ЕКОЛОГІЧНА МІКРОМОРФОЛОГІЯ

УДК 631.42

А. К. Балалаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВЕННЫХ МИКРОСТРУКТУР ЕСТЕСТВЕННЫХ СТЕПНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ

О. К. Балалаєв
Дніпропетровський національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ФРАКТАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТОВИХ МІКРОСТРУКТУР ПРИРОДНИХ СТЕПОВИХ БІОГЕОЦЕНОЗІВ

Висвітлено, що пори ґрунтових агрегатів, а також порожнечі є фрактальні об'єкти. Обчислено значення фрактальної розмірності ґрунтових мікроструктур природних степових екосистем. Запропоновані різні підходи визначення і застосування фрактальної розмірності.

Ключові слова: фрактальна розмірність, мікроморфометрія, шліф, ґрунтові структури, агрегат, пора.

A.K. Balalayev
Dnipropetrovsk National University

THE FRACTAL PROPERTIES OF SOIL MICROSTRUCTURES NATURAL STEPPE ECOSYSTEMS

The soil aggregates and pores are fractal objects. Computer program calculates the fractal dimension for them.

Key words: fractal dimension, micromorphometry, microsection, soil structures, aggregate, pore.

Почвоведами давно замечено, что многие свойства почвы зависят от характера почвенной структуры (Вильямс, 1946; Качинский, 1965). В настоящее время вопросу изучения генезиса структуры, влияния ее на свойства почвы и в конечном счете на биогеоценоз в целом уделяется большое значение (Белова, 1997; Зубкова, Карпачевский, 2001). Считается общепризнанным, что плодородие тяжелых по механическому составу почв в большой степени зависит от их структуры. Характер структуры определяет физико-химический, биологический, а значит, и питательный режим почвы. Здесь особенно ценен микроморфологический подход к определению почвенной структуры. Однако до сих пор в изучении почвенного пространства имеется ряд трудностей. Одна из них заключается в том, что невозможно или, по крайней мере, достаточно сложно оценить визуально степень оструктуренности того или иного участка эдафотопа на различных глубинах почвенного профиля. Для решения этой проблемы экологами разработан ряд логико-лингвистических правил описания почвенной структуры (Парфенова, Ярилова, 1977; Белова, Травлеев, 1999). А между тем давно назрела необходимость в численной интегральной характеристике оструктуренности почвы и объективном методе ее вычисления. На предложенную роль вполне может претендовать фрактальная размерность, исчисленная по сканированным оцифрованным изображениям почвенных микрошлифов. Приведем аргументы в пользу выбора именно этой величины.

Фрактальные структуры часто представляют собой след хаотических нелинейных динамических процессов. Где бы в природе в результате хаотического процесса ни формировался тот или иной элемент природной среды (берег моря, атмосфера, геологический разлом или почвенные поры и агрегаты), повсюду с большой вероятностью можно обнаружить фракталы (в контуре береговой линии, форме облаков, конфигурации скальных образований или в особенностях почвенной структуры). Фрактал (Mandelbrot, 1982; Федер, 1991; Жиков, 1996) состоит из геометрических фрагментов различного размера и ориентации, но аналогичных по форме. Особенно примечателен тот факт, что на каждом уровне масштаба структура фрактала подобна структурам, наблюдаемым как в более крупных, так и в более мелких масштабах. Все фракталы обладают внутренним свойством самоподобия на разных уровнях. Рассматривая в микроскоп почвенный срез при различных увеличениях, можно заметить, что визуально мелкомасштабная структура почвенных срезов выглядит так же, как крупномасштабная. Разумеется, любой реальный объект может иметь свойства подобия лишь в ограниченном интервале масштабов. Сверху этот интервал ограничен размерами объекта как целого, а снизу, возможно, атомной или молекулярной структурой. Если интервал масштабов, в котором можно говорить о подобии, достаточно велик, то тогда описание свойств объекта в терминах теории фрактала оправдано. В физике фазовых переходов, где масштабная инвариантность хорошо изучена, для надежной оценки фрактальных свойств объектов необходим диапазон масштабов в 3 порядка. Есть предположения, что подобное соотношение сохраняется и в других областях. Оптическая микроскопия в своем дифракционном пределе обеспечивает такое перекрытие масштабов.

В зарубежных источниках можно найти информацию (Bale, Schmidt, 1984) о фрактальной поверхности микроскопических пор материалов, в частности бурого угля. Указывается также (Wong, Howard, Lin, 1985), что образцы песчаника и глинистых сланцев содержат фрактальные внутренние поверхности пор и фрактальная размерность зависит от типа породы. Авторы приходят к выводу, что такая структура связана с влиянием частиц глины. Правда, в обеих работах исследования проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа и методом измерения рассеяния рентгеновского или нейтронного излучения на малые углы, а значит, в гораздо меньших масштабах. Но это не означает, что фрактальные свойства исчезнут при увеличении масштаба. Основываясь на изложенных соображениях, можно предположить, что почвенные структуры и поровое пространство, по всей видимости, обладают фрактальными свойствами. Покажем это на примере исследования реальных природных объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При исследовании фрактальных свойств почвенных микроструктур мы использовали почвенные микрошлифы, изготовленные проф. Н.А. Беловой в лаборатории микроморфологии почв на кафедре геоботаники, почвоведения и экологии ДНУ .

Фракталы математикам известны давно. Еще в 1919 г. Ф. Хаусдорф определил понятие дробной размерности. Популярность за пределами математики в естественных науках фракталы нашли в последние 10-20 лет. Попытаемся кратко, не вдаваясь в излишние математические подробности, изложить сущность вопроса. Поскольку фрактал состоит из аналогичных друг другу структур и все более мелких деталей, его длина не поддается четкому определению. Если попытаться измерить длину фрактала с помощью линейки, то какие-то детали всегда окажутся меньше самого мелкого деления линейки. Поэтому с возрастанием разрешающей способности измерительного инструмента длина фрактала увеличивается. Так как длина фрактала не является представительной величиной, в математике вычисляется размерность фрактала, чтобы количественно оценить, как он заполняет пространство. Знакомое всем понятие размерности относится к классической, или евклидовой, геометрии, где линия имеет размерность 1, круг – размерность 2, сфера – размерность 3. Однако фракталы обладают не целой, а дробной размерностью. В то время как гладкая евклидова линия заполняет в точности одномерное пространство, фрактальная линия выходит за пределы одномерного пространства, вторгаясь в двумерное. Фрактальная линия, например контур морского берега, имеет размерность между 1 и 2. Аналогичным образом фрактальная поверхность, например горный рельеф, имеет размерность в пределах от 2 до 3. Чем больше размерность фрактала, тем больше вероятность, что заданная область пространства содержит фрагмент этого фрактала.

Возьмем геометрический объект произвольного размера и формы и нанесем на него квадратную сетку с заданным шагом. Посмотрим, как будет зависеть количество ячеек сетки, покрывающих объект, от размера ячейки l. Ясно, что при уменьшении l это число будет возрастать как $N(l) \cong 1/l^2$. Если рассмотреть покрытие не объекта, а его контура, то получим $N(l) \cong 1/l$. Оба соотношения имеют вид $N(l) \cong 1/l^D$, где D – размерность множества, характеризующая скорость увеличения числа ячеек покрытия при уменьшении их размера. Логарифмируя соотношение $N(l) \cong 1/l^D$ и устремляя к нулю, получаем

$$D = -\lim_{l \to 0} \frac{\log N(l)}{\log l}, \qquad (1)$$

где основание логарифма – произвольное.

Одним из классических геометрических фракталов является ковер Серпинского (рис. 1). В качестве примера он выбран не случайно. Дело в том, что его изображение было синтезировано на компьютере, которое впоследствии использовалось в роли тестового для определения погрешностей при вычислении фрактальной размерности. Ковер Серпинского строится очень просто. Исходный квадрат делится вертикальными и горизонтальными линиями на 9 равных частей, и средний квадрат вырезается. С каждым оставшимся квадратом процедура повторяется, и так до бесконечности. Ограничения цикла шестью шагами вполне достаточно для того, чтобы наглядно представить фрактал в печатном виде на страницах журнала и проверить правильность вычисления фрактальной размерности.

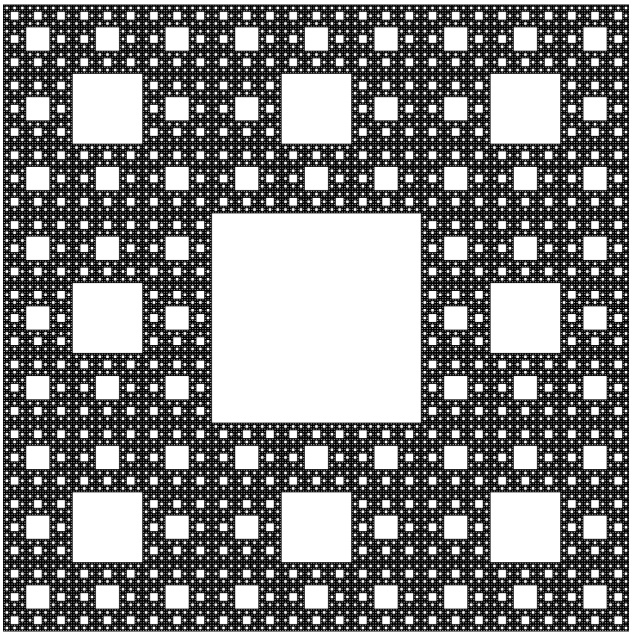


Рис. 1. **Ковер Серпинского**

Найдем истинную размерность или, как иногда называют математики, ёмкость ковра Серпинского. Если размер ячейки $l = 1/3$, то число ячеек покрытия N = 8, при уменьшении ячеек в 3 раза получаем $l = 1/9$ и N = 64 ячейки, и так далее: k-й уровень построения ассоциируется с покрытием ячейками размера $l = (1/3)^k$ в количестве $N(l) = 8^k$. Применяя формулу (1), получаем

$$D = -\lim_{k \to \infty} \frac{\log 8^k}{\log 3^{-k}} = \log_3 8 = 1{,}8927..$$

К опубликованной методике проведения вычислительного эксперимента (Балалаев, 2002) необходимо добавить несколько уточнений. Сканирование почвенных микрошлифов проводилось в проходящем свете (т.е. в режиме сканирования слайдов). При этом оцифрованное изображение получалось более четким и контрастным, что снимало многие проблемы, связанные с предварительной программной обработкой полутоновых изображений и их последующей бинаризацией. В итоге возросла надежность и точность полученных данных. Для вычисления значения фрактальной размерности изображения шлифа создана специальная компьютерная программа. Необходимо учитывать, что измерение фрактальной размерности различных геометрических объектов является не совсем корректной задачей, так как не существует точного определения самого понятия фрактальной размерности. К тому же, как правило, отсутствует необходимое количество исходных данных различных масштабов. Учитывая вышесказанное, вычисленное значение фрактальной размерности какого-либо образования является приближенной величиной, а методы ее измерения – косвенные и основываются на двух специфических свойствах фракталов.

Первый геометрический метод заключается в том, что изображение изучаемого объекта или его контура покрывается сеткой, состоящей из квадратов со стороной l_1 (Золотухин, 1998). Затем подсчитывается число квадратов, которым принадлежит объект или через которые проходит контурная кривая $N(l_1)$. Изменяя масштаб сетки и, следовательно, сторон квадрата, равных $l_2 > l_3 > ... > l_n$, каждый раз вновь подсчитывается число квадратов, составляющих объект или пересекающих кривую контура $N(l_2)$, $N(l_3)$ ... $N(l_n)$. Затем в двойных логарифмических координатах строится зависимость $N(l)$, по углу наклона которой и определяется фрактальная размерность. Этот метод лучше всего подходит для определения фрактальной размерности отшлифованных почвенных срезов.

Другой разновидностью геометрического метода является определение D из соотношения между характеристиками множеств с разной размерностью (Федер, 1991). Для объекта, ограниченного фрактальной границей, необходимо измерить площадь $S \propto R^2$ и длину периметра $L \propto R^D$, где R – характерный размер объекта. Из соотношения $S^{1/2} \propto R \propto L^{1/D}$ следует, что фрактальную размерность D границы объекта можно определить как тангенс угла наклона, зависимости квадрата периметра L^2 от площади S, построенной в двойных логарифмических координатах. Этот способ хорошо приспособлен для определения фрактальной размерности обособленных водопрочных почвенных агрегатов. В данном исследовании применяются оба подхода.

Помимо изображения ковра Серпинского в работе в качестве тестового используется изображение набора «правильных», с точки зрения евклидовой геометрии, фигур (рис. 2), а также изображение двумерного шумового сигнала, сгенерированного с помощью генератора случайных чисел (рис. 3), так как их фрактальная размерность известна и равна 2. Для изучения взяты шлифы почв степной целины (пробная площадь № 201) и почв, расположенных вблизи с. Попасное (рис. 4) на разных глубинах. Причем вычисляется фрактальная размерность почвенных структур и порового пространства в выборке из трех повторностей.

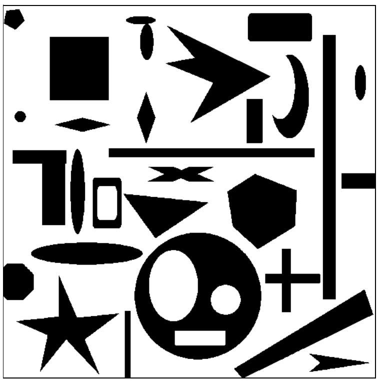


Рис. 2. **Тестовый набор геометрических объектов различной формы**

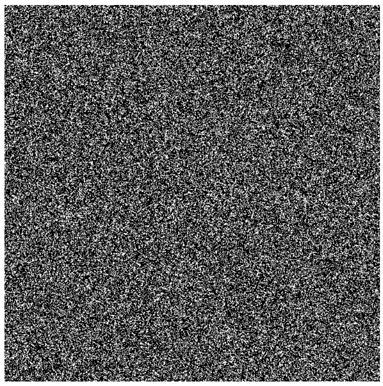
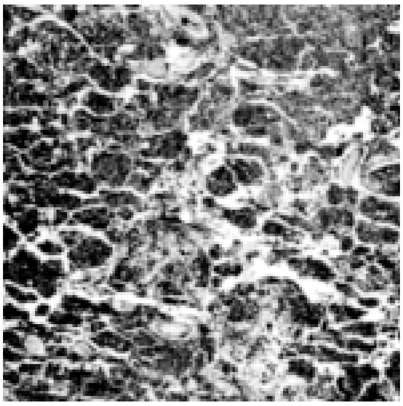


Рис. 3. **Тестовое изображение двумерного случайного поля**

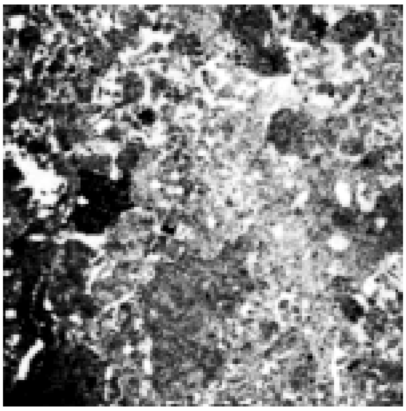
Для уменьшения вычислительных затрат и упрощения алгоритма все обрабатываемые изображения ограничены квадратным окном с размером 2^{10} (1024 × 1024) или 2^{11} (2048 × 2048) пикселей в зависимости от необходимой точности результатов. Машинное время расчетов на процессоре Intel Celeron 800 MHz колеблется от 40 секунд до 2,5 минут в зависимости от сложности и размеров изображения при условии, что все вычисления производятся в ОЗУ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тестовые испытания программа прошла успешно, вычислив следующие значения фрактальной размерности ковра Серпинского: 1,888 в сравнении с истинным 1,893, набора геометрических фигур – 1,985 и двумерного случайного поля – 1,986 против 2,000. Ошибку 0,01 - 0,02 можно считать вполне приемлемой, при этом программный алгоритм имеет склонность к занижению результатов.



а



б

Рис. 4. **Изображение микрошлифа:** *а* – почвенный разрез на глубине 0-5 см, *б* – на глубине 30-40 см, с. Попасное)

Результаты программной обработки микрошлифов черноземных почв (табл. 1) показали, что относительно изменений по вертикальному профилю наиболее значимой оказалась поровая фрактальная размерность. При этом ее значение уменьшается с увеличением глубины. Такую тенденцию можно объяснить тем, что с увеличением глубины уменьшается количество пор и их разветвленность. Следовательно, снижается заполняемость порами как геометрических объектов всего пространства шлифа, что и отражает фрактальная размерность. На рис. 4, где поры – светлые объекты, структуры – темные объекты, это хорошо наблюдается визуально. В этом аспекте характерным является тестовое изображение двумерного случайного поля (рис. 3), имеющего максимальную фрактальную размерность и соответственно очень высокую заполняемость пространства. Однако объекты этого поля не являются фракталами. Поэтому значение поровой фрактальной размерности почвенного пространства не зависит от степени оструктуренности и никогда не достигнет значения 2.

Таблица 1

Усредненные значения фрактальной размерности пор и структур эдафотопов на различных глубинах

Почва	Глубина, см	Фрактальная размерность	
		структуры	поры
Чернозем обыкновенный (ПП № 201-Н)	0-2	1,742	1,656
	46-65	1,779	1,612*
Чернозем обыкновенный лесоулучшенный (окрестности с. Попасного, ПП № 203-Н)	0-5	1,751	1,635
	30-40	1,758	1,612*

* Различие достоверно при уровне значимости 0,05.

Малую информативность структурной фрактальной размерности можно объяснить сложностями, связанными с выделением наиболее экологически важных почвенных агрегатов, количество и форма которых также уменьшается с нарастанием глубины.

Однако программа часто относит к почвенным структурам и другие образования, которые имеются на различных глубинах в достаточном количестве. В качестве подтверждения этой мысли был проведен вычислительный эксперимент, в котором участвовали только выделенные по специальной методике из всей почвенной массы водопрочные почвенные агрегаты.

Результаты расчетов фрактальной размерности водопрочных почвенных агрегатов методом сравнения их площади и квадрата периметра приведены в виде графика (рис. 5).

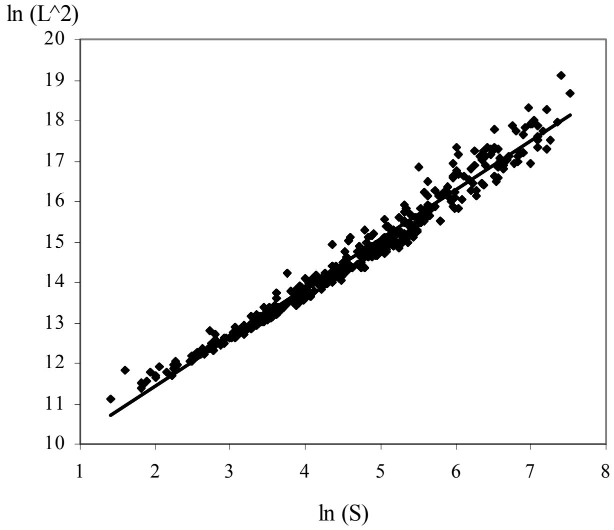


Рис. 5. **Зависимость квадрата периметра от площади в двойных логарифмических координатах водоустойчивых агрегатов почв пробной площади № 201**

Тангенс угла наклона прямой и, следовательно, фрактальная размерность равна 1,218. Необходимо отметить, что для построения графика использовались числа не одного агрегата при различных увеличениях, а большого количества агрегатов разных размеров в одном масштабе. Обращает на себя внимание то, что при внушительном объеме выборки n = 385, приличном разбросе линейных размеров (0,055 - 2,77 мм) на 2 порядка и площадей (0,004 - 1,848 мм^2) на 3 порядка и кажущемся бесконечным разнообразии форм агрегаты выстраиваются вдоль прямой линии. Этот признак является типичным для фракталов. Наблюдаемый разброс данных можно объяснить неизбежными погрешностями в выделении границ агрегата на общем фоне, хотя для окончательного вывода потребуется проведение дополнительных экспериментов, направленных на изучение почвенных частиц меньших размеров с целью увеличения интервала масштабов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный количественный анализ структур и пор степных почв на различных глубинах показал, что они имеют специфическую фрактальную геометрию. Фрактальная размерность – относительная величина. Ее изменения даже на десятые доли будут информативны. С увеличением глубины поровая фрактальная размерность уменьшается. Разумно предположить, что высокое значение этой величины является признаком оструктуренности почвы. По всей видимости, нахождение фрактальной размерности всего почвенного шлифа в целом не совсем корректно, так как эта величина по своей сущности мультифрактальна, т. е. складывается из фрактальных свойств составляющих шлиф объектов. Более убедительным является путь выделения отдельных объектов (пор или агрегатов) с последующим определением фрактальной размерности каждого объекта. И хотя некоторые моменты могут быть спорными, не остается сомнений в том, что необходимо углубление и расширение исследований в этом направлении. В частности, интересно изучение фрактальных свойств различных типов почв естественных биогеоценозов и агроценозов. Остается невыясненным также вопрос, изменяются ли фрактальные свойства трехмерного порового пространства и если изменяются, то как при переходе к двумерным почвенным срезам?

Фракталоподобные структуры играют важную роль в функционировании почвы как биокосного природного тела. Благодаря им многократно увеличивается площадь активной поверхности, на которой и происходят основные почвенные процессы.

Осознание факта существования фрактальных поверхностей у почвенных систем существенно влияет на наше представление о процессах, происходящих в эдафотопах, связанных со свойствами поверхностей, такими, как водные, воздушные и тепловые режимы, а также особенности функционирования почвенной биоты.

В природе происходит огромное количество процессов, и подавляющее большинство из них – процессы динамические. Почвенные процессы не являются исключением. Они отличаются от многих других быстроизменяющихся процессов лишь временем наблюдения, которое составляет миллионы лет. В этом заключается главная трудность и в то же время повышенный интерес к изучению рассматриваемых явлений. Почвенные структуры являются как бы застывшим современным срезом тех давних событий. Фрактальные структуры в почвенной экосистеме – это результат медленной динамики почвообразовательных процессов и эволюции на Земле. Можно предположить, что эти процессы, подобно другим процессам, порождающим фрактальные структуры, демонстрируют детерминированный хаос. Действительно, хаотическая динамика дает много функциональных преимуществ. Из нелинейной динамики известно (Шустер, 1989; Берже и др., 1991; Кузнецов, 2001), что хаотические системы способны работать в широком диапазоне условий и поэтому легко адаптируются к изменениям. Эта пластичность позволяет почвенным экосистемам приспосабливаться и выживать в условиях непредсказуемой и изменчивой внешней среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Балалаев А.К. Опыт применения компьютерных технологий в морфометрических исследованиях почвенных микрошлифов // Ґрунтознавство. – 2002. – Т. 2, № 1-2. – С. 88-69.

Белова Н.А. Экология, микроморфология, антропогенез лесных почв степной зоны Украины. – Д.: Изд-во ДГУ, 1997. – 264 с.

Белова Н.А., Травлеев А.П. Естественные леса и степные почвы. – Д.: Изд-во ДГУ, 1999. – 348 с.

Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. – М.: Мир, 1991. – 368 с.

Вильямс В.Р. Почвоведение. – М.: Сельхозгиз, 1946. – 456 с.

Жиков В.В. Фракталы // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 12. – С. 109-117.

Золотухин И.В. Фракталы в физике твердого тела // Там же. – 1998. – № 7. – С. 108-113

Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. – М.: Русаки, 2001. – 296 с.

Качинский Н.А. Физика почв. – М.: Высш. шк., 1965. – 323 с.

Кузнецов С.П. Динамический хаос. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2001. – 296 с.

Парфенова Е.И., Ярилова Е.А. Руководство к микроморфологическим исследованиям в почвоведении. – М.: Наука, 1977. – 197 с.

Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.

Шустер Г. Детерминированный хаос. – М.: Мир, 1989. – 240 с.

Bale H.D., Schmidt P.W. Small-angle X-ray-scattering investigation of submicroscopic porocity with fractal properties // Phys. Rev. Lett. – 1984. – 53. – P. 596-599.

Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. – N.-Y.: Freeman, 1982. – 312 p.

Wong P.Z., Howard J., Lin J.S. Surface roughening and the fractal nature of rocks // Schlumberger-Dell Research Preprint. – 1985. – 252 p.

Надійшла до редколегії 15.01.03