

## АНАЛОГИИ В СТРОЕНИИ ПРИРОДНЫХ ЭРОЗИОННЫХ СТРУКТУР И КРИВОЙ КОХА: ПРЕДПОСЫЛКИ КАЧЕСТВЕННОГО СОПОСТАВЛЕНИЯ

Анализируются общие вопросы механизма развития природных эрозионных структур в сравнении с классическим фрактальным множеством – триадной кривой Коха. Предложен сценарий качественного сопоставления серии поперечных профилей, характеризующих онтогенез конкретной эрозионной формы и итераций кривой Коха.

**Ключевые слова:** эрозионная форма; онтогенез; стадии оврагообразования; кривая Коха; фрактал.

В современных науках о Земле хорошо известно явление природных фракталов, основанное на представлении геологических и географических объектов в виде фрактальных множеств. К настоящему моменту установлена фрактальность разломно-трещинных и речных сетей, минералов и горных пород, сейсмических и атмосферных явлений и т.д. Широкое разнообразие природных фракталов обусловлено сложностью генезиса и эволюции объектов на разных этапах и стадиях и практической трудностью описания структуры законами евклидовой геометрии.

Понятие «фрактал» было введено Б. Мандельбротом в 1975 г. и определено как «структура, состоящая из частей, которая в каком-то смысле подобна целому» [1]. Самоподобие природных фракталов как фундаментальное свойство [2] позволяет определить многие характерные особенности изучаемого объекта. Авторами предпринята попытка сопоставления стадий развития эрозионной структуры с классическим фрактальным множеством – триадной кривой Коха на качественном уровне. Как классический пример эрозионной формы для анализа морфометрии рельефа выбран овраг. Овраги и овражные системы являются объектом геоморфологических и геоэкологических исследований специалистов-геологов и географов. Спектр возможных исследований оврага как самой распространенной формы рельефа весьма широк. Ранее нами были проведены исследования фрактальных свойств овражно-балочной сети на примере территории урбосистемы Саратова [3–5].

В статье приняты следующие толкования терминов. Эрозионная форма (эрозионная сеть) понимается нами как одна из форм рельефа, образованных преимущественно под воздействием разрушительной (эродирующей) деятельности постоянных и временных водотоков. Включает речные долины, террасы, овраги, промоины и др. формы [6]. В геоморфологии выделяют несколько эрозионных форм, последовательно сменяющих друг друга во времени и в пространстве: эрозионная борозда (рытвина), промоина, овраг, балка, река. Речная сеть является частью эрозионной сети и представляет собой совокупность всех рек, находящихся в пределах какой-либо территории. Овражно-балочная сеть (ОБС), или, по Ю.П. Хрусталеву [6], «овражно-балочный рельеф», – тип эрозионного рельефа с преобладанием оврагов и балок, разделенных плоскими или выпуклыми водоразделами. Совокупность балочных элементов эрозионной сети территории с характерными пологими задернованными склонами и широким плоским дном, как правило, без постоянно действующего водотока образует балочный рельеф. Овраг – имеющая морфометрически выраженный во-

досбор линейная эрозионная форма длиной не менее 70 м, глубиной не менее 1,5 м [7].

Изучение подобия «строения ручейковой сети (наименьшего образующего элемента, “прародителя” эрозионной структуры) на склонах речной сети древо-видного строения» [7] дает возможность «результаты исследований процессов в одном масштабе... перенести на любой другой с помощью изменения коэффициентов пропорциональности» [2]. Иными словами, для понимания развития эрозионной структуры в целом достаточно изучить онтогенез какой-либо составляющей ее эрозионной формы и далее экстраполировать результаты исследований на эволюцию всей сети.

Результаты детального изучения овражно-балочных сетей в полевых условиях и методами дистанционного зондирования позволяют нам предположить определенную аналогию элементов овражно-балочной сети с модельным фракталом – кривой Коха. Для качественного сравнения онтогенеза эрозионной формы и кривой Коха нами был выбран поперечный профиль овражно-балочной сети, отражающий динамику системы, морфология которой изменяется как в пространстве – по длине эрозионной структуры, так и во времени – на разных стадиях развития формы рельефа.

В современной геоморфологии детально разработана схема классического эрозионного цикла, согласно которой развитие всех эрозионных форм рельефа представляет последовательную смену одной формы другой [7]. На каждой стадии развития эрозионная форма приобретает принципиально новые качественные и количественные характеристики: изменяются морфология, линейные размеры, функциональные характеристики и др. В классическом варианте образование эрозионной формы можно рассматривать как последовательную смену трех основных переходящих друг в друга эрозионных элементов: овраг – балка – река. Характерной особенностью каждой стадии развития эрозионной формы является наличие множества переходных самоподобных форм. Фрактальность эрозионной структуры – классический пример самоорганизации геоморфологического пространства.

Нами рассматривается онтогенез эрозионной формы на примере оврага. Закономерности развития оврага от момента его зарождения до затухания процесса эрозии достаточно трудно проследить. Особенности внешнего строения эрозионной структуры зависят прежде всего от геологического возраста самой овражной системы, геологического строения территории, тектонических и климато-гидрологических особенностей территории. Поперечные профили, отражающие стадии развития эрозионной формы, изображены на рис. 1.

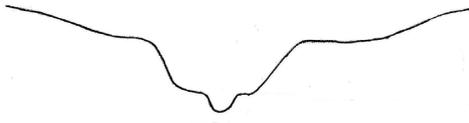
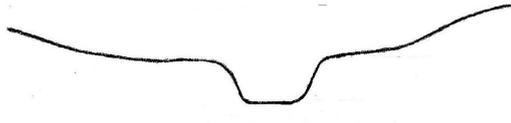
Эрозионная форма	Поперечный профиль	Основные морфометрические характеристики
Эрозионная борозда		Глубина до 0,5 м
Промоина		Ширина от 0,5 до 8 м, глубина от 0,5 до 3 м
Овраг		Ширина 50 м и более, глубина 30 м и более
Балка		См. овраг

Рис. 1. Стадии развития эрозионной формы

Построение кривой Коха начинается с единичного прямого отрезка (инициатора), который изменяется в предфрактал 1-го порядка – кривую из четырех прямолинейных звеньев, каждое из которых имеет длину  $1/3$ . Длина предфрактала 1-го порядка составляет  $4/3$ . Предфрактал 2-го порядка строится аналогично заменой каждого звена на уменьшенный образующий элемент.

Таким образом, «эволюция» кривой Коха состоит в пошаговой замене каждого звена предыдущего поколения на уменьшенный образующий элемент. Количество шагов-преобразований (итераций) бесконечно. При количестве итераций  $n$ , стремящемся к бесконечности, кривая Коха становится фрактальным объектом [8].

Процесс эрозионного расчленения создает все большее число малых эрозионных форм, которые сохраняют подобие первоначальной эрозионной формы, приобретая фрактальные свойства. При эволюции каждая последующая треугольная область  $(N + 1)$  поперечного профиля эрозионной формы, подобно кривой Коха, будет в  $4\cos^2\alpha$  раз меньше площади предыдущей исходной формы  $(N)$ . Согласно [9] для  $N = 2$

$$f = \frac{1}{4\cos^2\alpha},$$

размерность Хаусдорфа  $D = \log 2 / \log\left(\frac{1}{4\cos^2\alpha}\right)$ .

Площадь поверхности рельефа эрозионной формы выражается формулой

$$S = S_0^m,$$

где  $S_0$  – площадь поверхности формы рельефа, не подвергшейся эрозионному расчленению; величина  $m > 1$  зависит от размерности границы поверхности.

Для качественного сопоставления в бассейне р. Медведицы в Лысогорском районе Саратовской области выбраны модельные природные объекты: долины р. Жилой Рельни и оврага Ножницы. В результате детального изучения долин оврага и реки в полевых условиях и методами дистанционного зондирования построены их поперечные профили, отражающие основ-

ные стадии развития модельных геоморфологических объектов.

Последовательному увеличению длины кривой Коха подобен рост эрозионной долины р. Жилой Рельни в поперечном разрезе (рис. 2). Поверхность, лишенная эрозионных элементов рельефа (повторяющая первичный рельеф), качественно подобна инициатору. Предфрактал 1-го порядка, усложненный V-образной формой, подобен зарождающейся на склоне эрозионной борозде. Эрозионная борозда представляет собой микроформу рельефа, в которой присутствует слабая глубинная и отсутствует боковая эрозия. Предфрактал 2-го порядка подобен промоине, которая увеличивает глубину и расширяется. Каждая следующая ступень эрозионного цикла соответствует увеличению порядка предфрактала. Наблюдается закономерность: при качественном изменении эрозионной формы происходит количественное изменение порядка предфрактала. Необходимо отметить, что высшим стадиям развития эрозионной структуры – балочному рельефу (или речной сети) – будут соответствовать бесконечно сложные фракталы, что обусловлено огромным количеством очень динамичных во времени микро- и наноформ рельефа, осложняющих поперечный профиль эрозионной формы.

Поперечные профили оврага Ножницы являются природной иллюстрацией итераций, происходящих в модельном фрактале – кривой Коха (см. рис. 3). 14 поперечных профилей оврага Ножницы демонстрируют эволюцию оврага от его истока (места зарождения) до устья (места впадения оврага в другую, более крупную эрозионную форму рельефа). Показательным в этой системе поперечных профилей является очевидная специалистам-геоморфологам и геологам закономерность, которая выражается в положительной динамике краевых участков эрозионной формы. Процесс донного углубления и интенсивного врезания оврага активизируется на всем его протяжении за счет «роста» самой геологической структуры. Овраг, подчиняясь деятельности глубинных процессов, динамично развивается, его поперечные профили заметно усложняются при переходе одного к другому. При анализе рисунка попе-

речного профиля необходимо учитывать, что даже самые приближенные к действительности модели и картографические изображения не позволяют отобразить сложную структуру геоморфологических объектов.

На рис. 4 изображен показательный геолого-геоморфологический объект, имеющий сложную фрактальную природу, – долина крупнейшего в Саратовской области Даниловского оврага (Красноармейский район). На иллюстрации видна разветвленная система притоков (промоин, оврагов разного размера и рисунка). Если все неровности, определяющие поперечный профиль Даниловской овражно-балочной сети, отобразить в виде схемы, получится изображение, качественно подобное кривой Коха. Центральной, наиболее пониженной части, будет соответствовать русло собственно Даниловского оврага, затем следуют небольшие «водоразделы» и новые понижения малых оврагов и промоин.

Сложный путь развития оврага может быть генерализирован до трех основных стадий. В течение первой преобладает глубинная эрозия, на второй она уступает по интенсивности боковой, на третьей развитие оврага затухает (см. рис. 1). На каждой следующей стадии повторяются элементы предыдущей и добавляются

новые. Усложнения внутри отдельной эрозионной формы приближены качественно фрактальным преобразованиям в математической модели кривой Коха.

Выше был рассмотрен случай классического эрозионного цикла. Рельеф земной поверхности зачастую усложняется действием линейных и площадных тектонических структур, изменяющих геоморфологический облик элементов эрозионной формы. Теоретически эрозионные формы могут прекратить свое развитие, перейти в стадию динамического равновесия, чтобы затем, в силу изменения баланса вещества в литопотоках, вновь «ожить» и продолжить развитие. В результате нередко возникают новые, более сложные эрозионные формы типа «овраг в овраге».

Близко расположенные геолого-геоморфологические структуры, устойчивые (локальные погребенные купола, интрузии) или подверженные усиленной эрозии (поперечное разрывное нарушение, оползни), вносят искажения в стандартную фрактальную картину серии поперечных профилей. Несоответствие эволюционной формы поперечных профилей для какого-либо из шагов-преобразований кривой Коха может фиксировать близость крыльев геологических структур, а также элементы разломно-трещинной сети.

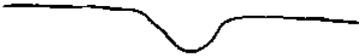
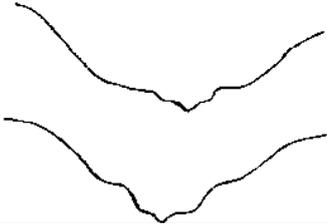
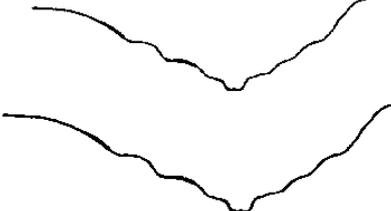
Поперечные профили долины левобережного притока р. Жилой Рельни	«Эволюция» кривой Коха
	<p><math>n = 0</math></p> 
	<p><math>n = 1</math></p> 
	<p><math>n = 2</math></p> 
	<p><math>n = 3</math></p> 
	<p><math>n = 4</math></p> 

Рис. 2. Сопоставления форм поперечных профилей и «эволюции» кривой Коха

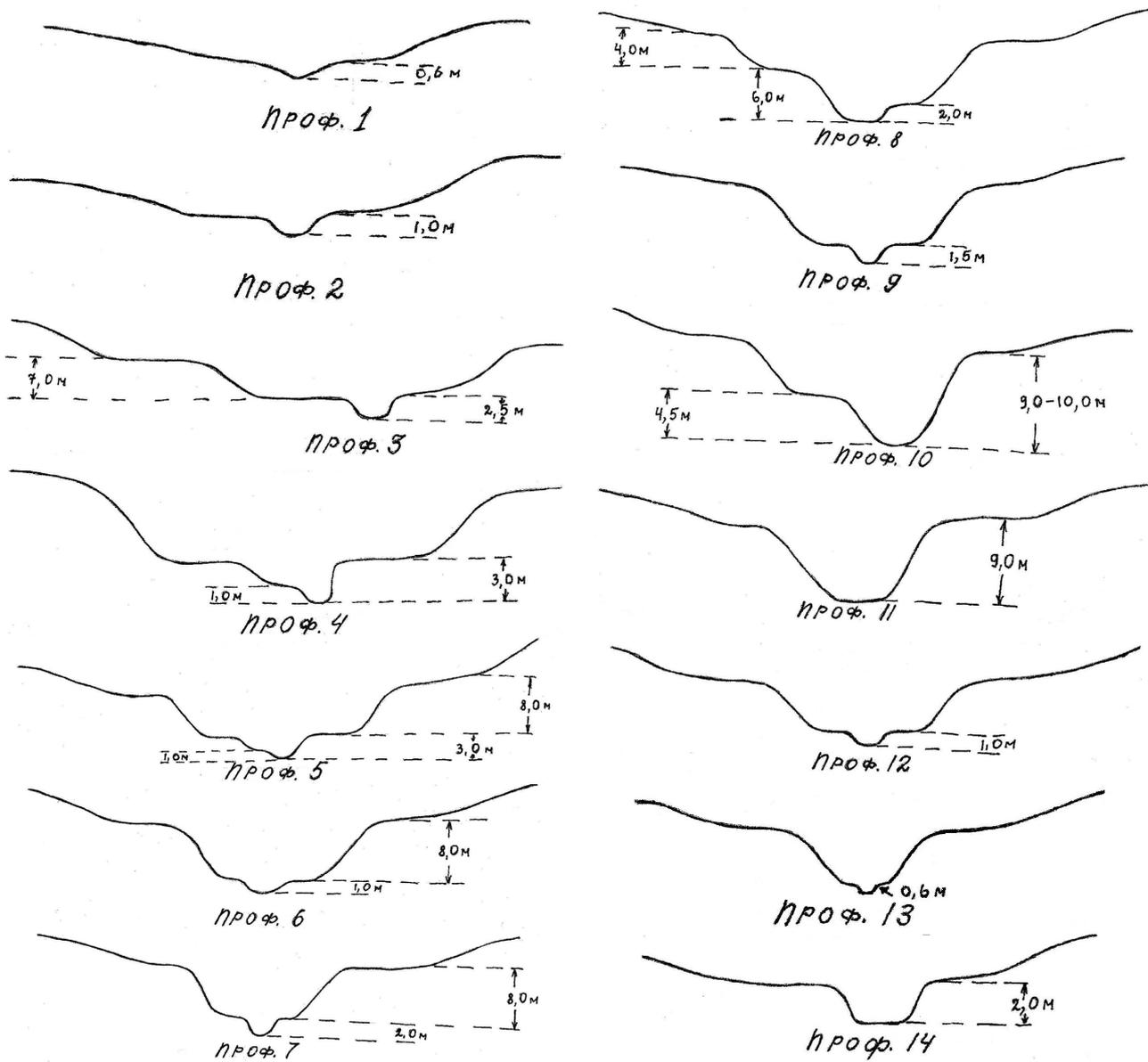


Рис. 3. Изменение поперечного профиля оврага Ножницы от устья к верховью, иллюстрирующее поведение поперечного профиля около крыльев геологических структур



Рис. 4. Общий вид Даниловского оврага и системы его притоков

Таким образом, анализ фрактальных свойств серии поперечных профилей позволяет решать при помощи аппарата нелинейной динамики важные задачи структурной геологии и геоморфологии: посредством разработки и внедрения оригинальных методик поиска выявления и оконтуривание пространственных особенностей геологических структур и их отдельных элементов, элементов разломно-трещинной сети и др.

На современном этапе развития в пределах урбанизованных территорий многие овраги и балки, которые качественно представляли собой высокие порядки предфракталов, испытывают обратные изменения. За-

сыпка оврагов возвращает поверхность в положение инициатора, а высокий порядок предфрактала остается «погребенным». В геоэкологическом отношении истинная поверхность высокого порядка предфрактала представляет собой наиболее устойчивую систему и антропогенные изменения неизбежно отражаются на экологической безопасности проживания населения и состоянии инженерных сооружений.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. А.А. Короновскому (СГУ) и д.ф.-м.н. А.Е. Храмову (СГУ) за консультации в ходе подготовки статьи к изданию.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. Ижевск : ИКИ, 2002.
2. *Пузаченко Ю.Г.* Приложение теории фракталов к изучению структуры ландшафта // Известия РАН. Сер. геогр. 1997. Вып. 2. С. 24–40.
3. *Иванов А.В., Короновский А.А., Минюхин И.М., Яшков И.А.* Определение фрактальной размерности овражно-балочной сети города Саратова // Известия вузов «ПНД». 2006. Т. 14, № 2. С. 64–74.
4. *Яшков И.А., Иванов А.В.* Изучение эрозийной сети с помощью фрактального анализа // Недр Поволжья и Прикаспия. 2005. Вып. 44. С. 49–58.
5. *Koronovskiy A.A., Minyuhin I.M., Yashkov I.A., Ivanov A.V.* Definition of the fractal dimension of Saratov ravine network // Problems of Geocosmos. St. Petersburg, 2006. P. 159–160.
6. *Хрусталева Ю.П.* Эколого-географический словарь / науч. ред. Г.Г. Матишов. Батайск, 2000.
7. *География овражной эрозии* / под ред. Е.Ф. Зориной. М. : Изд-во МГУ, 2006.
8. *Федер Е.* Фракталы. М. : Мир, 1991.
9. *Лялин Ю.В., Поздняков А.В.* Фракталы и автоколебания в геоморфосистемах // Фракталы и циклы развития систем : материалы пятого Всероссийского научного семинара «Самоорганизация устойчивых целостностей в природе и обществе». Томск : ИОМ СО РАН, 2001. С. 126–129.

Статья представлена научной редакцией «Науки о Земле» 24 марта 2012 г.