

циал развития процессов современного морфогенеза, активизация рельефообразующих процессов на территории водосборного бассейна озер Нарочанской группы в основном происходит при участии антропогенного фактора.

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ ЭРОЗИОННОЙ СЕТИ БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ<sup>3</sup>**

**А.Г. Нарожняя, Я.В. Павлюк, М.А. Голиков**

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Белгород*

Относительно простые степенные геометрические отношения, определяющие фрактальную размерность, предложены Б. Мандельбротом в 1967 г. [1]. Они позволяют получить диапазон масштабов в котором существует самоподобие явления. Методика фрактального описания формы речных систем впервые была предложена Л. Ричардсоном.

На сегодняшний день трудно однозначно охарактеризовать геолого-геоморфологический смысл фрактальной размерности большинства исследуемых извилистых и разветвленных структур. Однако фрактальный анализ становится содержательным только в том случае, когда хотя бы на общем уровне понятия его не математическая, а физическая сущность [9].

Фрактальными свойствами обладают и отдельные водотоки русла, и разветвленные речные структуры. Основным свойством фрактальных структур является самоподобие. Общие закономерности, лежащие в основе меандрирования и бифуркации русла, действуют на всех уровнях речной системы, тем самым порождая её самоподобную морфометрию. Такая фрактальность сохраняет некое качество природных структур при изменении пространственных масштабов, это свойство автомодельности является существенным фактором в исследовании формы и, как следствие, динамики процессов их образования, поскольку упрощает математическое моделирование задачи [9].

Величина фрактальной размерности определяет сложность структуры, это удобная количественная мера не идеальности объектов: извилистости контура, морщинистости поверхности, трещиноватости и пористости объёма. Анализ фрактальной извилистости и разветвлённости показывает

---

<sup>3</sup> *Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16–35–00614 мол\_а.*

очевидную связь образования и формы самоподобных структур с гидрологией русловых процессов. Однако неочевидна суть этой взаимосвязи, неясно, какие параметры определяют фрактальность речной сети.

Исследования фрактальных свойств русловой сети представлены во многих работах [2–7]. Предложены результаты фрактального анализа извилистости участков рек рассмотрены А.В. Дегтярем [8], М.А. Мельник [9]. Анализ фрактальных размерностей речных сетей более чем 200 бассейнов крупных рек проведен Сидорчуком [10]. Установлено, что фрактальная размерность тесно связана с густотой речной сети. Фрактальная размерность густоты эрозионной сети может быть применена для обеспечения возможности оценки динамики густоты овражно-балочной дренажной сети по разновременным разномасштабным источникам.

Как известно, на картах разных масштабов выделяется различное количество водотоков и уменьшается количество порядков. Наличие общедоступной в сети Интернет SRTM-модели рельефа позволило нам автоматизировать процедуру нанесения тальвегов долинной и овражно-балочной сети Белгородской области и определения их порядков по системе Стралера-Философова (рис. 1).

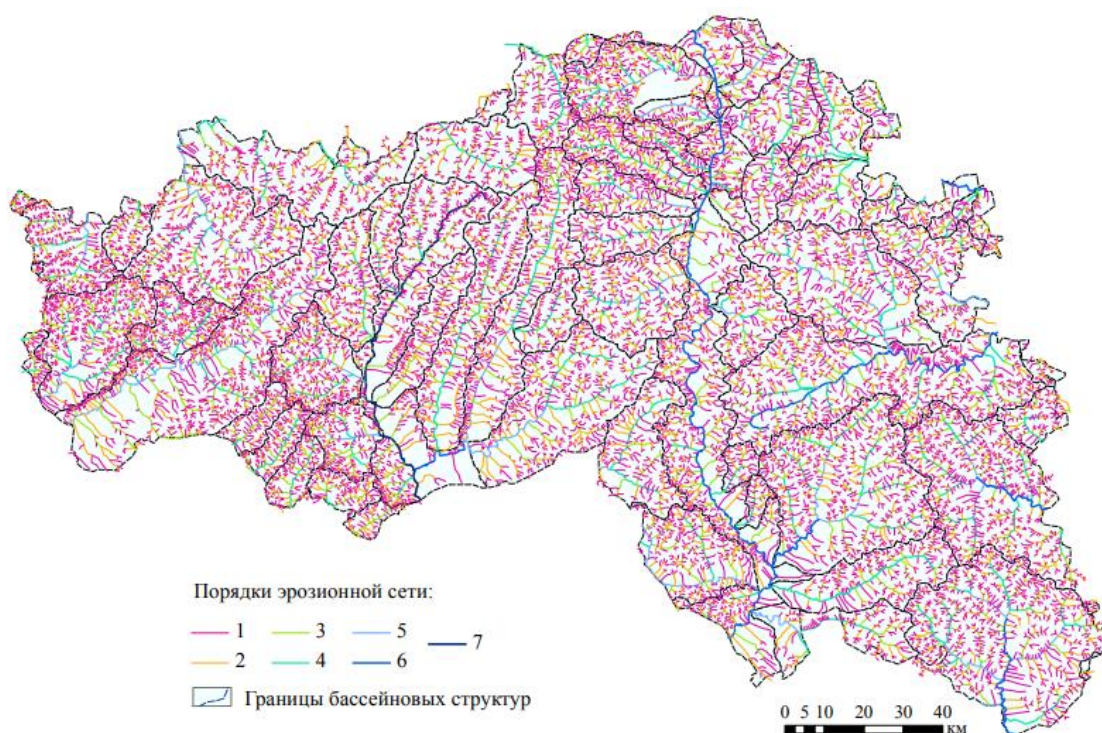


Рис. 1 – Порядковая структура долинной и овражно-балочной сети Белгородской области

Для возможности установления густоты эрозионной сети для карт более крупных масштабов нами сформирована выборка из 11 полигонов

размером 25 км<sup>2</sup> каждый, для которых была определена густота эрозионной сети (табл. 1).

Предположено, что густота растет с увеличением масштаба по закону:

$$L_1 = L_2 \times \left( \frac{M_1}{M_2} \right)^{1-D} \quad (1)$$

где  $L_1$  – густота эрозионной сети на карте масштаба, который крупнее масштаба исходной карты;  $L_2$  – густота эрозионной сети, вычисленная по исходной карте;  $M_1$  – масштаб карты масштаба крупнее исходной;  $M_2$  – масштаб исходной карты;  $D$  – фрактальная размерность.

Таблица 1

**Густота эрозионной сети (км/км<sup>2</sup>) в зависимости от масштаба карты**

№ полигонов	Масштаб карты				SRTM
	1:10 000	1:25 000	1:100 000	1:200 000	
1	3,21	2,09	1,41	1,08	1,07
2	2,41	2,07	0,95	0,84	0,83
3	1,50	1,24	0,89	0,63	0,67
4	2,46	1,88	1,40	1,09	1,19
5	1,22	0,97	0,64	0,48	0,76
6	2,64	1,83	0,95	0,68	0,91
7	2,78	1,75	0,99	0,73	0,97
8	2,90	1,89	1,10	0,82	0,65
9	1,72	1,31	1,02	0,79	0,82
10	2,64	2,10	1,24	1,15	1,08
11	2,20	1,42	0,98	0,92	1,03
Среднее	2,34	1,69	1,05	0,84	0,91

При логарифмировании уравнения (1) удастся извлечь фрактальную размерность:

$$D = - \left( \frac{\ln L_1 - \ln L_2}{\ln \frac{M_1}{M_2}} - 1 \right) \quad (2)$$

Линейный объект обладает самоподобием. Величина  $D$ , не являющаяся целым числом, позволяет его измерить. Считается достаточным, если величина  $D$  вычислена с точностью до сотых (Берлянт, 1998). Полученные величины фрактальной размерности представлены в табл. 2.

Далее все полученные массивы фрактальных размерностей были проверены между собой на равенство средних значений с использованием  $t$ -критерия Стьюдента (уровень значимости  $p=0,05$ ). В результате было установлено, что различий между данными отсутствуют. Таким образом, все исследованные речные сети соответствуют положениям фрактального подхода, согласно которому их фрактальная размерность должна быть больше эвклидовой размерности линии (единица) и меньше эвклидовой

размерности плоскости (два). Относительные ошибки вычисления густоты эрозионной сети варьируют от 8 до 14 %, что позволяет говорить о ее самоподобии на картах разных масштабов. Этот факт позволил нам определить масштаб SRTM, он равен около 1:155 000.

Таблица 2

**Пересчет густоты эрозионной сети (км/км<sup>2</sup>) для разномасштабных карт**

№ полигона	Густота эрозионной сети на картах масштаба:				Фрактальная размерность
	1:10 000	1:25 000	1:100 000	1:200 000	
1	3,21	2,09	1,41	1,08	0,62
2	2,41	2,07	0,95	0,84	0,70
3	1,50	1,24	0,89	0,63	0,68
4	2,46	1,88	1,40	1,09	0,71
5	1,22	0,97	0,64	0,48	0,68
6	2,64	1,83	0,95	0,68	0,55
7	2,78	1,75	0,99	0,73	0,55
8	2,90	1,89	1,10	0,82	0,57
9	1,72	1,31	1,02	0,79	0,72
10	2,63	2,10	1,24	1,15	0,79
11	2,20	1,42	0,98	0,92	0,72
Среднее ( $\bar{x} \pm t_{0,5} S_{\bar{x}}$ )					0,66±0,16

**Библиографические ссылки**

1. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / пер. с англ. А. Р. Логунова; науч. ред. А. Д. Морозова. Москва, Ижевск : Изд-во Ин-та компьютер. исслед., 2002.
2. Berquist T. S., Snow R. S. Fractal analysis of the planforms of rivers in Indiana and Kentucky // 98th Annual meeting Geological Society of America: abstracts with programs. Boulder, CO, 1985. – P. 280–287.
3. Поздняков А. В., Лялин Ю. В., Тихоступ Д. М. Формирование поверхности равновесия и фрактальные соотношения в эрозионном расчленении // Самоорганизация геоморфосистем. Томск : ТНЦ СО РАН, 1996. Вып. 3. С. 36–48.
4. Пузаченко Ю. Г. Проблемы устойчивости и нормирования // Структурно-функциональная организация и устойчивость биологических систем : сб. науч. тр. Днепропетровск, 1990. С. 122–147.
5. Яшков И. А., Иванов А. В. Изучение эрозионной сети с помощью фрактального анализа // Недра Поволжья и Прикаспия. 2005. Вып. 44. С. 49–58.
6. Иванов А. В. Короновский А. А., Минюхин И. М. Определение фрактальной размерности овражно-балочной сети города Саратова // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2006. Т. 14, № 2. С. 64–74.
7. Чупикова С. А. Фрактальные методы выявления скрытой регулярности в эрозионном расчленении поверхности (на примере анализа Саяно-Тувинского нагорья, Республика Тува): автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск : СО РАН, 2010.
8. Дегтярь А. В. Гидролого-экологический анализ деградационных процессов в речных бассейнах малых рек юго-запада Центрально-Черноземного региона: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2005.

9. Мельник М. А. Фрактальные закономерности форм рельефа: на примере эрозионного расчленения поверхности и извилистости рек: автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Томск, 2007.

10. Сидорчук А. Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014. № 1. С. 3–14.

11. Берлянт А. М. Картография и телекоммуникация: аналит. обзор. Москва : Изд-во Моск ун-та, 1998.

## РАСЧЕТЫ РАСХОДА НАНОСОВ В РЕЧНЫХ ПОТОКАХ<sup>4</sup>

**Ш.Р. Поздняков, М.В. Шмакова**

*Институт озераедения РАН, Санкт-Петербург*

**Введение.** Изменения отметок дна водоемов и водотоков – процесс естественный, обусловленный взаимодействием движущихся водных масс и наносов, поступающих из вышерасположенных створов в результате размыва русла и с поверхности водосбора в результате почвенной эрозии.

Это взаимодействие является следствием неравновесности системы «водный поток – донные отложения – наносы», когда имеет место несоответствие переносимых потоком наносов и транспортирующей способности потока. Признаками неравновесной системы является изменение вклада кинетической энергии потока воды и движущихся наносов, а также потенциальной энергии донного и берегового грунта в общий энергетический баланс системы. В случае равенства между поступлением наносов и транспортирующей способностью потока русловая система находится в равновесии. В этом случае «русловые деформации сводятся к перемещению мелких аккумулятивных образований – донных гряд. В этом случае местные размывы уравниваются заилением» [1].

В неравновесной системе речной поток стремится минимизировать энергию движения, что приводит к переформированию как гидравлической структуры речного потока, соотношения жидкой и твердой фазы в нем, так и формы речного русла. Интенсивность этих переформирований зависит от степени несоответствия между расходом наносов и транспортирующей способностью потока. Однако характер переформирований связан с типом пород, которыми представлены дно и берега водотока.

---

<sup>4</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2018-0003 (№ гос. регистрации: № 01201363379) при частичном финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета.