

УДК 622.236: 622.278

Л.И. Пимоненко, К.А. Безручко, С.Ю. Макеев,
А.А. Каргаполов, Д.П. Гуня

ПИМОНЕНКО ЛЮДМИЛА ИВАНОВНА – доктор геологических наук, ведущий научный сотрудник отдела геологии угольных месторождений (Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск).

E-mail: gvrvg@meta.ua 49000, Днепропетровск, ул. Симферопольская, д. 2 а.

БЕЗРУЧКО КОНСТАНТИН АНДРЕЕВИЧ – доктор геологических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом геологии угольных месторождений (Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск).

E-mail: gvrvg@meta.ua 49000, Днепропетровск, ул. Симферопольская, д. 2 а.

МАКЕЕВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела проблем разработки месторождений на больших глубинах (Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск).

E-mail: smakeev@ukr.net

КАРГАПОЛОВ АНДРЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ – ведущий инженер отдела геологии угольных месторождений (Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск). E-mail: k_andrey_61@mail.ru

ГУНЯ ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ – кандидат технических наук, заместитель директора (Публичное акционерное общество «Шахта им. А.Ф. Засядько», Донецк).

E-mail: zas_vtb@dn.farlep.net

Результаты мониторинга напряженно-деформированного состояния горного массива методами теории фрактальной геометрии

По результатам мониторинга состояния углепородного массива на различных участках отработки шахтного поля, проводимого с использованием многоканальной сейсмоакустической системы, разработанной польской компанией EMAG для шахты им. А.Ф. Засядько, рассчитаны показатели фрактальной размерности для трех добычных лав. Значения фрактальной размерности временных рядов сейсмоакустических явлений на различных участках обрабатываемого угольного пласта получены двумя методами: с использованием показателя Хаусдорфа и показателя Хёрста, что позволило их сравнить и установить высокую сходимость полученных результатов. Установлено влияние тектонических нарушений на изменение фрактальной размерности. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что величина фрактальной размерности сейсмоакустических явлений отражает степень нарушенности горного массива и может служить характеристикой

предрасположенности массива к динамическим явлениям. Сделан вывод о влиянии ранее проходивших деформаций на изменение трещиноватости. Установлено, что чем меньше фрактальная размерность, тем меньше сейсмоакустическая активность, характеризующая нарушенность массива. То есть при значениях фрактальной размерности менее чем 1,3 система находится в устойчивом состоянии. Если же фрактальная размерность превышает 1,6, то это можно рассматривать как неустойчивость системы и высокую вероятность ее перехода в нестабильное состояние, которое может перерасти в лавинообразный процесс. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов для различных временных интервалов. Использование этих данных может служить основой для разработки прогностических критериев геодинамической опасности проведения горных работ на угольных месторождениях Донбасса.

Ключевые слова: сейсмоакустическая эмиссия, фрактальная размерность, показатель Хёрста, геодинамическая опасность.

Введение

В настоящее время отечественными и зарубежными учеными, занимающимися проблемами геомеханики, сформулирована модель формирования опасных зон при добыче угля, в соответствии с которой воздействие техногенных процессов вызывает оживление деформационных процессов в массиве, окружающем выработку [4, 2, 21, 22]. Эти деформации сопровождаются сейсмическими и микросейсмическими событиями в широком диапазоне частот и энергий. Поэтому для получения прямой информации о напряженно-деформированном состоянии горного массива исследователями часто применяется мониторинг сейсмоакустических явлений. Однако вследствие большого количества разнообразных и изменяющихся в пространстве и времени параметров, характеризующих массив, в мировой практике недостаточно развиты математические модели, которые связывали бы текущие измеряемые величины с оценками «текущей» степени опасности.

В статье [15] утверждается, что исследование фрактальных характеристик пространственных рядов дает дополнительную информацию о распределении свойств пород по глубине залегания. Метод позволяет выделить характерные участки ряда по изменению угла наклона графика логарифмической зависимости длины ряда от шага измерения.

Авторами [16] сделан вывод, что применение фрактальных коэффициентов позволяет выполнять сравнение регионов с различной сейсмической обстановкой с целью выявления особенностей поведения траекторий миграции центров сейсмо-энерговыведения.

В работах [1, 10, 18] приведены теоретические исследования кинетического процесса накопления элементарных повреждений и изменения кластерной структуры как единого процесса пространственно-временной эволюции динамической системы. Авторами по методу нормированного размаха (метод Хёрста) для случайных процессов накопления элементарных повреждений установлена персистентность этого процесса, что свидетельствует о влиянии ранее проходивших деформаций на изменение трещиноватости.

Постановка задачи. До настоящего времени исследования сейсмоакустических событий при отработке угольных пластов методами фрактальной геометрии с целью прогноза газодинамических явлений проводились эпизодически. Поэтому целью данной статьи является определение и сравнение фрактальных коэффициентов при ведении добычных работ на участках шахты с различной геодинамической обстановкой.

Объект исследований. При ведении горных работ в шахтах происходят различные газодинамические явления: внезапные выбросы угля, пород и газа, горные удары, отжим призабойной части угольных пластов, выдавливания угля, внезапные поднятия пород почвы горных выработок, обрушения горных пород и угля, сползание вмещающих пород при отработке угольных пластов

крутого залегания, суфлярные выделения газа. Все эти явления создают различные по степени опасности ситуации при горных работах, приводят к травмированию горнорабочих, ухудшают технико-экономические показатели горных работ. Предотвращение перечисленных подземных опасных явлений невозможно без надежных методов прогноза. Общеизвестно, что существуют региональный, локальный и текущий прогнозы возникновения опасной ситуации. В этой статье с позиций теории фрактальной геометрии рассмотрен анализ временных рядов сейсмологических наблюдений при добыче угля на шахте им. А.Ф. Засядько за несколько лет, который осуществлялся с целью получения регионального и локального прогнозов опасности ведения работ.

Суть методов исследований. Исходя из того, что многие наблюдения над изменением природных процессов в течение времени приводят к временным зависимостям или рядам измерений, в настоящее время широкое распространение получили методы фрактального анализа, которые часто дают положительные результаты [5, 19, 23]. Одним из методов, наиболее известным своим практическим применением, является закон Рихтера–Гутенберга, рассматривающий зависимость между временем и энергией, накопленной при подвижках различных по величине тектонических блоков, применяемый для прогноза землетрясений и горных ударов [17, 20].

В анализе временных рядов часто используют показатель Хёрста. Эта величина уменьшается, когда задержка между двумя одинаковыми парами значений во временном ряду увеличивается. Показатель Хёрста H определяется в терминах асимптотического поведения масштабированного диапазона как функции отрезка времени временного ряда следующим образом [11]: $R/S = (n/2)^H$, где $R(n)$ – размах первых n значений ряда; $S(n)$ – дисперсия; n – количество точек в отрезке временного ряда. Для того чтобы точнее определить показатель, временной ряд должен быть достаточно длинным ($n \rightarrow \infty$).

Показатель Хёрста позволяет отличить случайный ряд от неслучайного. Если $0 < H \leq 1$, но не равно 0,5, то ряд является фракталом, поведение которого существенно отличается от случайных блужданий (броуновское движение) при $H = 0,5$. Последовательности, для которых $H > 0,5$, считаются персистентными – они сохраняют имеющуюся тенденцию, т.е. возрастание в прошлом более вероятно приводит к возрастанию в дальнейшем, и наоборот. При значении 0,5 явной тенденции не выражено, а при меньших значениях процесс характеризуется антиперсистентностью – любая тенденция стремится смениться противоположной [11].

Основная часть

Для определения состояния горного массива проводились наблюдения с применением многоканальной сейсмоакустической системы, разработанной польской компанией EMAG [8], включающей в себя датчики-геофоны, размещенные в выработках, каналы передачи сигналов и наземные регистрирующие модули. Данная система регистрирует сейсмические явления и определяет величину их энергии и координаты очага. Выполняется преобразование с помощью измерительных зондов скорости механических колебаний горного массива в электрический сигнал, а затем, после усиления и фильтрации – передача этих сигналов на поверхность в шахтную геофизическую станцию посредством кабельной сети связи. В поверхностной части системы происходит цифровая обработка сигналов и их компьютерная интерпретация. Получают временные ряды активности акустической эмиссии и распределения условной энергии сейсмоакустических явлений. В результате анализа данных статистическими методами должен осуществляться поиск аномальных значений параметров акустической эмиссии и предупреждение об опасных состояниях массива. Однако отсутствие газодинамических явлений в течение времени исследований не позволило выявить аномальные значения параметров, поэтому на основе полученных результатов наблюдений была составлена база данных, которая использовалась для изучения сейсмоакустического режима шахты, выделения беспокойных зон и динамики их развития с позиций фрактальной геометрии.

Осуществлялся контроль состояния массива при отработке 18 восточной лавы, восточной уклонной лавы (ВУЛ), 18 западной лавы и проходке буровзрывным способом 15 восточной «бис» лавы пласта m_3 . Схематический план шахтного поля и зарегистрированные сейсмоакустические явления в проекции на плоскость пласта приведены на рис. 1. По площади сейсмические явления различной интенсивности проявлялись крайне неравномерно как на отработанных, так и неотработанных участках. В течение месяца в среднем на шахте регистрируется 300–400 проявлений активности горного массива.

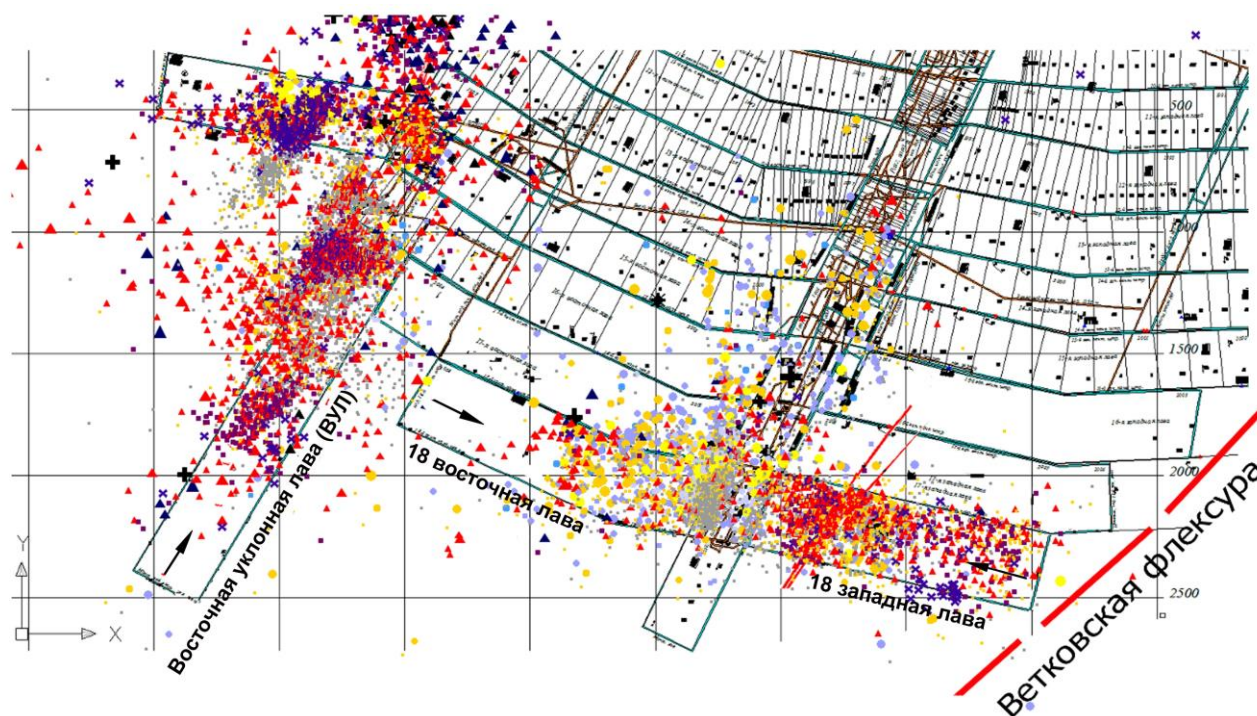


Рис. 1. Схематический план шахтного поля и сейсмоакустические явления различной величины энергии, зарегистрированные при отработке пласта m_3

Работы по пласту m_3 осуществлялись в чрезвычайно сложных горно-геологических условиях. 18 восточная лава отработывалась по простиранию пород, слева по ходу от нее находилось выработанное пространство 17 восточной лавы. ВУЛ проходила по восстанию, причем слева и справа от нее – нетронутый массив, осложненный мульдами и прогибами. 18 западная лава отработывалась по простиранию пород с пересечением зоны тектонических нарушений. Справа по ходу от нее находилось выработанное пространство 17 западной лавы. Параллельно с добычей угля велась проходка 15 восточной «бис» лавы слева по ходу от ВУЛ.

При отработке 18 восточной лавы регистрация сейсмоакустических (СА) явлений была начата с середины работы лавы, область их концентрации перемещалась вслед за подвиганием забоя. Формирование очагов при этом частично приурочено к шагу посадки основной кровли и частично – к перераспределению напряжений впереди забоя при очистных работах. Здесь, по мере отработки целика и уменьшения его геометрических размеров, происходило смещение концентрации напряжений в массиве от периферии к центру целика.

В начале отработки ВУЛ по мере подвигания забоя очаги сейсмической активности располагались, как правило, в его окрестностях. После того как была пройдена приблизительно одна треть от общей длины лавы, впереди забоя начала формироваться зона повышенной сейсмической активности, приуроченная к перегибам пласта. В последующем очаги выстроились в виде линии, отходящей примерно от середины лавы и ориентированной в сторону конвейерного ходка под углом около 45° . Затем зона концентрации СА явлений переориентировалась и сосредоточилась практически перпендикулярно линии забоя [6]. Область концентрации СА явлений при отработке 18 западной лавы приурочена к Ветковской структуре (на западе) и к зоне тектонических нарушений (на востоке).

Основой интерпретации полученных данных послужили два положения:

– в работах [9, 3] теоретически обосновано и подтверждено экспериментально, что основное количество сигналов акустической эмиссии связано с зарождением микротрещин, а интенсивность энергии акустического сигнала пропорциональна их амплитуде;

– углепородный массив шахты, как и Донбасса в целом, представляет собой мелкослоистую среду, состоящую из угольных пластов и вмещающих пород (аргиллитов, алевролитов, песчаников) различной мощности с различными по величине и генезису нарушениями. Вследствие протекания тектонофизических и механических процессов в массиве возникают иерархии неоднородностей, изменчивости строения, трещиноватости и блочности геологических материалов на различных масштабных уровнях, т.е. появляются самоподобные структуры. В зависимости от интенсивности напряжений воздействия возникает избирательный механизм включения в работу соответствующих неоднородностей и дефектов. Именно этот процесс самоорганизации массива (принцип Ле-Шателье), изменяющийся во времени и пространстве, отражают параметры дислокаций. Они характеризуют образовавшуюся в пределах участка исследований сложную самоподобную систему трещин, что позволяет использовать фрактальный анализ для интерпретации полученных данных [5].

Основным объектом исследований фрактального анализа являются совокупности точек, в нашем случае это точки, представляющие собой проекции на горизонтальную плоскость очагов сейсмоакустических явлений, происходящих в шахте при проведении горных работ.

Для количественной оценки напряженно-деформированного состояния горного массива на обрабатываемых участках полученные неоднородные распределения точек на плоскости представлены как недетерминированные (стохастические) мультифракталы [19]. Алгоритм вычисления фрактальной размерности основан на подсчете числа примитивов (клеток) необходимых для покрытия фрактала в зависимости от их размера. Мультифракталы описывают [23] с помощью спектра обобщенных размерностей D_q :

$$D_q = \frac{1}{1-q} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q}{\ln \varepsilon},$$

где q может принимать любые значения в интервале $-\infty < q < \infty$, $N(\varepsilon)$ – число заполненных ячеек, а p_i – вероятность попадания точки фрактала в ячейку размера ε .

Для практических целей чаще вычисляют Хаусдорфову размерность (D_0) методом разбиения на квадраты (box-counting method). В этом случае фрактал покрывается квадратами со стороной ε и подсчитывается число заполненных ячеек $N(\varepsilon)$. Затем сторона ячейки уменьшается в 2 раза, и фрактал покрывается заново. Данная операция производится до тех пор, пока размер ячейки ε не станет числом близким к нулю [19]. Фактически фрактальная размерность показывает, насколько плотно точки заполняют плоскость.

Расчеты выполнены с использованием программы «Image J» [14] и найдены значения фрактальной размерности для каждой из трех обрабатываемых лав. В данном случае фрактальная размерность выступает в качестве количественной характеристики нарушенности объекта и характеризует количество ячеек, заполненных СА сигналами (трещинами), вне зависимости от их параметров. Увеличение фрактальной размерности вызвано увеличением количества ячеек и отражает увеличение трещиноватости [7]. Величину фрактальной размерности определяли для каждой из лав в виде интегрального показателя, а также в динамике по мере перемещения забоя каждые два месяца для 18 восточной лавы, ВУЛ и 18 западной лавы в различных временных интервалах. Динамика изменения фрактальной размерности для каждой лавы представлена на рис. 2–4.

Во всех рисунках отмечается общая закономерность роста фрактальной размерности со временем работы лавы; кривые имеют волнообразный характер. Присутствующие на графиках спады и подъемы объясняются встречающимися при обработке геологическими нарушениями и особенностями строения пласта. Так, 18 восточная лава обрабатывалась вдоль простирания пород. На рис. 2 видно плавное увеличение значений фрактальной размерности D_0 с величины 1,02 до 1,39, связанное с уменьшением неотработанного целика и приближением к системе геологических нарушений. Так как исследования на этой лаве проводились не весь период ее обработки, а лишь несколько месяцев, то для нее приведен сравнительный анализ результатов временных интервалов только за 1 и 2 месяца, которые показывают цикличность обработки.

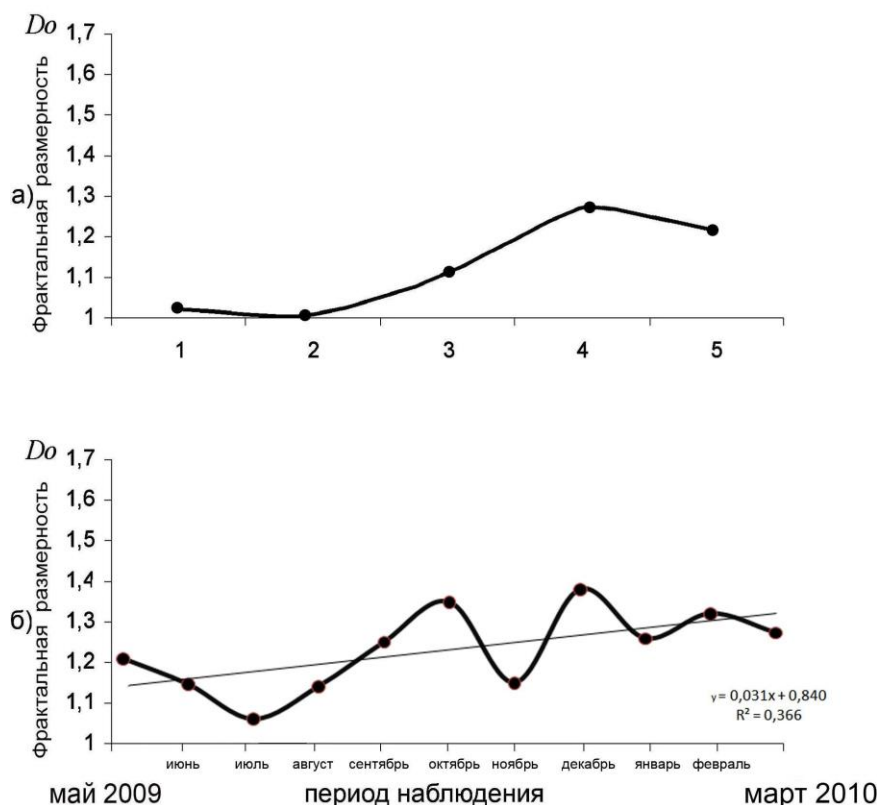


Рис. 2. Изменение фрактальной размерности во времени при отработке 18 восточной лавы. Расчётный интервал: а – 2 месяца; б – 1 месяц

ВУЛ обрабатывалась вкрест простирания пород почти два года; за это время величина D_0 изменялась волнообразно (рис. 3). Для начала работ характерно пониженное значение фрактальной размерности, дальнейшее ее плавное повышение в течение 4 месяцев связано с проседанием кровли и формированием в массиве напряжений, вызывающих увеличение нарушенности. Затем около 3 месяцев наблюдается спад сейсмоакустической активности. Понижение значений D_0 согласуется с зоной перегиба пласта. После этого следует относительно равномерное волнообразное изменение фрактальной размерности в течение около 6 месяцев. Последующее повышение D_0 до 1,49 объясняется уменьшением целика и приближением к области с интенсивно проводимыми взрывными работами. В последние полгода при завершении отработки лавы фрактальная размерность снижается на 20–25 % от максимальной, что говорит об уменьшении геодинамической активности. На рис. 3 приведено три графика, каждый из которых получен для своего временного интервала расчета D_0 . На рис. 3, а принят интервал 3 месяца, на рис. 3, б – 2 месяца, а рис. 3, в – 1 месяц. Сравнительный анализ результатов для различных временных интервалов показывает, что в породах кровли развиваются межслоевые циклические деформации, которые отчетливо (с определенным шагом) проявляются при отработке лавы.

18 западная лава начала обрабатываться вблизи Ветковской флексуры в зоне малоамплитудных дислокаций, что сказывается на относительно высоких значениях D_0 (1,22) уже в начале ее работы. По мере удаления от структуры значения фрактальной размерности плавно волнообразно повышались и достигли максимума 1,45 перед зоной геологического нарушения, а затем снизились при его пересечении (рис. 4). Сравнительный анализ результатов для различных временных интервалов здесь также показал наличие цикличности формирования деформаций.

Для всех лав характерно, что в конце работ происходило уменьшение D_0 , связанное с перераспределением и релаксацией напряженного состояния массива. Таким образом, анализируя динамику фрактальной размерности для всех лав, можно предположить, что наименее опасной является 18 восточная лава, в которой разгрузка происходила равномерно. Две другие лавы более опасные, ввиду большего влияния горно-геологических условий.

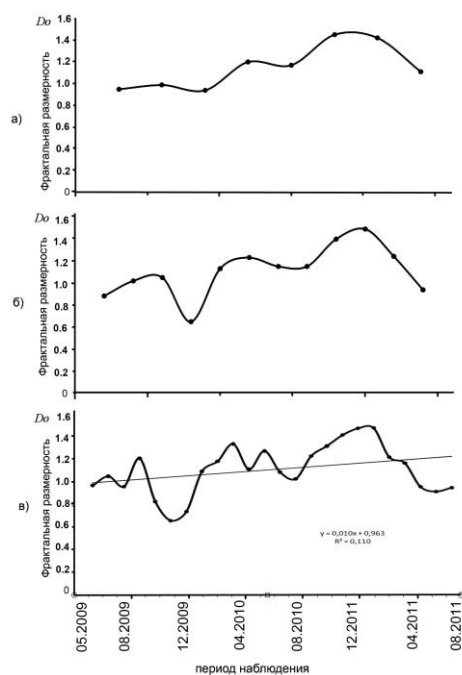


Рис. 3. Изменение фрактальной размерности в различных временных интервалах при отработке восточной уклонной лавы. Расчётный интервал: а – 3 месяца; б – 2 месяца; в – 1 месяц

Для всех лав выполнена линейная аппроксимация приведенных зависимостей фрактальных размерностей от времени и получены значения коэффициентов угла наклона прямых к оси абсцисс (см. рис. 2, б, 3, в, 4, в) по аналогии с методом Гуттенберга–Рихтера. Коэффициенты ненамного отличаются друг от друга (расхождение составляет 10 %). Это говорит об идентичности происходящих процессов в различных горно-геологических условиях отработки угольного пласта и правомерности использования аппарата фрактальной геометрии для сравнения геодинамической обстановки на различных участках шахты с последующим прогнозом степени опасности дальнейших горных работ на этих участках.

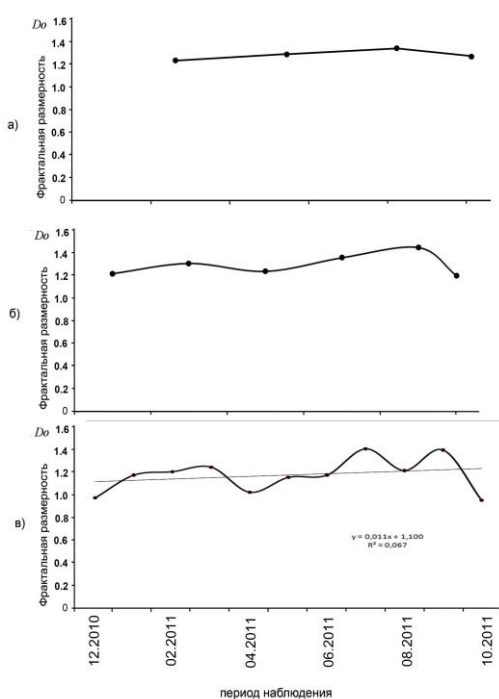


Рис. 4. Изменение фрактальной размерности в различных временных интервалах при отработке 18 западной лавы. Расчётный интервал: а – 3 месяца; б – 2 месяца; в – 1 месяц

В таблице приведено сравнение фрактальных размерностей для различных участков обработки пласта m_3 на шахте им. А.Ф. Засядько, полученных с использованием программы «Image J» и методом определения показателя Хёрста, который связан с размерностью Хаусдорфа-Безиковича D_0 (фрактальной размерностью) следующим соотношением [12]:

$$D_0 = 2 - H.$$

Интегральные показатели фрактальной размерности для обрабатываемых лав

Лава	Фрактальная размерность по Image J	Фрактальная размерность по Хёрсту	Показатель Хёрста H
18 восточная лава	1,26	1,51	0,49
Восточная уклонная лава	1,59	1,59	0,41
18 западная лава	1,46	1,47	0,53
Массив вблизи ВУЛ	1,17	–	–
15 восточная «бис» лава	1,58	1,62	0,38

Анализ интегральных фрактальных размерностей СА явлений, полученных с помощью программы Image J (см. таблицу), показал, что наименьшая величина $D_0 = 1,17$ отмечена в ненарушенном массиве и в менее нарушенной 18 восточной лаве ($D_0 = 1,26$). Очевидно, это связано с тем, что в неподроботанном массиве формируется небольшое количество природных трещин, в отличие от участков активного ведения горных и взрывных работ (15 восточная «бис» лава, где $D_0 = 1,58$). Рассчитанные интегральные показатели фрактальной размерности для отработанных лав показали, что большое количество и интенсивность СА приурочены к ВУЛ. Замеры напряженного состояния массива, полученные методом гидроразрыва, согласуются с полученными сейсмологическими данными. Так, для участка, расположенного на юго-западе ВУЛ (между зоной малоамплитудных нарушений и Григорьевским надвигом), характерно наибольшее сжатие, что косвенно подтверждается показателями работы поверхностных дегазационных скважин (ПДС). Конструкция ПДС и качество их обсадки, а также литолого-фациальные характеристики пород массива одинаковы, но дебит газа в зоне сжатия практически в два раза больше, чем к западу от ВУЛ.

Сравнивая результаты расчета фрактальных размерностей, полученных по показателю Хёрста, видим, что практически все значения совпадают с аналогичными, полученными по программе Image J, за исключением 18 восточной лавы. Причина здесь в том, что наблюдения в этой лаве осуществлялись не весь период времени, а только вторую половину ее работы. Полученный вывод подтверждается заключением авторов [11], что каждое наблюдение несет память о всех предшествующих событиях, и это не кратковременная память, которую называют «марковской». Это другая долговременная память, теоретически она сохраняется всегда. Последние события имеют более сильное влияние, чем события предыдущие. В долговременном масштабе система, которая дает статистику Хёрста, есть результат взаимодействия длинного потока взаимосвязанных событий.

Таким образом, результаты анализа показателя Хёрста свидетельствуют о влиянии (следовательно, и необходимости учета) начальных условий и процессов на активность угольного вещества. Также величина фрактальной размерности может служить индикатором количества факторов, влияющих на систему.

При фрактальной размерности менее 1,4 на систему влияет одна или несколько сил,двигающих систему в одном направлении (природные и техногенные процессы). Если размерность $D_0 = 1,5$, то силы, действующие на систему, разнонаправлены, но более или менее компенсируют друг друга. Поведение системы в этом случае является стохастическим и хорошо описывается классическими статистическими методами. Если же фрактальная размерность значительно больше 1,6, система становится неустойчивой и готова перейти в новое состояние [17].

В работе [3] установлено, что при выемке угля в породах кровли развиваются межслоевые циклические деформации, которые отчетливо (с определенным шагом) проявляются при отсутствии изменений геологического строения массива. При появлении впереди забоя каких-либо геологических неоднородностей (нарушений) происходит задержка деформаций и перераспределение наруше-

ний, приводящее к накоплению потенциальной энергии, определенное количество которой и является причиной выбросов угля и газа. Полученные нами результаты подтверждают эти данные.

Выводы

1. Для трех добычных лав шахты им. А.Ф. Засядько рассчитаны показатели фрактальной размерности с использованием методов Хаусдорфа и показателя Хёрста.
2. Установлено, что фрактальная размерность, характеризующая нарушенность массива, напрямую зависит от его сейсмоакустической активности.
3. Выполненный сравнительный анализ для различных временных интервалов показал наличие цикличности формирования деформаций в массиве при добыче угля на всех исследуемых участках.
4. Расчет фрактальной размерности методом Хёрста показал влияние начальных условий и процессов на сейсмоакустическую активность углепородного массива и необходимость их учета при прогнозе опасности динамических явлений.
5. Полученные результаты подтвердили выводы МакНИИ по безопасности в горной промышленности о развитии межслоевых циклических деформаций, которые проявляются при отсутствии изменений геологического строения массива.
6. Установлено, что величина фрактальной размерности временных рядов сейсмоакустических явлений отражает степень нарушенности горного массива и может служить характеристикой предрасположенности массива к разрушению. Чем меньше D_0 , тем меньше сейсмоакустическая активность, характеризующая нарушенность. То есть при малых D_0 образование дефектов находится в начальной стадии разрушения, а если фрактальная размерность растет, то приближается стадия окончательного разрушения массива, которая может перерасти в лавинообразный процесс.

Заключение

Впервые рассчитаны фрактальные размерности – D_0 (показатель Хаусдорфа) и H (показатель Хёрста) для сейсмологических наблюдений на различных участках обрабатываемого угольного пласта, что позволило сравнить их геодинамические условия. Установлено влияние тектонических нарушений на изменение фрактальной размерности. Использование этих данных может служить основой для разработки диагностических критериев геодинамической опасности при проведении горных работ на угольных месторождениях Донбасса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Д.В., Казунина Г.А. Вероятностный клеточный автомат для моделирования накопления элементарных повреждений в нагруженных материалах // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: тр. Междунар. конф. 6–9 окт. 2003. Новосибирск: Изд. ИГД СО РАН, 2004. С. 184–187.
2. Бодин В.В. О природе связи нелинейных сейсмических колебаний с напряженным состоянием тектонических нарушений // ГИАБ. 2013. № 3. С. 125–130.
3. Брюханов А.М., Коптиков В.П., Колчин Г.И., Никифоров А.В. Акустический контроль динамики напряженно-деформированного состояния горного массива // Горная геология, геомеханика и маркшейдерия: сб. науч. докл. Ч. II. Донецк: УкрНИМИ Украины, 2004. С. 459–463.
4. Булат А.Ф., Дырда В.И. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики // Геотехническая механика: сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. Вып. 108. Днепропетровск, 2013. С. 3–31.
5. Булат А.Ф., Дырда В.И. Фракталы в геомеханике. Киев.: Наук. думка, 2005. 358 с.
6. Булат А.Ф., Макеев С.Ю., Каргаполов А.А. и др. Контроль изменения состояния массива многоканальной сейсмоакустической системой на шахте им. А.Ф. Засядько // Геотехническая механика: сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. Вып. 88. Днепропетровск, 2010. С. 26–33.

7. Додис Я.М. Оценка фрактальной размерности разрушенного взрывом массива горных пород // Вестник КРСУ. 2002. № 2. С. 19–26.
8. Документация установки и обслуживания устройств системы ARAMIS M/E. Катовице: EMAG, 2005. 118 с.
9. Журков С.Н. Кинетическая концепция прочности твердых тел // Вестник АН СССР. 1968. № 3. С. 46–52.
10. Казунина Г.А. Моделирование кинетики накопления повреждений в нагруженных материалах с помощью вероятностных клеточных автоматов // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли: Труды Междунар. конф. 6-9 окт. 2003. Новосибирск: Изд. ИГД СО РАН, 2004. С. 193–194.
11. Калуш Ю.А., Логинов В.М. Показатель Хёрста и его скрытые свойства // Сиб. журн. индустр. матем. 2002. Вып. 4, т. 5. С. 29–37.
12. Кликушин Ю.Н. Метод фрактальной классификации сложных сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2000. Т. 4. С. 13–20.
13. Ключевский А.В., Зуев Ф.Л. Фрактальные оценки сейсмического процесса в литосфере Байкальского региона // Литосфера. 2011. № 1. С. 143–149.
14. Конюхов А.Л. Руководство к использованию программного комплекса ImageJ для обработки изображений: учеб.-метод. пособие. Томск: ТУСУР, 2012. 105 с.
15. Латышев О.Г., Карасев К.А., Мартюшов К.С. Фрактальный тренд-анализ изменчивости временных и пространственных рядов свойств пород и массивов // Горный журнал. 2013. № 2. С. 75–79.
16. Опарин В.Н., Потапов В.П., Харлампенков И.Е. Комбинированные методы обработки сейсмической информации для решения задач геосейсмологии крупного горнопромышленного региона // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. с участием иностранных ученых. Т. 1. Новосибирск: Ин-т горного дела СО РАН, 2012. С. 162–167.
17. Петухов А.В., Шелепов И.В., Петухов А.А., Куклин А.И. Степенной закон и принцип самоподобия при изучении трещиноватых нефтегазоносных коллекторов и гидравлическом моделировании процесса разработки // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7, № 2. [Электронный ресурс]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/3/33_2012.pdf (дата обращения: 11.07.2014).
18. Пимоненко Л.І., Бурчак О.В. Дослідження фрактальності просторово-часової еволюції вугільної речовини методом Хёрста // Наукові праці ДонНТУ. Серія "Гірничо-геологічна". 2011. Вип. 15. (192). С. 233–238.
19. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 254 с.
20. Пат. України № 86028 UA, МПК⁸ E21F 7/00, G01V 9/00. Спосіб визначення зон скупчення метану на невідпрацьованих ділянках шахт та ділянках розвідки / А.Ф. Булат, Л.І. Пимоненко, С.Ю. Макеев та ін.; № u201307349; заявл. 10.06.2013; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23/2013. 6 с.
21. Gueguen Y., Le Ravalec M., Ricard L. Upscaling: effective medium theory, numerical methods and the fractal dream. Pure and Appl. Geophys. 2006;(163);5/6:1175-1192.
22. Jiang Yu-hong, Huang Bao-tao. Hefei gongye daxue xuebao. Ziran kexue ban = J. Hefei Univ. Technol. Natur. Sci. 2009;(32)8:1265-1269.
23. Mandelbrot B.B. The Fractals Geometry of Nature. N 4. Freeman. San Francisco, 1982. 460 p.

Pimonenko L.I., Bezruchko K.A., Makeev S.Yu., Kargapolov A.A., Gunja D.P.

LUDMILA I. PIMONENKO, Doctor of Geology Sciences, Principal Researcher, Department of Geology of Coal Beds at Great Depths (N.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics, NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk), e-mail: gvrvg@meta.ua; KONSTANYIN A. BEZRUCHKO, Doctor of Geology Sciences, Head, Department of Geology of Coal Beds at Great Depths (N.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics, NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk), e-mail: gvrvg@meta.ua; SERGEY YU. MAKEEV, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Department of Mineral Mining at Great Depths (N.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics, NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk), e-mail: smakeev@ukr.net; ANDREY A. KARGAPOLOV, Principal Engineer, Department of Geology of Coal Beds at Great Depths (N.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk), e-mail: k_andrey_61@mail.ru; DMITRIY P. GUNJA, Candidate of Technical Sciences, Deputy Director (Public Joint-Stock Company A.F. Zasjadko Mine, Donetsk), e-mail: zas_vtb@dn.farlep.net

The monitoring of the tensely-deformed state of rock-mass by the methods of fractal geometry theory

The article presents the results of the monitoring of the coal-rock masses in various areas of the mine take carried out with the use of multichannel seismic-acoustic system designed by the Polish company EMAG for the A.F. Zasjadko Mine. The fractal dimensions have been calculated for three longwall outputs. The values of the fractal dimensions for the time series of seismo-acoustic occurrences in various sections of the exploited coal bed have been obtained by two methods: with the use of the Hausdorff index and that of the Hearst index, which makes it possible to compare them and identify a high convergence of the results. It has been established that the tectonic disturbances cause changes in the fractal dimension. The performed researches enable one to draw a conclusion that the size of the fractal dimension of the seismo-acoustic occurrences accounts for the degree of rock-mass disturbance and can testify to the predisposition of the rock massif to dynamic phenomena. A conclusion has been made that the deformations occurred earlier cause changes in cracking. It has been found that the smaller is the fractal dimension, the less is the seismo-acoustic activity entailing a fracturation of the massif. It means that the fractal dimension making up less than 1.3, the system is stable. If the fractal dimension exceeds 1.6, the system may be regarded as being unstable threatening with avalanche processes. A comparative analysis of the obtained results has been performed for different time intervals. The data can serve as the basis for the development of criteria to predict a geo-dynamic danger when working in the coal deposits of Donbas.

Key words: seismo-acoustic emission, fractal dimension, index of Hearst, geodynamic danger.

REFERENCES

1. Alekseev D.V., Kazunina G.A. Probabilistic cellular automat for the design of elementary damages accumulation in the loaded materials. Geodynamics and tense state of bowels of the Earth: Publications of the International conference October, 06-09. 2003. Novosibirsk, Edition. IMW SD RAS, 2004, p. 184-187. (in Russ.). [Alekseev D.V., Kazunina G.A. Veroyatnostnyj kletochnyj avtomat dlja modelirovaniya nakopleniya jelementarnyh povrezhdenij v nagruzhennyh materialah // Geodinamika i naprjazhennoe sostojanie nedr Zemli: Trudy Mezhdunar. konf. 06-09 okt. 2003 g. Novosibirsk: Izd. IGD SO RAN, 2004. S. 184-187].
2. Bodin V.V. About nature of connection for nonlinear seismic vibrations with the tense state of tectonic violations. SIAB. 2013;3:125-130. (in Russ.). [Bodin V.V. O prirode svjazi nelinejnyh sejsmicheskikh kolebanij s naprjazhennym sostojaniem tektonicheskikh narushenij // GIAB. 2013. № 3. S. 125-130].
3. Brjuhanov A.M., Koptikov V.P., Kolchin G.I., Nikiforov A.V. Acoustic control of dynamics for the tensely-deformed state of rock-mass. Mountain geology, geomechanics and surveyor: Collection of

- scientific lectures. Part 2. Donetsk, Ukr. SRI of Ukraine, 2004, p. 459-463. (in Russ.). [Brjuhanov A.M., Koptikov V.P., Kolchin G.I., Nikiforov A.V. Akusticheskij kontrol' dinamiki naprjazhenno-deformirovannogo sostojanija gornogo massiva. Gornaja geologija, geomehanika i markshejderija: Sb. nauch. dokladov. Ch. 2. Doneck: UkrNIMI Ukrainy, 2004. S. 459-463].
4. Bulat A.F., Dyrda V.I. Some problems of the gas-dynamic phenomena in a coal massif in the context of nonlinear non-equilibrium thermodynamics. *Geo-Technical mechanics: Collected Scientific Papers. Institute of geotechnical mechanics the name of N.S. Poljakov of Ukrainian NSA, Dnepropetrovsk, 2013. Prod. 108. P. 3-31. (in Russ.). [Bulat A.F., Dyrda V.I. Nekotorye problemy gazodinamicheskikh javlenij v ugol'nom massive v kontekste nelinejnoj neravnovesnoj termodinamiki. Geotehnicheskaja mehanika: Sb. nauch. trudov / In-t geotehnicheskoy mehaniki im. N.S. Poljakova NAN Ukrainy. Dnepropetrovsk, 2013. Vyp. 108. S. 3-31].*
 5. Bulat A.F., Dyrda V.I. Fractals in a geomechanics. Kiev, Scientific thought, 2005, 358 p. (in Russ.). [Bulat A.F., Dyrda V.I. Fraktaly v geomehanike. Kiev: Nauk. dumka, 2005. 358 s.]
 6. Bulat A.F., Makeev S. Ju., Kargapolov A.A. et al. The monitoring of rock array state by multichannel seismic acoustic system on a mine the name of A.F. Zasadko. *Geo-Technical mechanics: Collected Scientific Papers. Institute of geotechnical mechanics the name of N.S. Poljakov of Ukrainian NSA, Dnepropetrovsk, 2010, Prod. 88, p. 26-33. (in Russ.). [Bulat A.F., Makeev S. Yu., Kargapolov A.A. i dr. Kontrol' izmenenija sostojanija massiva mnogokanal'noj sejsmoakusticheskoy sistemoj na shahte im. A.F. Zasad'ko // Geotehnicheskaja mehanika: Sb. nauch. trudov / In-t geotehnicheskoy mehaniki im. N.S. Poljakova NAN Ukrainy. Dnepropetrovsk, 2010. Vyp. 88. S. 26-33].*
 7. Dodis Ja. M. An estimation of fractal dimension of rocks massif which destroyed by an explosion // *The Announcer KRSU. 2002;2:19-26. (in Russ.). [Dodis Ja.M. Ocenka fraktal'noj razmernosti razrushennogo vzryvom massiva gornyh porod // Vestnik KRSU. 2002. № 2. S. 19-26].*
 8. Documentation of setting and maintenance for devices of the system ARAMIS M/E. Katowice, EMAG, 2005, 118 p. (in Russ.). [Dokumentacija ustanovki i obsluzhivanija ustrojstv sistemy ARAMIS M/E. Katowice: EMAG, 2005. 118 s.]
 9. Zhurkov S.N. Kinetic conception of durability for solids. *The Announcer SA of SU. 1968;3:46-52. (in Russ.). [Zhurkov S.N. Kineticheskaja koncepcija prochnosti tverdyh tel // Vestnik AN SSSR. 1968. № 3. S. 46-52].*
 10. Kazunina G.A. Design of kinetics and accumulation of damages in the loaded materials by means of probabilistic cellular automats. *Geodynamics and tense state of bowels of the Earth: Publications of the International conference October, 06-09. 2003. Novosibirsk Publ. IMW SD RAS, 2004, p. 193-194. (in Russ.). [Kazunina G.A. Modelirovanie kinetiki nakoplenija povrezhdenij v nagruzhenykh materialah s pomoshh'ju veroyatnostnyh kletochnyh avtomatov // Geodinamika i naprjazhennoe sostojanie neдр Zemli: Trudy Mezhdunar. konf. 06-09 okt. 2003 g. Novosibirsk: Izd. IGD SO RAN, 2004. S. 193-194.]*
 11. Kalush Ju.A., Loginov V.M. An index of Hearst and his hidden properties, *The Siberian magazine of industrial mathematics. 2002;(4)5:29-37. (in Russ.). [Kalush Ju.A. Loginov V.M. Pokazatel' Hjorsta i ego skrytye svojstva // Sib. zhurn. industr. matem. 2002. Vyp. 4, t. 5. S. 29-37].*
 12. Klikushin Ju.N. A method of fractal classification for difficult signals, *Magazine of radio electronics. 2000;(4):13-20. (in Russ.). [Klikushin Ju.N. Metod fraktal'noj klassifikacii slozhnyh signalov // Zhurnal radiojelektroniki. 2000. T. 4. S. 13-20].*
 13. Kljuhevskij A.V., Zuev F.L. Fractal estimations of seismic process in the sial of the Baikal region. *Sial, 2011;1:143-149. (in Russ.). [Kljuhevskij A.V., Zuev F.L. Fraktal'nye ocenki sejsmicheskogo processa v litosfere Bajkal'skogo regiona // Litosfera. 2011. № 1. S. 143-149].*
 14. Konjuhov A.L. Guidance to drawing on a programmatic complex ImageJ for processing of images: Methodical train. Tomsk, TUSUR, 2012, 105 p. (in Russ.). [Konjuhov A.L. Rukovodstvo k ispol'zovaniju programmnoho kompleksa ImageJ dlja obrabotki izobrazhenij: Uchebnoe metodicheskoe posobie. Tomsk: TUSUR, 2012. 105 s.]
 15. Latyshev O.G., Karasev K.A., Martjushov K.S. A fractal trend-analysis of changeability for temporal and spatial rows of rocks and massifs properties. *The Mountain magazine. 2013;2:75-79. (in Russ.). [Latyshev O.G., Karasev K.A., Martjushov K.S. Fraktal'nyj trend-analiz izmenchivosti vremennyh i prostranstvennyh rjadov svojstv porod i massivov // Gornyj zhurnal. 2013. № 2. S. 75-79].*
 16. Oparin V.N., Potapov V.P., Harlampenkov I.E. Combined methods of seismic information treatment for the decision of tasks geo-seismic for large mining region. *The Fundamental problems of forming technogenic geo-environments: Labours of conference with participation foreign scientists. Vol. 1, Novosibirsk, Institute of mountain work by SD RAS, 2012, p. 162-167. (in Russ.). [Oparin V.N., Potapov V.P.,*

- Harlampenkov I.E. Kombinirovannye metody obrabotki sejsmicheskoj informacii dlja reshenija zadach geosejsmiki krupnogo gornopromyshlennogo regiona // Fundamental'nye problemy formirovanija tehnogennoj geosredy: Trudy konferencii s uchastiem inostrannyh uchenyh. T. 1. Novosibirsk: In-t gornogo dela SO RAN, 2012. S. 162-167].
17. Petuhov A.V., Shelepov I.V., Petuhov A.A., Kuklin A.I. A Degree law and principle of similarity to itself at the study of cracking oil-and-gas bearing collectors and hydraulic design of development. Oil and gas geology. Theory and practice. 2012;(7)2. [Electronic resource] URL: http://www.ngtp.ru/rub/3/33_2012.pdf (date of appeal 11.07.2014). (in Russ.). [Petuhov A.V., Shelepov I.V., Petuhov A.A., Kuklin A.I. Stepennoj zakon i princip samopodobija pri izuchenii treshhinovatyh neftegazonosnyh kollektorov i gidravlicheskom modelirovanii processa razrabotki // Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika. 2012. T. 7. № 2. [Elektronnyj resurs] URL: http://www.ngtp.ru/rub/3/33_2012.pdf (data obrashhenija: 11.07.2014)].
 18. Pymonenko L.I., Burchak O.V. Research of fractal for spatio-temporal evolution of coal substance by the method of Hearst. Scientific works of DonSTU. Series "Mining-and-geological". 2011. Prod. 15 (192), p. 233-238. (in Russ.). [Pymonenko L.I., Burchak O.V. Doslidzhennja fraktal'nosti prostorovo-chasovoi' evoljucii' vugil'noi' rehovyny metodom Hersta // Naukovi praci DonNTU. Serija "Girnycho-geologichna". 2011. Vyp. 15 (192). S. 233-238].
 19. Feder E. Fractals. M.: World, 1991, 254 p. (in Russ.). [Feder E. Fraktaly. M.: Mir, 1991. 254 s.].
 20. Patent of Ukraine 86028 UA, МПК⁸ E21F 7/00, G01V 9/00. Method of zones determination where accumulation of methane on the unexhaust areas of mines and areas of search. A.F. Bulat, L.I. Pymonenko, S.Ju. Makejev et al. N u201307349; declared 10.06.2013; published 10.12.2013, Bul. № 23/2013. 6 p. [Pat. Ukrai'ny № 86028 UA, MPK8 E21F 7/00, G01V 9/00. Sposib vyznachennja zon skupchennja metanu na nevidprac'ovanyh diljankah shaht ta diljankah rozvidky / A.F. Bulat, L.I. Pymonenko, S.Ju. Makejev ta in. № u201307349; zajavl. 10.06.2013; opubl. 10.12.2013, Bjul. № 23/2013. 6 s.].
 21. Gueguen Y., Le Ravalec M., Ricard L. Upscaling: effective medium theory, numerical methods and the fractal dream. Pure and Appl. Geophys. 2006;(163)5-6:1175-1192.
 22. Jiang Yu-hong, Huang Bao-tao. Hefei gongye daxue xuebao. Ziran kexue ban. J. Hefei Univ. Technol. Natur. Sci. 2009;(32)8:1265-1269.
 23. Mandelbrot B.B. The Fractals Geometry of Nature. N 4. Freeman. San Francisco, 1982, 460 p.