

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ОВРАЖНО-БАЛОЧНОЙ СЕТИ ГОРОДА САРАТОВА

*А.В. Иванов, А.А. Короновский, И.М. Минюхин, И.А. Яшков*

В работе рассмотрена задача вычисления фрактальной размерности самоподобных структур природного происхождения, описаны различия в подходах к фрактальному анализу абстрактных математических фракталов и реальных фракталов, для вычисления емкостной размерности которых необходимо применение численного алгоритма. Предложен метод нахождения размерности, позволяющий избежать неопределенности в выборе участка аппроксимации зависимости числа ячеек покрытия от размера ячейки. Данный метод применяется как для модельных фракталов с известным значением размерности, так и для природных фракталов (овражно-балочной сети города Саратова)

### Введение

В последнее время все большую актуальность приобретают междисциплинарные исследования [1]. В частности, в современной системе наук о Земле исследования все чаще проводятся на стыке различных научных направлений. Для комплексной оценки современного состояния различных природных структур необходимо проводить исследования с использованием инструмента не только классических научных методик, разработанных и апробированных в системе наук о Земле, но и новейших физических, математических, компьютерных знаний и технологий, которые позволяют моделировать и прогнозировать возможные тенденции в изменении структуры и свойств природных объектов. Одним из таких инструментов, позволяющих анализировать современное состояние природных объектов, обусловленность их развития геолого-географическими особенностями территории и антропогенной нагрузкой, является фрактальный анализ. Данный метод позволяет оценить характер самоподобия природного объекта, раскрыть его фрактальные свойства. Подобный подход может быть применен к геолого-геоморфологическим структурам (в частно-

сти, для описания овражно-балочной сети<sup>1</sup>), демонстрирующим свойства самоподобия в относительно широком диапазоне характерных масштабов.

Изучение овражно-балочной сети (ОБС) с позиций теории фракталов является предметом специального исследования [2]. В русскоязычной литературе изучение собственно ОБС нами не встречено, хотя подобные работы по изучению фрактальной структуры природных объектов (в частности, речных бассейнов) описаны как в отечественных [3, 4], так и в зарубежных журналах [5–7]. Среди перечисленной литературы стоит отметить работу [8], в которой описывается применение фрактального метода в изучении эрозионной сети города Рио-де-Жанейро (Бразилия). Как правило, в вышеупомянутых работах осуществляется расчет емкостной фрактальной размерности [9, 10]. Получающееся при этом число трактуют как фрактальную размерность исследуемого природного объекта и интерпретируют его с точки зрения наук о Земле. В подавляющем большинстве работ, посвященных изучению фрактальной размерности природных объектов, авторы не акцентируют особое внимание на том факте, что строгое определение фрактальной размерности применимо для абстрактных математических множеств, демонстрирующих фрактальные свойства на бесконечном интервале характерных масштабов, в то время как природные объекты, являясь естественными фракталами, демонстрируют свойства самоподобия на ограниченном интервале пространственных масштабов. Соответственно, методы расчета фрактальной размерности, которые дают корректные результаты для абстрактных математических фракталов [10, 11], могут приводить к неточным (а порой и ошибочным) результатам для естественных фрактальных объектов, встречающихся в природе.

Целью настоящей работы является изучение фрактальных свойств природных объектов на примере ОБС города Саратова. Такие исследования, помимо теоретического интереса, стимулированы практической необходимостью. В последнее время становится очевидной потребность в тщательном анализе геоэкологических опасностей, провоцируемых человеком посредством изменения геолого-географических объектов и процессов (в том числе и ОБС) на территориях городов. Саратов, к сожалению для его жителей, является показательным полигоном для таких исследований. В разделе 1 работы показано, что простое применение традиционного алгоритма вычисления емкостной размерности для природных объектов приводит к неоднозначным результатам и, как следствие, к невозможности корректного определения величины фрактальной размерности. Затем, в разделе 2 предложен метод, позволяющий корректно определить фрактальную размерность как абстрактных математических фракталов, так и природных объектов. Полученный метод использован в разделе 3 для определения фрактальной размерности ОБС города Саратова.

## **1. Определение фрактальной размерности для природных объектов с помощью традиционного метода**

Начнем рассмотрение с определения фрактальной размерности природной пространственно самоподобной структуры. В качестве объекта исследования выберем ОБС Елшанского ландшафтного района Саратова (рис. 1).

<sup>1</sup>Под овражно-балочной сетью авторы понимают систему оврагов и балок, а также их более мелких аналогов – ложбин и промоин.

Из рисунка видно, что ОБС, по всей видимости, действительно обладает фрактальными свойствами, и, следовательно, можно попытаться охарактеризовать ее с помощью фрактальной размерности. Традиционный способ расчета емкостной размерности заключается в том, что исследуемый объект покрывается сеткой с размером ячейки  $\varepsilon$  и подсчитывается количество ячеек сетки  $N(\varepsilon)$ , покрывающих изучаемый объект. С уменьшением размера  $\varepsilon$  ячейки сетки количество ячеек  $N(\varepsilon)$ , покрывающих объект, увеличивается. Емкостная размерность объекта определяется как

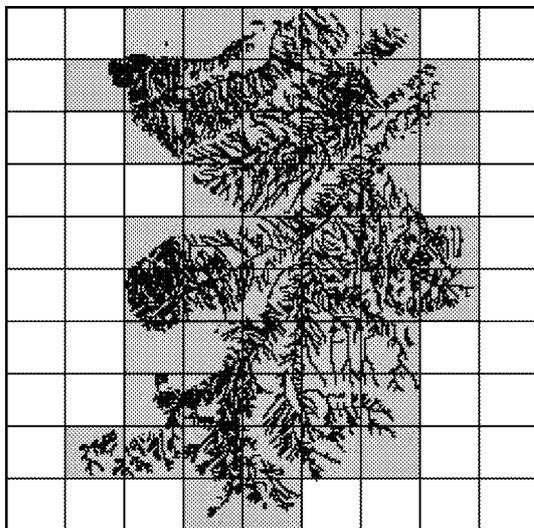


Рис. 1. Структура ОБС Елшанского ландшафтного района города Саратова [12], покрытая квадратной сеткой с размером ячейки  $\varepsilon$  (ячейки, покрывающие фрактал, показаны серым цветом)

В силу того, что для природного фрактала интервал самоподобия ограничен, размер ячейки покрытия для него может варьироваться в определенном диапазоне, максимальное значение которого определяется размерами объекта, а минимальное – его элементарным структурным элементом (в случае ОБС – размерами ее оцифрованной карты и минимальным элементом изображения (пикселом), соответственно). Таким образом, формула (1) для ОБС неприменима, и для оценки ее фрактальной размерности необходимо применение численного алгоритма, который заключается в получении зависимости числа ячеек покрытия фрактала от размера ячейки, выделении на ней линейного участка (в двойном логарифмическом масштабе) и аппроксимации зависимости на этом участке линейной функцией. Параметры аппроксимирующей прямой при этом вычисляются методом наименьших квадратов, а емкостная размерность фрактала определяется угловым коэффициентом прямой. Наибольшие затруднения при этом вызывает выбор участка аппроксимации, которому соответствует степенная (в двойном логарифмическом масштабе – линейная) зависимость между размером ячейки сетки покрытия и числом ячеек. Как уже отмечалось ранее, это связано с неидеальностью природных фракталов (ограниченным пространственным интервалом самоподобия). Кроме того, природные структуры неоднородны, что также осложняет их фрактальный анализ.

$$D = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\lg N(\varepsilon)}{\lg \varepsilon}. \quad (1)$$

При исследовании ОБС Елшанского ландшафтного района города Саратова была получена зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки, изображенная в двойном логарифмическом масштабе на рис. 2, а. Как видно из рисунка, на графике этой зависимости можно визуально выделить линейный участок (например, участок, обозначенный как 1-2) и определить для него фрактальную размерность как модуль углового коэффициента аппроксимирующей зависимость  $N(\varepsilon)$  прямой ( $D_{1-2} \approx 1.66$ ). Однако при выборе другого участка (участок 2-3 на рисунке), внешне ничем не отличающегося по своим свойствам от первого, такого же «линейного», получается другое значение фрактальной размерности ( $D_{2-3} \approx 1.59$ ), причем раз-

турным элементом (в случае ОБС – размерами ее оцифрованной карты и минимальным элементом изображения (пикселом), соответственно). Таким образом, формула (1) для ОБС неприменима, и для оценки ее фрактальной размерности необходимо применение численного алгоритма, который заключается в получении зависимости числа ячеек покрытия фрактала от размера ячейки, выделении на ней линейного участка (в двойном логарифмическом масштабе) и аппроксимации зависимости на этом участке линейной функцией. Параметры аппроксимирующей прямой при этом вычисляются методом наименьших квадратов, а емкостная размерность фрактала определяется угловым коэффициентом прямой. Наибольшие затруднения при этом вызывает выбор участка аппроксимации, которому соответствует степенная (в двойном логарифмическом масштабе – линейная) зависимость между размером ячейки сетки покрытия и числом ячеек. Как уже отмечалось ранее, это связано с неидеальностью природных фракталов (ограниченным пространственным интервалом самоподобия). Кроме того, природные структуры неоднородны, что также осложняет их фрактальный анализ.

При исследовании ОБС Елшанского ландшафтного района города Саратова была получена зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки, изображенная в двойном логарифмическом масштабе на рис. 2, а. Как видно из рисунка, на графике этой зависимости можно визуально выделить линейный участок (например, участок, обозначенный как 1-2) и определить для него фрактальную размерность как модуль углового коэффициента аппроксимирующей зависимость  $N(\varepsilon)$  прямой ( $D_{1-2} \approx 1.66$ ). Однако при выборе другого участка (участок 2-3 на рисунке), внешне ничем не отличающегося по своим свойствам от первого, такого же «линейного», получается другое значение фрактальной размерности ( $D_{2-3} \approx 1.59$ ), причем раз-

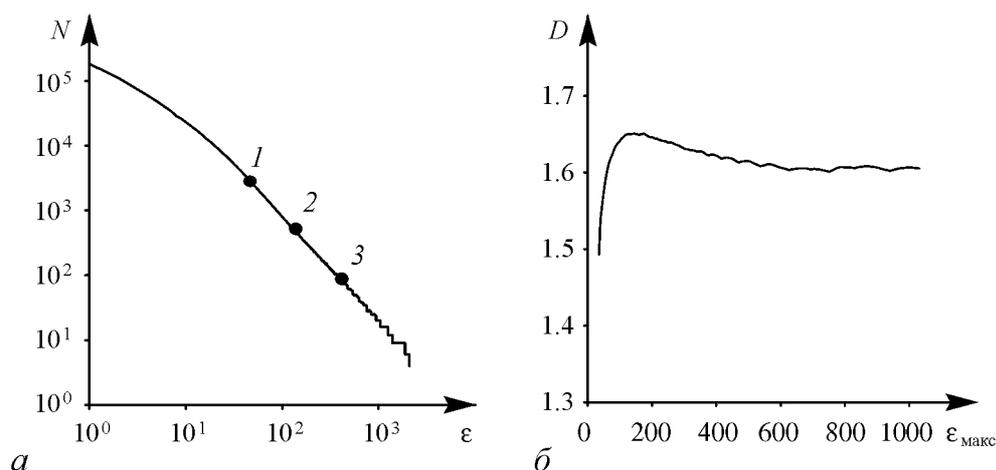


Рис. 2. Зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки для ОБС Елшанского ландшафтного района Саратова, построенная в двойном логарифмическом масштабе (емкостная размерность, вычисленная на участках 1-2 и 2-3, равна соответственно 1.66 и 1.59) (а), и зависимость емкостной размерности ОБС от максимального значения ячейки покрытия при  $\varepsilon_{\min} = 30$  (б)

ница значений размерностей для различных участков аппроксимации значительно превосходит погрешность метода наименьших квадратов. Это обстоятельство не позволяет однозначно определить значение размерности с точностью, достаточной для фрактального анализа ОБС, а позволяет только говорить о некотором интервале значений размерности, зависящем от выбора участков аппроксимации (то есть от выбора диапазона характерных масштабов, на котором исследуемый объект считается самоподобным). Действительно, на рис. 2, б показана зависимость величины фрактальной размерности  $D$ , определенной как угол наклона аппроксимирующей прямой зависимости  $N(\varepsilon)$  (в двойном логарифмическом масштабе), от максимального значения участка аппроксимации  $\varepsilon_{\max}$ . Начальная точка линейного участка была выбрана как  $\varepsilon_{\min} = 30$ . Отчетливо видно, что величина фрактальной размерности существенным образом зависит от выбора используемого участка, а следовательно, традиционный метод определения фрактальной размерности (достаточно часто используемый при анализе фрактального строения ландшафтов, речных систем, овражно-балочных сетей и т.п., см. например [3, 4, 8, 13]) непригоден для природных объектов, и для их корректного фрактального анализа необходима разработка особых методик, учитывающих особенности природных самоподобных структур, о которых было сказано выше.

## 2. Метод расчета фрактальной размерности для природных объектов

Итак, как было показано выше, величина фрактальной размерности  $D$  существенным образом зависит от выбора участка, на котором она вычисляется. Соответственно, возникает необходимость выбора одного значения величины  $D$  из некоторого набора получающихся значений<sup>2</sup>. Одним из возможных вариантов является

<sup>2</sup>В принципе, возможен и другой вариант: можно пытаться рассматривать все множество полученных значений величины  $D$  как некоторую характеристику фрактального объекта. Однако подобный подход существенно затрудняет анализ таких систем и тяжело реализуем на практике.

следующий: можно отыскать некоторое множество отрезков на графике зависимости  $D(\varepsilon)$  в двойном логарифмическом масштабе, использование которых для определения величины фрактальной размерности позволяет получить множество значений  $D$ , не сильно отличающихся друг от друга, и использовать усредненную по этому множеству величину  $\langle D \rangle$  как характеристику самоподобного объекта.

Будем характеризовать отрезок, используемый для вычисления величины фрактальной размерности, двумя числами: максимальным и минимальным размерами ячеек покрытия ( $\varepsilon_{\max}$  и  $\varepsilon_{\min}$ , соответственно). Зафиксируем значение величины  $\varepsilon_{\min}$  и будем строить зависимость величины фрактальной размерности  $D(\varepsilon_{\max})$ . В этом случае на графике зависимости  $D(\varepsilon_{\max})$  искомый диапазон значений  $\varepsilon_{\max}$ , необходимый для определения величины  $\langle D \rangle$ , будет выглядеть как горизонтальный линейный участок<sup>3</sup>. Поскольку при выборе величины  $\varepsilon_{\min}$  также допускается изрядная доля произвола, необходимо осуществить подобный анализ и при различных значениях  $\varepsilon_{\min}$ .

Таким образом, имеет смысл рассматривать график зависимости  $D(\varepsilon_{\max})$  с целью нахождения на нем горизонтального участка, по которому и следует рассчитывать искомую величину  $\langle D \rangle$ . Применим предложенный подход последовательно к модельному фрактальному объекту (ковру Серпиньского), а затем и к природному фракталу, которым является овражно-балочная сеть Саратова.

**2.1. Расчет фрактальной размерности ковра Серпиньского.** Рассмотрим ситуацию, связанную с расчетом размерности модельного фрактального объекта – ковра Серпиньского (рис. 3). Аналитическое значение емкостной размерности для этого объекта известно и составляет  $D \approx 1.89$ . Однако при расчете емкостной размерности способом, описанным в разделе 1, возникает та же самая проблема, что и

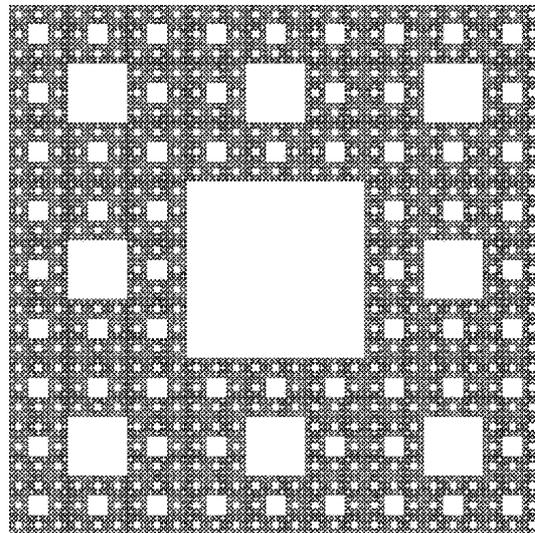


Рис. 3. Модельный фрактал – ковер Серпиньского ( $D \approx 1.89$ )

для природного фрактального объекта: получающийся результат сильно зависит от выбора линейного участка, на котором осуществляется расчет размерности. На рис. 4, а показана зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки для ковра Серпиньского, выполненная в двойном логарифмическом масштабе. Очевидно, что границы линейного участка на этой зависимости могут быть выбраны с достаточно большой степенью произвола, что, в свою очередь, ведет к разнице в значениях емкостной размерности. Например, значения размерности, вычисленные на участках 1-2 и 2-3, равны соответственно 1.9 и 1.81, то есть выбирая произвольным образом участок аппроксимации зависимости  $N(\varepsilon)$ , нельзя однозначно определить размерности фрактала.

<sup>3</sup>Можно провести некоторую аналогию с методом вычисления корреляционной размерности по наблюдаемой временной реализации, используемым при анализе поведения нелинейных динамических систем, демонстрирующих хаотическую динамику [11, 14].

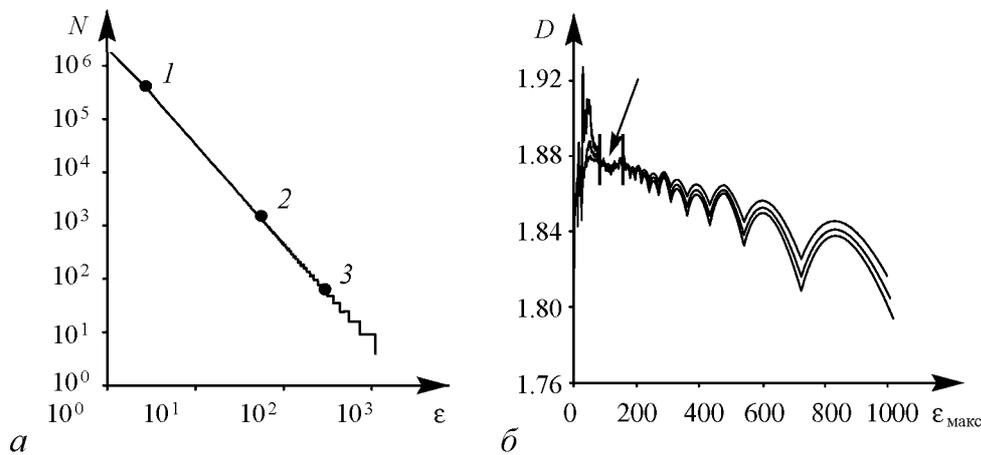


Рис. 4. Зависимость числа ячеек покрытия от размера ячейки для ковра Серпиньского  $N(\varepsilon)$ , выполненная в двойном логарифмическом масштабе (емкостная размерность, вычисленная на участках 1-2 и 2-3, равна соответственно 1.90 и 1.81) (а), и зависимость емкостной размерности от максимального размера ячейки покрытия (различным кривым соответствуют различные значения минимального размера ячейки покрытия) (б). Стрелкой обозначен участок, по которому проводилось усреднение размерности (этому участку соответствует  $\langle D \rangle \approx 1.88$ )

На рис. 4, б показана зависимость емкостной размерности ковра Серпиньского от максимального размера ячейки покрытия фрактала  $D(\varepsilon_{\max})$ . Различным кривым соответствуют различные значения минимального размера ячейки покрытия  $\varepsilon_{\min}$ . Видно, что размерность существенным образом зависит от выбора линейного участка, причем разброс в значениях размерности значительно превосходит погрешность метода наименьших квадратов, при помощи которого осуществлялась аппроксимация зависимости  $N(\varepsilon)$ . В то же время на графике можно выделить участок, на котором размерность принимает примерно одинаковые значения вне зависимости от выбора  $\varepsilon_{\min}$  и  $\varepsilon_{\max}$ . Проводя усреднение размерности по этому участку, можно получить ее значение  $\langle D \rangle$ , вычисленное с учетом ограниченности пространственного интервала самоподобия фрактала. Для ковра оно составило  $\langle D \rangle \approx 1.88$ , что отличается от аналитического значения менее чем на 0.5%. Таким образом, полученный результат позволил говорить о высокой эффективности предложенного метода и возможности его применения для изучения природных самоподобных объектов.

### 3. Расчет фрактальной размерности для овражно-балочной сети различных ландшафтных районов Саратова

Опробованный на модельном фрактале метод расчета емкостной размерности был применен для изучения ОБС города Саратова, для которой, как и для ковра Серпиньского, характерен разброс значений размерности, соответствующих различным участкам аппроксимации (см. раздел 1). При исследовании характера зависимости  $D(\varepsilon_{\max})$  для ОБС при различных  $\varepsilon_{\min}$  было обнаружено, что на графике этой зависимости можно также выделить участок, на котором размерность принимает примерно одинаковые значения вне зависимости от выбора  $\varepsilon_{\min}$  и  $\varepsilon_{\max}$  (рис. 5). Как и для

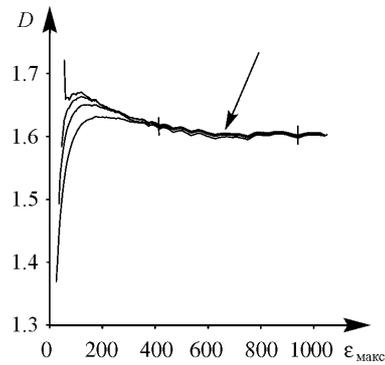


Рис. 5. Зависимость емкостной размерности ОБС Елшанского ландшафтного района Саратова от максимального размера ячейки покрытия. Стрелкой обозначен участок, по которому проводилось усреднение размерности (этому участку соответствует  $\langle D \rangle \approx 1.61$ )

ковра Серпиньского, проводя усреднение размерности по этому участку, можно получить характеристику фрактала, учитывая его неоднородность и ограниченный интервал пространственного самоподобия. Для ОБС Елшанского района Саратова разброс значений размерности, соответствующих различным участкам аппроксимации, составил примерно 0.07 (см. рис. 2, а), в то время как участки, обозначенный на рис. 5 стрелкой (на графике зависимости  $N(\varepsilon)$  в двойном логарифмическом масштабе этому участку соответствуют отрезки с приблизительно одинаковым угловым коэффициентом),

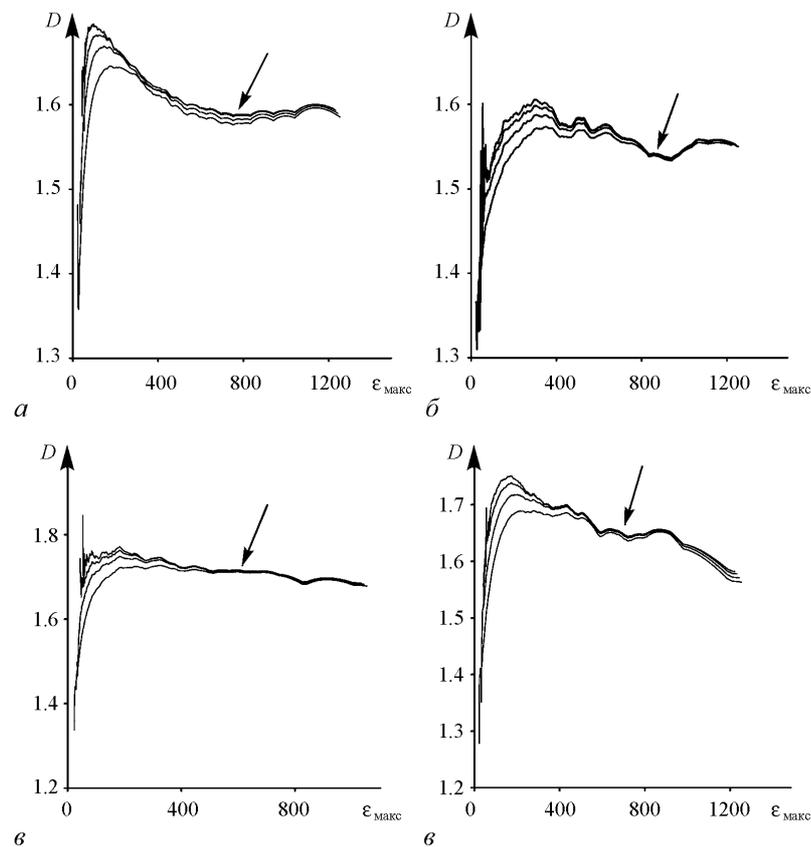


Рис. 6. Зависимость емкостной размерности от максимального размера ячейки покрытия для Гусельского (а), Лысогорского (б), северной (в) и южной (г) части Волжского ландшафтных районов. Различным кривым на графиках соответствуют различные значения минимальной ячейки покрытия. Стрелками обозначены участки, по которым проводилось усреднение размерности. Значения  $\langle D \rangle$  равны, соответственно 1.59, 1.54, 1.71 и 1.65

позволил получить набор значений размерности, отличающихся друг от друга менее чем на 0.01. При вычислении размерности на этом участке было получено значение  $\langle D \rangle \approx 1.61$ , которое можно рассматривать как некоторую усредненную характеристику фрактала и использовать при сравнительном анализе различных самоподобных объектов природного происхождения.

Для других районов Саратова (рис. 6) вычисление фрактальной размерности описанным методом также позволило получить усредненные значения размерности, колеблющиеся в интервале от 1.54 (Лысогорский ландшафтный район) до 1.71 (Волжский ландшафтный район). Таким образом, можно сделать вывод об адекватности предложенного метода поставленной задаче и возможности его применения при исследовании как модельных, так и природных самоподобных структур.

### Заключение

Таким образом, в настоящей работе были рассмотрены различные подходы к фрактальному анализу природных самоподобных структур. Аналитический метод вычисления емкостной размерности абстрактных математических фракталов непригоден для реальных фракталов, интервал пространственного самоподобия которых ограничен, что приводит к необходимости применения численного алгоритма. При использовании традиционного способа вычисления размерности было обнаружено, что неопределенность в выборе участка аппроксимации зависимости числа ячеек покрытия фрактала от размера ячейки приводит к неопределенности в выборе значения размерности, которое можно трактовать как характеристику фрактальных свойств объекта. Для устранения описанного недостатка численного алгоритма было предложено проводить сравнительный анализ зависимости размерности от максимального значения участка аппроксимации  $D(\varepsilon_{\max})$  для различных минимальных значений  $\varepsilon_{\min}$  с целью нахождения некоторого множества отрезков на графике зависимости  $N(\varepsilon)$  в двойном логарифмическом масштабе, угловой коэффициент которых (емкостная размерность фрактала) отличается незначительно. На графике зависимости  $D(\varepsilon_{\max})$  этому набору отрезков соответствует горизонтальный участок. Проводя усреднение размерности по этому участку, можно получить значение размерности, вычисленное с учетом неоднородности природных фракталов и ограниченного интервала их пространственного самоподобия. Для проверки эффективности предложенного метода он был применен для вычисления размерности модельного фрактала, в качестве которого был взят ковер Серпиньского. Полученное при этом значение размерности отличалось от аналитического менее чем на 0.5%, то есть указанный алгоритм позволил с высокой точностью определить размерность модельного фрактала. Рассмотрение ОБС различных ландшафтных районов Саратова выявило тот же, что и для ковра Серпиньского, характер зависимости  $D(\varepsilon_{\max})$ , что позволяет сделать вывод о возможности применения предложенного в работе метода для фрактального анализа природных самоподобных структур и использования полученного этим методом усредненного значения размерности в качестве характеристики фрактальных свойств объекта.

Сегодня трудно однозначно охарактеризовать геолого-геоморфологический смысл фрактальной размерности ОБС. Накоплено пока слишком небольшое количество данных для каких-либо обобщающих интерпретаций. Значение фрактальной

размерности, по предположению Ю.Г. Пузаченко (устное сообщение), отражает в определенной мере энергетическую напряженность ОБС как геолого-геоморфологической системы на анализируемом участке. Проверая это предположение на территории Саратовского научно-образовательного полигона, авторы планируют, в частности, подтвердить с помощью фрактального анализа ОБС наличие и очертания геоморфоблоков и энергоопасных зон, выделяемых Г.И. Худяковым [15]. Нам представляется рациональным предположить также, что ОБС, развивающаяся в более жестком, гетерогенном по вещественному составу горных пород геологическом субстрате, характеризуется более низким значением фрактальной размерности  $D$ . Так, именно ландшафтный район Лысогорского плато, сложенный наиболее разновозрастными, разнофациальными отложениями, имеет наименьший показатель  $D = 1.54$ . Предполагаемая закономерность, безусловно, нуждается в дальнейшей проверке на иных территориях.

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН Г.И. Худякову (СГУ) и чл.-корр. РАН Д.И. Трубецкову (СГУ), профессору Ю.Г. Пузаченко (МГУ) за консультации в ходе подготовки статьи к изданию, а также ассистенту кафедры геоморфологии и геоэкологии А.В. Федорову (СГУ) за помощь в обработке картографических материалов.

*Работа выполнена при поддержке научно-образовательного центра «Нелинейная динамика и биофизика» при Саратовском госуниверситете им. Н.Г. Чернышевского (грант REC-006 of U.S. Civilian Research and Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF)), программы Федерального агентства по науке и инновациям «Проведение научных исследований молодыми учеными» (государственный контракт 02.442.11.7257). Авторы благодарят также за финансовую поддержку фонд некоммерческих программ «Династия» и Международный центр фундаментальной физики (Москва).*

#### **Библиографический список**

1. Короновский А.А., Трубецков Д.И. Нелинейная динамика в действии: Как идеи нелинейной динамики проникают в экологию, экономику и социальные науки. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2002.
2. Яшков И.А., Иванов А.В. Изучение эрозионной сети с помощью фрактального анализа // Недр Поволжья и Прикаспия. 2005. Вып. 44. С. 49.
3. Васильев Л.Н. Фрактальность и самоподобие природных пространственных структур // Изв. РАН. Сер. географическая. 1992. Вып. 5. С. 25.
4. Пузаченко Ю.Г. Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафта // Изв. РАН. Сер. географическая. 1997. Вып. 2. С. 24.
5. Claps P., Oliveto G. Reexamining the determination of the fractal dimension of river networks // Water Resour. Res. 1996. Vol. 32, №10. P. 3123.
6. Barbera L.P., Rosso R. On the fractal dimension of stream networks // Water Resour. Res. 1989. Vol. 25, №4. P. 735.
7. McNamara J.P., Kane D.L., Larry D., Hinzman L.D. An analysis of an arctic channel network using a digital elevation model // Geomorphology. 1999. Vol. 29. P. 339.

8. *Lopes C. de O., Paula G.A. de, Vieira A.C.* Fractalidade da estrutura de drenagen do municipio do Rio de Janeiro // Revista Universidade Rural, Serie Clencas Exalas e da Terra. 2002. Vol. 21, №2. P. 23.
9. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002.
10. *Федер Е.* Фракталы. М.: Мир, 1991.
11. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос. Серия «Современная теория колебаний и волн». М.: Физматлит, 2001.
12. *Артемов С.А. и др.* Саратов: комплексный геоэкологический анализ / Под ред. А.В. Иванова. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003.
13. *Манжуров И.Л.* Фрактальная модель распределения плотности поверхностных загрязнений. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Екатеринбург, 2002.
14. *Короновский А.А., Ремпен И.С., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Переходный хаос в распределенной активной среде «винтовой электронный пучок – встречная электромагнитная волна» // Известия РАН. Сер. физическая. 2002. Вып. 66, №12. С. 1754.
15. *Худяков Г.И., Никифоров А.Н.* О геоморфоблоковом строении территории города Саратова // Проблемы геоморфологии и морфотектоники. Саратов, 1998. С. 46.

*Саратовский государственный  
университет*

*Поступила в редакцию 21.03.2006*

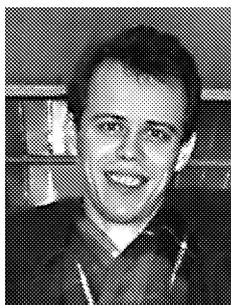
## DEFINITION OF THE FRACTAL DIMENSION OF SARATOV RAVINE NETWORK

*A.V. Ivanov, A.A. Koronovskii, I.M. Minyuhin, I.A. Yashkov*

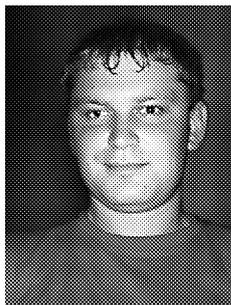
Fractal analysis of natural self-similar structures has been considered. Different approaches to the analysis of abstract mathematical fractals and natural fractals have been described. Numerical method of the fractal dimension calculation has been suggested. This method has been applied both for the model fractal (Sierpiński carpet) and natural fractals (Saratov ravine network).



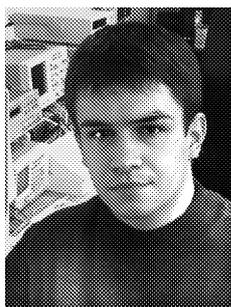
*Иванов Алексей Викторович* – родился в 1974 году в Саратове, окончил Саратовский госуниверситет в 1996 году по специальности «геолог-нефтяник», кандидат геолого-минералогических наук по специальности «палеонтология и стратиграфия» (1996), доцент (1999). Директор НИИ геологии Саратовского университета (1997–2004), первый заведующий новой кафедрой геоэкологии СГУ (с 2002 года), профессор СГУ (с 2003 года). Автор и соавтор более 250 работ, в том числе 18 монографий, 10 учебных пособий, двух научно-популярных книг. Трижды «Соросовский доцент», дважды лауреат Государственной научной стипендии, лауреат Потанинской стипендии. Заместитель главного редактора журнала «Недра Поволжья и Прикаспия». Область научных интересов: палеонтология, историческая геоэкология, экологическая геология.



*Короновский Алексей Александрович* – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), кандидат физико-математических наук (1997). Доцент кафедры электроники, колебаний и волн СГУ. Область научных интересов – нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. Автор ряда статей в центральной печати, а также монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ», вышедших в издательстве ГосУНЦ «Колледж».



*Яшков Иван Александрович* – родился в г. Жанатас, респ. Казахстан (1981), окончил с отличием географический факультет Саратовского госуниверситета (2003). Аспирант кафедры геоморфологии и геоэкологии географического факультета СГУ. По теме диссертационной работы опубликовано 2 научных статьи, несколько тезисов докладов Всероссийских и университетских научных конференций. Область научных интересов: применение фрактального метода в изучении эрозионных структур, эволюция и строение естественных и искусственных дренажных систем урбанизированных территорий.



*Минохин Игорь Михайлович* – родился 24 января 1987 года. Студент 2 курса факультета нелинейных процессов Саратовского государственного университета. Область научных интересов: применение методов нелинейной динамики к изучению систем различной природы, в том числе социальных, биологических, геологических и т.п. Участник студенческих конференций, автор публикации в сборнике докладов «Нелинейные дни–2005».