розподіл з простих розподілів.

## **CLUSTER-HIERARCHIC STRUCTURES AS A RESULT OF MANIFESTATION OF THE SCALE EFFECT OF GEOMECHANICAL SYSTEM STRENGTH**

Basing on cluster-hierarchic structures considered as result of manifestation of the scale effect of geomechanical system strength, it is concluded that in order to estimate primary sizes of blocks and multilevel properties of the rocks and massif it is necessary to apply statistical laws of polymodal distribution, which allow to divide multimodal distributions and arrange total distribution consisting of simple distributions.

Общеизвестно, что неоднородность структуры присуща практически всем горным породам. Это вызвано, прежде всего, многокомпонентностью горных пород, а также наличием дефектов в структуре, максимальный размер которых сравним с размерами исследуемого образца горной породы. М. А. Садовский со своими сотрудниками в работах [1–4] убедительно доказывают, что неоднородность, присущая горным породам, упорядоченная, что во всех структурных отдельностях, существующих в горных породах, а также в гранулометрическом составе разрушенных горных пород наблюдается группирование отдельностей определенных размеров вокруг отдельностей с преимущественными размерами. В результате выполненных исследований авторами сделан вывод, что всем твердым материалам присуще общее свойство, состоящее в том, что при разделении их на части, а также при объединении отдельных частиц, распределение отдельных кусков по размерам представляет собой иерархическую последовательность преимущественных размеров, в первом приближении не зависящую от физико-химических свойств исследуемого материала. Деформируемый твердый материал рассматривается М. А. Садовским как открытая система элементов, каждый из которых находится в своем энергетическом состоянии, которое, в свою очередь, может изменяться от стабильного до неустойчивого [2, 4]. Если к рассматриваемой системе извне подводится энергия, то наблюдается взаимодействие отдельностей, при этом изменяются как их свойства, так и свойства

всей системе в целом. Кроме того, если предположить, что характер изменения свойств, приводящий систему в неустойчивое состояние, сохраняется подобным для всех масштабных уровней, можно считать, что возникновение дискретной иерархии размеров можно объяснить существованием вышеописанного подобия. В процессе деформирования твердых тел образуется иерархическая дискретность преимущественных размеров отдельных частей, образование которых сопровождается возникновением дискретных промежутков времени, в течение которых при деформировании материала происходит переход системы из неустойчивого состояния в устойчивое.

В начальный период развития теории разрушения за основной критерий разрушения принимали объемную массу породы, позднее – сопротивление породы сжатию и растяжению, а в настоящее время пытаются придать особое внимание в качестве определяющего значения структуры горных пород размеру их отдельных частей, являющихся следствием трещиноватости, вне зависимости от ширины трещин и свойств заполняющего материала. Классификация пород по блочности приведена в табл. 1 [5].

Таблица 1 – Классификации пород по блочности

Блочность массива	Категория трещиноватости	Среднее расстояние между трещинами, м	Удельная трещиноватость, м <sup>-1</sup>	Содержание (%) в массиве отдельных частей размером, мм		
				+ 300	+ 700	+ 1000
Мелкоблочный	I	до 0,1	10	до 10	0	Нет
Среднеблочный	II	0,1–0,5	2–10	10–70	до 30	до 5
Крупноблочный	III	0,5–1	1–2	70–100	30–80	5–40
Весьма крупноблочный	IV	1,0–1,5	1,0–0,65	100	80–100	40–100
Исключительно крупноблочный, практически монолитный	V	1,5	0,65	100	100	100

В настоящее время в геомеханике используются математические модели, основанные на классических методах математического анализа, евклидовой геометрии и механики сплошной среды. При использовании таких моделей поведение породного массива при малых деформациях описывается методами пластичности, ползучести или методами наследственно-упругой среды. Обычно используемые математические модели основаны на двух основных предположениях: породный массив – сплошная среда; функции, описывающие поведение среды, являются непрерывными и достаточно гладкими. Такая формализация и абстрактность дает возможность использовать мощный математический аппарат – теорию дифференциальных уравнений в частных производных. Однако существующие тенденции в геомеханике показывают, что ее дальнейшее развитие будет связано с изменениями в математическом аппарате и, в первую очередь, введением нетрадиционных математических объектов: фрактальных

множеств и детерминированного хаоса; геометрических вероятностей и стереологических структур; недифференцируемых и сингулярных функций; полиэдров Вороного-Дирихле и самоподобных случайных мозаик [6].

В геологии, геофизике и геомеханике самоподобные структуры появляются вследствие протекания тектонофизических 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 напряжений воздействия на самоподобные по структуре материалы возникает избирательный механизм включения в работу соответствующих неоднородностей и дефектов.

Фундаментальным свойством геоматериалов является их неоднородность; горные породы и породные массивы сложены из блоков и отдельностей с различными свойствами, представляют иногда структурно-несвязную среду, разбитую системой стохастически или упорядоченно распределенных трещин с различными физико-механическими свойствами. Весьма часто встречаются ситуации, когда объект исследования содержит границы раздела, на которых существенно меняются свойства геоматериала и напряженное состояние, и метод усреднения для данного объема становится нерациональным. Применимость методов структурно-неоднородных сред сильно ограничены из-за того, что дискретность геоматериалов проявляется на любых масштабных уровнях рассмотрения, что будет вносить недопустимую ошибку в расчет деформаций или напряжений. Важной особенностью иерархичности 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.

В механике твердого тела важную роль играют понятия подобия механических явлений, самоподобия процессов деформирования и разрушения и масштабный фактор прочности, которые рассматриваются достаточно подробно в своем историческом развитии как составная часть приложения фрактальных представлений в науке о материалах.

Дискретные и самоподобные структуры характерны также 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. Рассмотрены особенности структурной организации почв и горных пород [7, 8]. Явления статистического подобия распределений наблюдается не только при статическом, но и при динамическом разрушении геоматериалов и является также характерным при изучении размеров частиц на микроструктурном масштабном уровне. Принцип автомодельности присущ также масштабным уровням трещиноватости в геологических средах. Показаны пути построения моделей трещиноватости на основе разработок А. Н. Колмогорова, фрактальных самоподобных мозаик и полиэдров Вороного-Дирихле.

В настоящий момент не очерчен до конца круг всех природных явлений, которые можно описывать с помощью фрактальной геометрии. Продолжается процесс накопления общих идей, концепций и подходов, в том числе и в отношении геометрии порового пространства в материалах и трещиноватых горных породах. Фрактальное описание структуры пористых материалов может осуществляться на следующем уровне: поровое пространство, скелет горной породы, поверхность скелета породы, система трещин в пористой матрице. В этом плане важной проблемой является изучение просачивания жидкости или газа через пористую среду: газовыделение в угольных пластах и породах, коллекторские свойства осадочных горных пород при движении через них нефти и газа и др. Приведены фрактальные размерности, определенные экспериментальным путем, порового пространства некоторых материалов и горных пород, которые могут быть использованы для описания сложно организованных, сильно неоднородных и трещиноватых сред [6, 9, 10].

Анализ фрактальных подходов в механике хрупкого разрушения показывает, что с помощью решеточных, связных и стержневых схем, основанных на простых физических представлениях, можно решить широкий круг практических задач без учета конкретной структуры материала. Описание системы в целом с помощью 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. Наиболее подходящим аппаратом для моделирования процесса разрушения прочностных связей является так называемое фрактальное "дерево" Кейли как универсальный метод описания разрушения материалов и конструкций. В рамках фрактальных представлений процесс накопления рассеянной разномасштабной повреждаемости рассматривается как экспоненциальный процесс самоподобного фрактального кластера до такой границы, когда начинается его лавинообразное протекание – начало макроразрушения. Поверхность излома или трещины, формирующаяся при разрушении большинства хрупких материалов, весьма нерегулярна и характеризуется наличием неровностей самых различных масштабов, что приводит к ряду механических эффектов, наблюдаемых экспериментально. Процесс разрушения с фрактальными трещинами сопровождается каскадным переносом высвобожденной упругой энергии с больших масштабов на меньшие и, наконец, на микромасштаб, где происходит диссипация энергии и расходование ее на образование новой поверхности разрыва. В общем случае представляется рассмотрение процесса разрушения как мультифрактального, т.к. при переходе с одного масштабного уровня дефектности на другой фрактальная размерность будет изменяться в связи с изменением микронапряжений в различных структурных областях.

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 по энергии. Одним из методов, пригодных для изучения подобных явлений и процессов, является фрактальный анализ.

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 геометрико-вероятностными характеристиками дефектного множества и его фрактальной размерностью.

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.

Свойства пород обладают значительной изменчивостью и вариабельностью, что предопределяет интенсивное использование вероятностно-статистических методов, начиная от случайных величин до случайных процессов марковского или немарковского типов. Кроме того, в геомеханике существуют фрактальные механические процессы особого рода, которые возникают спонтанным образом (горные удары, внезапные обрушения, выбросы угля, породы и газа и др.) или же затухают спонтанным образом (развитие фронта хрупкого разрушения в окрестности глубоких подземных выработок, плавное опускание кровли в лавах угольных пластов и др.). Для моделирования таких процессов потребуется привлечение современных вероятностных методов обнаружения и предвидения спонтанно-возникающих и спонтанно-затухающих эффектов, которые разработаны А. Н. Колмогоровым и его учениками.

Не получили еще достаточного распространения современные модели синергетической реальности – т.н. клеточные автоматы или нейронные сети, перколяционные кластеры, которые представляют интерес как подходящие модели для описания движения фронта хрупкого разрушения в окрестности горных выработок или накопления повреждений на различных масштабных уровнях разупрочнения породного материала.

Для оценки преимущественных размеров блочности, многоуровневых свойств горных пород и массива необходимо привлекать статистический аппарат полимодальных законов распределения, позволяющий разделять многомодальные распределения и компоновать суммарное распределение из простых

распределений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовский М. А. Естественная кусковатость горной породы / М. А. Садовский // Докл. АН СССР. – 1979. – 247. – №4. – С. 829–831.
2. Садовский М. А. О распределении размеров твердых отдельностей / М. А. Садовский // Докл. АН СССР. – 1983. – 269. – №1. – С. 69–72.
3. Садовский М. А. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды / М. А. Садовский, В. Ф. Писаренко, В. Н. Родионов // Вестник АН СССР. – 1985. – №1. – С. 82–88.
4. Куриной В. П. Современные представления о механизме разрушения разупрочнения горных пород при взрыве / В. П. Куриной, И. П. Гаркуша, В. А. Никифорова // Сб. научн. трудов Национального горного университета. – Днепропетровск: НГУ. – 2003. – Т.1, №17. – С. 364–371.
5. Демидюк Г. П. Удельные затраты энергии взрыва и эффективность ее использования на дробление горных пород / Г. П. Демидюк // Основные направления развития техники и технологии обогащения полезных ископаемых. – М.: Из-во Механобр, 1983. – С. 105–110.
6. Булат А. Ф. Фракталы в геомеханике / А. Ф. Булат, В. И. Дырда. – К.: Наук. думка., 2005. – 357 с.
7. Кочарян Г. Г. Иерархия структурных и геодинамических характеристик земной коры / Г. Г. Кочарян, А. А. Спивак // Геология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2002. – № 6. – С. 537–550.
8. Бенедик А. Л. Построение структурных моделей участков земной коры на разном иерархическом уровне / А. Л. Бенедик, А. В. Иванов, Г. Г. Качарян // ФТП РПИ. – 1995. – № 3. – С. 31–42.
9. Фрактальный анализ в механике разрушения твердых тел / В. И. Дырда, Г. Т. Рубец, Г. Н. Агальцов [и др.] // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 58. – С. 132 – 136.
10. Кластерно-иерархические структуры в массиве горных пород как одна из форм самоорганизации породного массива / Т. А. Паламарчук, Б. М. Усаченко, С. И. Скипочка, А. А. Яланский // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2009. – Вып. 83. – С. 91–104.

УДК 552.513:552.12:551.24:539.38(477.61/.62)

Канд. геол. наук Л.Ф. Маметова  
(ИГТМ НАН України)

### ДЕФОРМАЦІЙНО–МІНЕРАЛОГІЧНІ ЗМІНИ В ПІСКОВИКАХ ДОНБАСУ

Показано возникновение видов пластических микродеформаций минералов песчаников, их распространение, преобладание определенных типов и отношения между ними в пределах промышленных районов и региона в целом.

### DEFORMATION AND MINERALOGICAL CHANGES IN SANDSTONES OF DONBASIS

The author investigates formation of different types of plastic microstrains and their propagation in the mineral sands, domination of certain types and their relationships within the industrial areas and the region as a whole.

Об'єктом вивчення зміни мінералогічних і структурних характеристик осадочних порід та процесів, що спонукають ці зміни, обрано вугленосні відклади Донбасу. В перетині регіону і з глибиною, по розрізу товщі, спостерігається зростання ступеню перетворення (геохімічного і структурного) уламкової та цементуючої складових теригенних порід. Зміна структури мінералів відбувається внаслідок деформацій різного походження. Багаторічні дослідження закордонних [1, 12] і вітчизняних [2-7, 9] вчених виявили, що пластичні деформації структури мінералів (кварцу, польових шпатів, слюд та ін.) ефективно фіксують зміни, які відбуваються з відкладами під впливом катагенезу і тектоніки. За умови участі в одному й тому ж природному процесі мінерали можуть по-