

# МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПИСАНИЮ СТРУКТУР ПРОСТРАНСТВЕННОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕЙ И ОЦЕНКИ ПРЕДРАСПОЛОЖЕННОСТИ ИХ К ВНЕЗАПНЫМ ВЫБРОСАМ

*В.А. Малинников, Московский государственный университет геодезии и картографии  
(МИИГАуК), Россия*

*О.Н. Малинникова, Учреждение Российской академии наук Институт проблем  
комплексного освоения недр РАН (УРАН ИПКОН РАН), Россия*

*Д.В. Учаев, Московский государственный университет геодезии и картографии  
(МИИГАуК), Россия*

*Аннотация.* Представлен мультифрактальный подход к описанию структур пространственной самоорганизации сложных природных систем в рамках концепции самоорганизованной критичности. Продемонстрирована возможность использования сформулированного мультифрактального подхода для описания поверхностной структуры углей. Проиллюстрирована связь между мультифрактальными характеристиками структуры нарушенности углей и их предрасположенностью к внезапным выбросам угля и газа.

## Введение

Проблема описания поведения сложных систем в геологии, экологии, метеорологии, экономике привлекает к себе внимание многих исследователей из разных областей современной науки. Характерной особенностью этих систем служит либо хаотическое поведение, ограничивающее возможности детерминированного описания, либо очень большое число составляющих систему элементов, делающее такое описание бесполезным практически.

Современная наука базируется на представлении сложных природных структур открытыми нелинейными системами. Процессы протекающие в таких системах представляют собой переходы от упорядоченных состояний к неупорядоченным и обратно. Переходы такого рода часто называют переходами порядок-беспорядок или критическими явлениями.

При направленном характере критических явлений взаимодействия между системой и внешней средой сопровождаются явлениями самоорганизации, т.е. самопроизвольного возникновения и самоподдержания упорядоченных временных и пространственных структур.

Явления самоорганизации критического поведения сложных систем различной природы легли в основу разработанной П. Баксом, Ч. Тангом и К. Визенфельдом концепции самоорганизованной критичности [1]. Первоначально концепция самоорганизованной критичности (СОК) была введена в 1987 году как общая теория объяснения фрактальных явлений. СОК-системами называли сложные системы, которые удовлетворяли степенным (фрактальным) распределениям, отражающим зависимость числа событий от их линейного масштаба.

В наши дни теория самоорганизованной критичности приобрела более широкое значение и объясняет различные природные и техногенные катастрофы, процессы деформации и

разрушения материалов и сред, социальные и демографические процессы, финансовые и экономические кризисы и др. Она базируется на принципе системности, согласно которому свойства системы не есть сумма свойств составляющих ее элементов и гипотезе масштабной инвариантности, утверждающей, что критические явления характеризуются единственным размером – корреляционным радиусом. В терминах пространственных и временных корреляций это означает, что корреляционная функция  $C(r, t) = \text{Prob}\{(r, t)|(0, 0)\}$ , где  $\text{Prob}(r, t)$  – вероятность некоторого события в точке  $r$  в момент времени  $t$  при условии, что такое же событие произошло в известном месте в известное время (для определенности – в начале координат в нулевой момент), убывает не по экспоненциальному, а по степенному закону. Степенной характер убывания корреляционной функции свидетельствует о дальних пространственных и временных корреляциях, т.е. об отсутствии характерных длин и времен, на которых бы утрачивалась информация о происходящих рядом или предшествующих событиях. Тем самым, система с локальными правилами (элементы которой способны лишь к взаимодействию со своими ближайшими соседями) демонстрирует глобальное поведение. Такое глобальное поведение наблюдается только после перехода управляющего параметра (например, скорости нагружения или угла наклона поверхности) через критическое значение в результате чего, параметр порядка, характеризующий критическое явление, начинает принимать ненулевое значение. Теория самоорганизованной критичности говорит о том, что установка управляющего параметра в критическое значение осуществляется не путем искусственной подстройки, а за счет самоорганизации системы, вызывающей незначительные изменения параметра порядка. Таким образом, система обнаруживает самоорганизованную критичность, если она в процессе эволюции приходит к критическому состоянию, характеризуемому дальними масштабными и временными корреляциями, не нуждаясь в тонкой подстройке управляющих параметров.

Проводимые в наши дни исследования показывают, что многие сложные природные системы, являющиеся центральным объектом исследований в геоморфологии, геологии, геомеханике, биологии и других науках, обнаруживают признаки самоорганизованной критичности. СОК-поведение наблюдается во многих моделях лесных пожаров, сейсмичности, водной эрозии, эволюции ландшафтов и других геоэкологических процессов.

Во многих случаях в процессе эволюции свойства СОК-систем аномально сильно изменяются и формируются крайне нерегулярные структуры. Эти структуры обладают свойствами самоподобия на разных масштабных уровнях и могут быть идентифицированы как фракталы или мультифракталы. Фрактальная размерность таких структур не только характеризует их геометрический образ, но и отражает процесс их образования и эволюции, а также определяет их динамические свойства.

Таким образом, целесообразной представляется разработка теоретически обоснованного мультифрактального подхода к описанию самоорганизованных структур в закритической области и определения взаимосвязи особенностей пространственного упорядочивания со свойствами этих структур.

В данной работе приводится описание предлагаемого нами мультифрактального подхода к описанию структур пространственной самоорганизации сложных природных систем в рамках концепции самоорганизованной критичности и продемонстрировано возможное его применение для количественного описания структурной организации элементов поверхности углей и оценки выбросоопасности угольных пластов. В первой части работы дано краткое изложение мультифрактального подхода к описанию структур пространственной самоорганизации сложных природных систем и показаны преимущества его использования перед фрактальным подходом. Во второй части работы проиллюстрирована возможность использования сформулированного мультифрактального подхода для описания поверхностной структуры углей. В заключительной части работы показана связь между мультифрактальными характеристиками структуры нарушенности углей и их предрасположенностью к внезапным выбросам угля и газа.

## **Мультифрактальное описание структур пространственной самоорганизации сложных природных систем**

Природные системы в большинстве своем представляют собой сложные иерархически устроенные стохастические образования. Фундаментальным свойством их является неоднородность их внутренней структуры. Геоматериалы и среды также обладают определенной многоуровневой неоднородностью внутреннего строения (структуры) и дефектностью различного иерархического уровня [2-4]. Наблюдающиеся преимущественно размеры блоков, разломов и отдельностей земной коры подчиняются своим закономерностям подобия с устойчивыми коэффициентами пропорциональности, что может быть интерпретировано только с позиций фрактальных представлений.

В этой связи в настоящее время для количественного описания структур пространственной самоорганизации применяется получивший широкую известность в наши дни фрактальный подход. Так, например, физическую модель реальной трещины в твердом теле можно описать следующим образом [2]: на микроуровне трещина имеет вид фрактальной кривой, на макроуровне – обычная гладкая трещина, имеющая кроме основного макропараметра – топологической длины, дополнительный – фрактальную размерность микроструктуры.

Фрактальный подход позволяет с принципиально иных позиций интерпретировать катастрофические явления, обусловленные взаимодействием природных систем с внешней средой. Использование фрактальных идей оказывается также перспективным при моделировании структур пространственной самоорганизации сложных природных систем. Кроме того, фрактальный подход позволяет выявлять характерные масштабы тех или иных катастрофических явлений (например, характерные масштабы разрушения угольного пласта).

Таким образом, фрактальный подход открывает широкие возможности для описания структур пространственной самоорганизации. Однако, в силу того, что возникающие в природе самоорганизованные структуры являются сложными стохастическими образованиями самоподобными в среднем только на определенном диапазоне масштабов одной фрактальной размерности, как правило, оказывается недостаточно для количественной характеристики таких свойств структур, как пространственная упорядоченность, внутренняя организованность, периодичность и др. Как справедливо, например, отмечает С.В. Гольдин «геологическая среда вряд ли является точным математическим фракталом» [5].

В этой связи для количественного описания структур пространственной самоорганизации природных систем более целесообразным представляется использование мультифрактального подхода, представляющего собой, по сути, естественное обобщение фрактального подхода и позволяющего перейти от изучения масштабно-инвариантных свойств объектов к изучению особенностей тем или иным образом сформированной по изображениям их меры, отражающей пространственное распределение каких-либо (геометрических, физических и др.) свойств структур.

Использование мультифрактального подхода для изучения пространственной структуры природных систем является также одним из ключевых направлений исследований функционирующей уже более десяти лет в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) школы молодых ученых. Членами научной школы разработано большое число методов и алгоритмов тематической обработки фрактальными и мультифрактальными методами аэрокосмических изображений для решения широкого круга задач в различных областях современной науки. Среди наиболее важных задач, которые были решены мультифрактальными методами, можно выделить следующие: обнаружения оползневых структур на аэрокосмических снимках, количественное описание структуры взволнованной морской поверхности, моделирование процессов распространения лесных пожаров и оценка эффективности принятых для их тушения мер [6-8].

Обобщая все полученные нами в рамках проведенных исследований результаты, можно сделать вывод, что мультифрактальное описание структурной организации сложных

природных систем в рамках концепции самоорганизованной критичности может включать в себя несколько взаимосвязанных друг с другом этапов, ключевыми из которых являются следующие: выявление структурных уровней организации природных систем, получение количественных характеристик структур путем мультифрактального анализа их цифровых изображений и установление связи между полученными мультифрактальными характеристиками структур и теми или иными катастрофическими явлениями.

В рамках предлагаемого нами подхода для количественного описания структурной организации сложных природных систем изображение изучаемой структуры разбивается на элементарные ячейки характерного размера и тем или иным способом вводится вероятностная мера ячеек (при этом полагают, что мера более крупных ячеек определяется как сумма мер элементарных ячеек). Далее одним из существующих способов строится обобщенная статистическая функция меры (так называемая функция моментов вещественного порядка  $q$ ) и оцениваются скорости изменения моментов  $q$ -го порядка в зависимости от размера ячеек (т.е. спектр скейлинговых показателей моментов  $\tau(q)$ ). Если скорости моментов разных порядков отличаются друг от друга (спектр  $\tau(q)$  нелинеен), то полагают, что изучаемый объект имеет мультифрактальную структуру и характеризуется не одной, а целым спектром фрактальных размерностей  $f(\alpha) = \inf_q \{\alpha q - \tau(q)\}$  либо непосредственно связанным с ним спектром размерностей Реньи  $D_q = \tau(q)/(q-1)$ .

Наиболее информативными мультифрактальными характеристиками структур являются количественные характеристики однородности  $f_q$  и упорядоченности  $\Delta_q = D_1 - D_q$  структуры при  $q \gg 1$ . Показатель однородности  $f_q$  определяет характер распределения единичных элементов структуры в евклидовом пространстве, охватывающем эту структуру, а параметр  $\Delta_q$  характеризует степень нарушения симметрии меры изучаемой структуры по отношению к мультифрактальному преобразованию. Малейшая неоднородность распределения меры при достаточно больших  $q$  будет сказываться заметным образом на значениях мультифрактальных параметров. Это дает повод принять величины  $f_q$  и  $\Delta_q$  при некотором фиксированном  $q = Q$  в качестве эффективных показателей однородности и порядка: чем больше значение  $f_q$ , тем структура более однородна, и, наоборот, при стремлении к нулю  $f_q$  в структуре накапливается «беспорядок»; чем больше значение  $\Delta_q$ , тем структура более периодична. Показатель  $\Delta_q$  отражает степень упорядоченности и нарушения симметрии для общей конфигурации исследуемой структуры в целом. Увеличение (по модулю)  $\Delta_q$  для исследуемой серии структур показывает, что в структуре становится больше периодической составляющей (система накачивается информацией).

Таким образом, если изучаемый объект имеет мультифрактальную структуру, то ему можно сопоставить два (три) мультифрактальных спектра характерного вида, полученные путем мультифрактального анализа его цифровых изображений. При этом сходные по текстуре участки цифровых изображений структур характеризуются близкими значениями одного либо ряда мультифрактальных параметров, отвечающих за степень однородности, пространственной упорядоченности, внутренней организованности описываемой ими структуры.

Полученное с использованием мультифрактального подхода описание пространственной организации сложных иерархически организованных природных систем, обнаруживающих признаки самоорганизованной критичности, в перспективе может быть использовано при решении таких задач как: выявление иерархических уровней структурной самоорганизации изучаемых природных систем; получение более реалистичных моделей их пространственной структуры; обнаружение и локализация по цифровым изображениям природных систем их структурных особенностей, часто не выявляемых иными существующими методами;

описание процессов самоорганизации пространственной структуры природных систем под воздействием каких-либо внешних факторов; прогнозирование развития тех либо иных катастрофических явлений.

Все вышесказанное свидетельствует о перспективности предлагаемого подхода и целесообразности применения его для количественного описания структур пространственной самоорганизации сложных природных систем.

### **Мультифрактальный подход к описанию поверхностной структуры углей**

В соответствии с современными представлениями, начало которым было положено в работах академика М.А. Садовского, массив горных пород следует рассматривать как блочную геосреду, наделенную иерархией структурных уровней. В этой модели мелкие блоки вложены в более крупные, а те в свою очередь в еще более крупные блоки, вплоть до видимых глазом. На блоки угля делится трещинами и макропорами. На каждом из иерархических уровней структурной организации углей проявляются процессы самоорганизации одного энергетического типа.

Сложная нерегулярная структура порового пространства ископаемых углей в значительной степени определяется распределением пустот (пор, микротрещин), наполненных газом. Размеры этих пустот варьируют в достаточно широких пределах от 0,3 нм до 10 см. Диаметр входных отверстий наиболее мелких пор – молекулярных – составляет 0,5–0,7 нм, что сравнимо с диаметрами молекул газов (у метана – 0,42 нм, у углекислого газа – 0,47 нм, у кислорода – 0,36 нм). В свою очередь размеры входных отверстий трещин и макропор могут достигать 100 нм и более. При этом следует отметить, что угли взрывоопасных пластов обычно имеют более нарушенную структуру, часто являющуюся наложением нескольких систем экзогенной и эндогенной трещиноватости, и повышенную микропористость (в них мало природных пор диаметром от 10 до 100 нм и много пор диаметром менее 10 нм) [9].

Процессы множественного разрушения ископаемых углей (накопления разрушений в углях) являются процессами пространственной самоорганизации их структуры и протекают по следующей схеме: формированию магистральной макротрещины в процессе разрушения угольных пластов предшествует достаточно длительный период зарождения, движения, роста и агрегации (кластеризации) всевозможного вида микродефектов (пор, микротрещин, дислокаций и т.п.). Однако, поскольку процесс развития дефектов носит вероятностный характер, использование для его описания детерминистических методов представляется крайне затруднительным.

В этой связи при описании структуры нарушений различного характера исходят из гипотезы самоподобия (автомодельности) процесса разрушения, которая утверждает, что если в материале имеется ансамбль взаимодействующих дефектов, то при множественном разрушении процесс развития дефектов автомоделен (т.е. подобен самому себе): размерные параметры каскада дефектов изменяются, а безразмерные, например, форма кривой распределения количества пор по их размерам, остаются неизменными. Тем самым, ансамбль микродефектов растет как мультифрактальный (статистически самоподобный) кластер, начало лавинообразного роста которого может интерпретироваться как начало появления макротрещин.

Таким образом, целесообразным представляется использование мультифрактального подхода к описанию структур пространственной самоорганизации углей.

В основу предлагаемого нами мультифрактального подхода к описанию поверхностной структуры углей могут быть положены следующие положения:

- структурная организация элементов поверхности углей может быть представлена мультифракталом с соответствующим ему спектром фрактальных размерностей;
- процесс разрушения угольного пласта, представляющий собой процесс множественного зарождения и развития микротрещин, также может рассматриваться как мультифрактальный, так как, при переходе с одного масштабного уровня дефектности на другой фрактальная

размерность изменяется в связи с изменением микронапряжений в различных структурных областях.

Для анализа мультифрактальных свойств углей могут быть использованы микроизображения их образцов, полученные сканирующим электронным микроскопом. Блочное строение исследуемых углей находит отражение в рельефе поверхностей изломов этих образцов при их выделении из более крупного образца, т.е. при разрушении более крупного куска угля (в том числе угольного пласта при его разработке).

Мультифрактальный анализ микроизображений поверхности образцов углей может осуществляться в соответствии с изложенной нами в работе [10] методикой, включающей следующие этапы: 1) получение с помощью сканирующего электронного микроскопа цифровых изображений поверхности исследуемых образцов углей; 2) выделение характерных участков сканерных изображений угольных образцов; 3) расчет мультифрактальных характеристик для каждой области интереса; 4) исследование полученных мультифрактальных характеристик.

### **Применение мультифрактального подхода для оценки склонности углей к внезапным выбросам**

Предложенный нами мультифрактальный подход может быть использован для оценки предрасположенности углей к внезапным выбросам угля и газа, происходящим при ведении горных работ на угольных шахтах и являющимся зачастую причиной подземных взрывов метана и других аварий с тяжелыми последствиями.

Для разделения углей на выбросоопасные и невыбросоопасные, как было продемонстрировано нами в работах [11-13], можно воспользоваться показателем разброса фрактальных свойств снимков поверхности угольных образцов  $\Delta_\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$  и информационным параметром  $\Delta_\infty = D_1 - D_\infty$ .

Величина  $\Delta_\alpha$  характеризует «контрастность» вероятностей заполнения ячеек. Чем больше  $\Delta_\alpha$ , тем больший разброс фрактальных свойств демонстрирует исследуемый образец угольного пласта. Величина  $\Delta_\infty = D_1 - D_\infty$  или ее оценка  $\Delta_Q = D_1 - D_Q$  (где  $Q$  — некоторое положительное достаточно большое значение параметра  $q$ , задаваемое в конкретных расчетах), занимает центральное место в информационной интерпретации мультифрактального формализма и, как было продемонстрировано уже выше, отражает степень упорядоченности и нарушения симметрии для общей конфигурации исследуемой структуры в целом.

В качестве примера на рис. 1 и 2 приведены микроизображения нескольких образцов выбросоопасных и невыбросоопасных углей и полученные по ним значения мультифрактальной характеристики  $\Delta_\alpha$ . Для разделения углей на выбросоопасные и невыбросоопасные использовались изображения образцов, имеющие масштаб, дающий информацию о размерах отдельных зерен угля с характерным размером от 0,5 до нескольких микрон (внутри таких зерен уже не может быть макропор и трещин, достаточно широких для фильтрации метана).

Для вычисления мультифрактальных спектров был использован метод обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа (МОЛГМА) [14]. Основным достоинством данного метода является то, что получаемые спектры фактически не зависят от способа разбиения изображения на ячейки.

Пороговое значение параметра  $\Delta_\alpha$ , позволяющее разделить выбросоопасные и невыбросоопасные угли, как продемонстрировано нами было в работе [11], составляет 1,5. Тогда, как видно из рис. 2, если  $\Delta_\alpha > \Delta_\alpha^{\text{пор}}$ , то можно сделать вывод, что образец принадлежит угольному пласту выбросоопасному по структурному фактору, а если, напротив,  $\Delta_\alpha < \Delta_\alpha^{\text{пор}}$ , то анализируемый образец, скорее всего, принадлежит

невыбросоопасному пласту.

Оценки выбросоопасности углей, полученные посредством мультифрактального анализа цифровых изображений их образцов, являются предварительными и дают информацию о склонности структуры угля к разрушению в виде газодинамического явления при соответствующих значениях горного и газового давления. Дальнейшие исследования в данном направлении позволят выделить угольные пласты или участки пластов со структурой, не склонной к лавинному самоподдерживающемуся разрушению, характерному для внезапных выбросов угля и газа.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ МК-6245.2012.5.

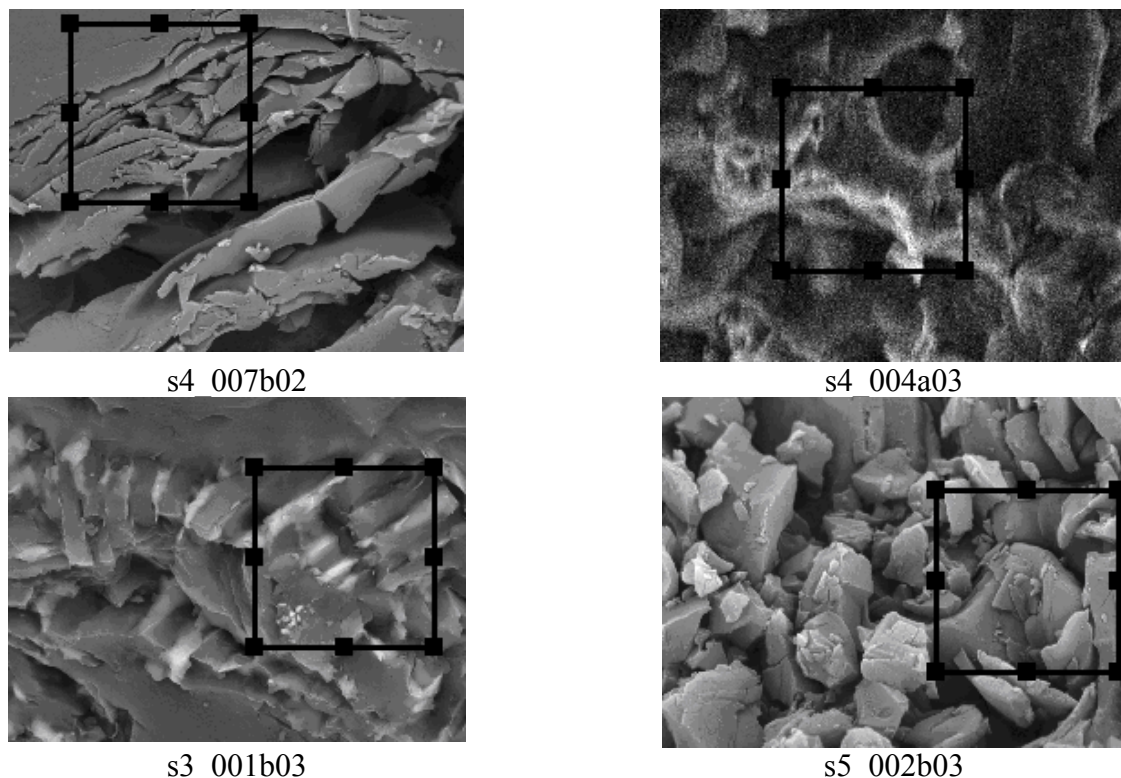


Рис. 1. Исходные изображения исследуемых образцов углей с выделенными на них областями интереса

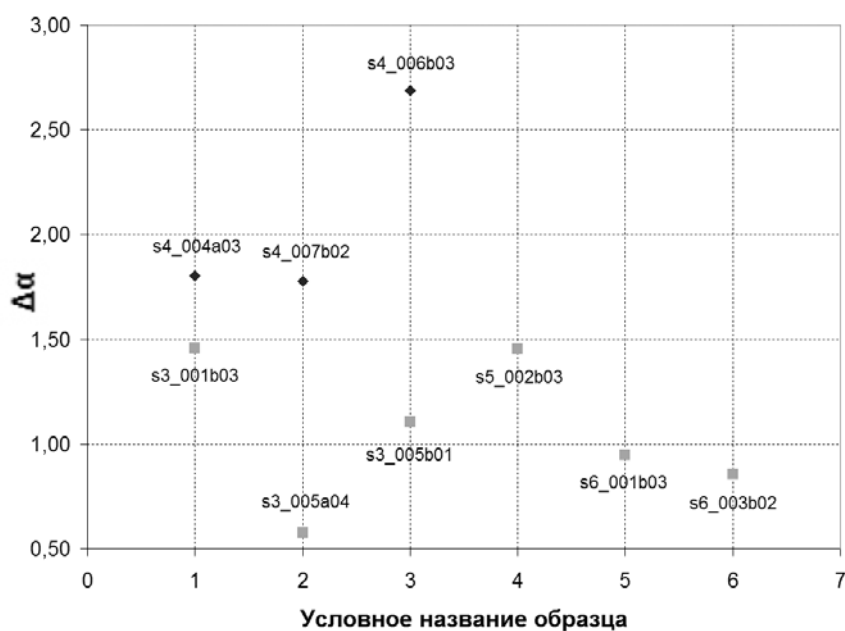


Рис. 2. Диаграмма значений параметра  $\Delta\alpha$  для исследуемых образцов углей: (◆ — выбросоопасные угли, ■ — невыбросоопасные угли)

## Литература

1. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality // *Phys. Rev. A.* — 1988. — Vol. 38. — № 1. — P. 364–374.
2. Макаров П.В., Смолин И.Ю., Стефанов Ю.П. и др. Нелинейная механика геоматериалов и геосред. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2007. — 235 с.
3. Булат А.Ф., Дырда В.И. Фракталы в геомеханике. — Киев: «Наукова книга», 2005. — 357 с.
4. Паламарчук Т.А., Скипочка С.И., Усаченко Б.М. и др. Кластерно-иерархические структуры в массиве горных пород как одна из форм самоорганизации породного массива // *Геотектоническая механика.* — № 83. — 2009. — С. 91–104.
5. Гольдин С.В. Деструкция литосферы и физическая мезомеханика // *Физ. мезомех.* 2002. — Т. 5. — № 5. — С. 5–22.
6. Учаев Дм.В., Малинников В.А., Учаев Д.В. Разработка фрактального подхода к исследованию пространственной структуры геосистем // Сборник статей по итогам международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр — XXI век», посвященной 230-летию основания МИИГАиК // Прил. к журналу Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». — 2009. — №1. — С. 60–65.
7. Учаев Д.В., Малинников В.А., Учаев Дм.В. и др. Применение мультифрактального анализа для обнаружения оползневых структур на аэрокосмических снимках // *Известия вузов. "Геодезия и аэрофотосъемка".* — 2008. — № 6. — С. 12–18.
8. Учаев Дм.В., Малинников В.А., Барталев С.А. и др. Методика оценки эффективности проведенных мероприятий по тушению крупных лесных пожаров посредством анализа фрактальными методами динамики роста пройденных огнем площадей // *Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка».* — 2010. — №6. — С. 59–63.
9. Астахов А.В., Белый А.А., Широчин Д.Л. Метаморфический ряд ископаемый углей и фрактальные параметры их структуры // *Химия твердого топлива.* – 2000. – №4. – С.15–24.
10. Малинникова О.Н., Учаев Дм.В., Учаев Д.В. Методика применения мультифрактального анализа для обнаружения особенностей структуры углей выбросоопасных пластов по их цифровым изображениям. Сборник статей по итогам международной научно-технической конференции посвященной 230-летию основания МИИГАиК. Выпуск 2. В 2-х частях. — Ч.1. — М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. — С. 23–27. (Приложение к журналу Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», № 6).
11. Трубецкой К.Н., Рубан А.Д., Викторов С.Д. и др. Фрактальная структура нарушенности каменных углей и их предрасположенность к газодинамическому разрушению // *Доклады Академии наук.* — 2010. — Т. 431. — № 6. — С. 818–821.
12. Малинникова О.Н., Учаев Дм.В., Учаев Д.В. Мультифрактальная оценка склонности угольных пластов к газодинамическим явлениям. БЕЗОПАСНОСТЬ: Отдельный выпуск / *Горн. Инф.-аналитич. бюлл. М.: Мир горной книги.* — 2009. — № 12. — С. 214–233.
13. Малинников В.А., Малинникова О.Н., Учаев Д.В. и др. Мультифрактальный подход к обнаружению особенностей структуры углей выбросоопасных пластов по их цифровым изображениям / В.А. Малинников, О.Н. Малинникова, Д.В. Учаев, Дм.В. Учаев. // *Матеріали II міжнар. конф. «Підземні катастрофи: моделі, прогноз, запобігання»*, 18–20 трав. 2011р. — Дніпропетровськ, 2011. — С. 68–78.
14. Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Дм.В. Разработка метода обобщенного локально-глобального мультифрактального анализа изображений для исследования пространственной структуры природно-антропогенных систем // *Известия вузов. "Геодезия и аэрофотосъемка".* — 2010. — № 4. — С. 64–68.