

Оригинальная статья / Original article

УДК 504.45

DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-13



Особенности использования «Свободного программного обеспечения» для расчёта фрактальной размерности бассейнов водных объектов

Сергей Л. Молчатский

Самарский государственный социально-педагогический университет, Самара, Россия

Контактное лицо

Сергей Л. Молчатский, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра химии, географии и методики их преподавания, Самарский государственный социально-педагогический университет; 443000 Россия, г. Самара, ул. Антонова-Овсеенко, 26.

Тел. +79272087068

Email rvs3213@mail.ruORCID <https://orcid.org/0009-0005-4156-2012>**Формат цитирования**

Молчатский С.Л. Особенности использования «Свободного программного обеспечения» для расчёта фрактальной размерности бассейнов водных объектов // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 2. С. 165-175.
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-13

Получена 21 июля 2023 г.

Прошла рецензирование 14 января 2024 г.

Принята 25 апреля 2024 г.

Резюме

В последнее время при изучении бассейнов рек, для извлечения из Цифровой Модели Рельефа (ЦМР) различных гидрологических факторов широко используется система QGIS. По этой причине данное исследование направлено на определение фрактальной размерности векторных слоев бассейнов рек, полученных используя систему QGIS.

Цель – для ряда гидрологических объектов исследовать зависимость между значениями фрактальной размерности, рассчитанными для соответствующих слоев QGIS и используемыми для расчёта программными пакетами, а также зависимость фрактальной размерности от исходных условий, заданных компьютерным программом (последнее только для «shp-файлов»). Выявить возможные корреляции между полученными зависимостями.

Для 9 водных объектов (реки: Айя, Белая, Сарс, Сура, Уфа, Юрюзань и устья рек: Волга, Лена, Селенга) методом «box-counting» была рассчитана фрактальная размерность. Расчёты проводились с использованием свободно распространяемого программного обеспечения: Minkowski Dimension Calculator для QGIS, Fractalyse, ImageJ, Frac Lac для ImageJ, Gwyddon, Fractal и FDE.

Полученные данные показывают: во-первых, результат расчетов однозначно зависит от начальных условий, задаваемых программе, во-вторых прослеживаются явные корреляции между фрактальными размерностями рассчитанными, как при различных начальных условиях измерений, так и при использовании различного программного обеспечения.

Выявленные нами корреляции показывают возможность использования, рассматриваемого программного обеспечения для определения фрактальной размерности по изображениям водных объектов, полученных посредством QGIS. А предложенные в заключении рекомендации позволят более эффективно использовать особые возможности каждой из программ для дальнейших исследований.

Ключевые слова

Фрактальная размерность, программное обеспечение, масштаб, гидрографическая сеть, водосбор, QGIS.

Using "Free Software" to calculate the fractal dimension of hydrographic basins

Sergey L. Molchatsky

Samara State University of Social Sciences and Education, Samara, Russia

Principal contact

Sergey L. Molchatsky, Candidate of Physical-Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Natural Science and Geography, Samara State University of Social Sciences and Education; 26 Antonova-Ovseenko St., Samara, Russia 443000.

Tel. +79272087068

Email rdsn3213@mail.ru

ORCID <https://orcid.org/0009-0005-4156-2012>

How to cite this article

Molchatsky S.L. Using "Free Software" to calculate the fractal dimension of hydrographic basins. *South of Russia: ecology, development*. 2025; 20(2):165-175. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-2-13

Received 21 July 2023

Revised 14 January 2024

Accepted 25 April 2024

Abstract

Recently, when studying river basins, the QGIS system has been widely used to obtain various hydrological factors from a Digital Elevation Model (DEM). This study is aimed at determining the fractal dimension of vector layers of river basins obtained using QGIS.

Aim. For a number of hydrological networks, investigate the relationship between the values of the fractal dimensions calculated for the corresponding QGIS layers and used for calculation by the software, as well as the dependence of the fractal dimension on the initial conditions set for the software (the latter only for ".shp" files); also determine possible correlations between the resulting dependencies.

For 9 hydrological objects (the Aya, Belaya, Sars, Sura, Ufa and Yuryuzan rivers and the mouths of the rivers Volga, Lena and Selenga), the fractal dimension was calculated using the "box-counting" method. Calculations were carried out using free software: Minkowski Dimension Calculator for QGIS, Fractalyse, ImageJ, Frac Lac for ImageJ, Gwyddon, Fractal and FDE.

The data reveal that, firstly, the calculation result depends on the initial conditions set for the computer programme, and secondly, there are correlations between the fractal dimensions calculated under both different initial measurement conditions and using different software.

Our results suggest the possibility of using all the software under consideration to determine fractal dimension from images of hydrological objects, obtained using QGIS. Moreover, the recommendations proposed in the conclusion will allow more effective use of the special opportunities of each of the programmes for further research.

Key Words

Fractal dimension, software, scale, hydrographic network, catchment, QGIS.

ВВЕДЕНИЕ

Использование концепции фрактала в физике, начиная с 70–80-х годов 20-го столетия [1], привело к пониманию целого ряда свойств неупорядоченных систем и послужило толчком к применению ее при изучении природных объектов. Концепция фрактала в настоящее время широко используется при анализе структуры и свойств объектов и систем, которые, как известно, относятся к числу неравновесных и обладают фрактальными свойствами [2; 3]. Одними из таких объектов являются реки и их водосборные территории, методика исследования геометрии такого рода структур еще не имеет устоявшегося и однозначно поддерживаемого всеми математического аппарата. Попытки преодолеть эту проблему предпринимались многочисленными отечественными и зарубежными исследователями [4–12]. Но, к сожалению, до достижения некоторого консенсуса по этой проблеме еще очень далеко.

Целью настоящего исследования является попытка внести большую ясность в принципы использования наиболее популярных программ для расчёта фрактальной размерности применительно к гидрографическим сетям. Оно в своей основе опирается на предположения и результаты, опубликованные Н.Н. Красногорской и Е.А. Белозеровой [7].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объекты исследования и исходные данные

В качестве объектов исследования были выбраны векторные слои бассейнов рек: Ая, Белая, Сарс, Сура, Уфа, Юрюзань и устьев рек: Волги, Лены, Селенги, которые были получены в системе QGIS и базе данных HydroSHEDS, эти базы данных являются открытыми источниками геопространственного программного обеспечения.

Выбор для исследования именно этих рек связан с тем, что для них уже была попытка определения фрактальной размерности их гидрографических сетей. Для векторных слоев это было сделано в работах [3; 7] и для растровых слоев в [9–11; 13].

В качестве «инструмента» для определения фрактальной размерности для данного исследования в начале были выбраны наиболее часто упоминаемые в литературе и по этим же данным, находящиеся в свободном доступе программы: FrakOut, HarFa, ImageJ, Frac Lac для ImageJ, Gwyddon, Minkowski Dimension Calculator для QGIS, Fractal, Fractalyse, FDE, Fractal Analysis System, Kindratenko's Fractal Contour Analysis, Pierre Frankhauser's Fractalse, Bar-Ilan's Fractal Dimension application, Paul Bourke's Fractal Dimension Calculator, TruSoft Benoit. Но оказалось, что, начиная с девятой программы из этого списка они в настоящее время являются не доступными и лишь упоминаются в различных сообщениях. Довольно популярные у российских исследователей HarFa и FrakOut не были использованы в работе по следующим причинам: авторы HarFa более двух месяцев не реагируют на пройденную регистрацию (это скорее всего только для российских граждан), а FrakOut очень неудобна в использовании.

Поэтому далее в статье из всего спектра программных продуктов для определения фрактальной размерности будут описаны и охарактеризованы только семь: Minkowski Dimension Calculator для QGIS, Fract-

alyse, ImageJ, Frac Lac для ImageJ, Gwyddon, Fractal и FDE.

Методы исследования

В своем исследовании Красногорская и Белозерова [7] провели довольно основательный сравнительный анализ программных продуктов, применяемых для определения фрактальной размерности и детальное обоснование выбора более оптимальных программ, а также масштаба изображений объектов исследования для определения фрактальной размерности. Но, есть возможность рассмотреть еще два довольно существенных аспекта использования этих программ. Во-первых, это определение значений фрактальной размерности полученных не для разномасштабных векторных слоев, а при наложении разно размерных ячеек алгоритма «box-counting». Конкретнее, исследование влияния на фрактальную размерность вариации максимального и минимального размеров накладываемых ячеек, а также шага между их размерами. Разрешение этой проблемы позволит более однозначно описать методики работы с соответствующими программными продуктами. Во-вторых, это проведение практической проверки наличия корреляций между значениями фрактальной размерности полученными при помощи разных программ для выбранного спектра изучаемых объектов. Решение этой задачи, и не только на мой взгляд, имеет наиболее важное значение, т.к. в области неравновесных процессов, в результате которых возникают природные объекты, важны в первую очередь корреляции, а не абсолютные значения [1; 14–16].

Для достижения поставленных задач, в работе использованы:

1. В качестве объектов исследования – указанные выше векторные слои водных объектов;
2. Для расчётов значений фрактальной размерности – семь отобранных компьютерных программ;
3. Для сравнительного анализа и выявления корреляций – расчётные и графические возможности MS-Excel.

Подробнее по этим пунктам:

1. Для проведения фрактального анализа векторные слои интересующих нас гидрографических объектов, предоставленные ресурсом HydroSHEDS загружались в систему QGIS. Следующим шагом было – используя ресурсы QGIS, обособливались (вырезались) векторные слои только намеченных для исследования водосборов. И наконец, подготовка выделенных слоев заканчивалась сохранением их в виде как .shp, так .bmp файлов, для возможности обработки всеми отобранными компьютерными программами.

2. Фрактальный анализ был построен с учетом индивидуальных возможностей отобранными компьютерными программами. В первую очередь на возможности выбора размера минимальной и максимальной накладываемых ячеек, и выбора шага изменения этих размеров, и во вторую – скорость обработки имеющимся ПК (i7-12700F 2.1GHz / 32 Гб).

Из отобранных программ три проводят анализ загруженного объекта автоматически, это: Frac_Lac для ImageJ, Gwyddon и FDE, причем две последних выдают только непосредственно рассчитанное значение без указания стандартного и среднеквадратичного отклонений.

Minkowski Dimension Calculator и Fractalyse позволяют контролировать все три указанные выше возможности и соотнести размеры и шаг размеров накладываемых ячеек между собой. Например, для решения первой поставленной задачи использовалась преимущественно программа «Minkowski Dimension Calculator». Причина такого выбора заключается в том, что она работает с изображением в векторном формате, что, с одной стороны, избавляло от погрешности растровых изображений [7], а с другой избавляло от дополнительных действий по подготовке к использованию файлов изображений. В рамках ее возможностей были проведены пять серий расчетов фрактальной размерности для всех выбранных объектов. Каждая серия расчетов включала в себя разные исходные данные (во всех сериях выставлялось

2 3 4 5 6 7 8 10 12 14

При работе с программой «Fractal» использовалась общепринятая методика, в данном

2 3 4 5 6 7 8

Верхний предел размера ячейки определялся логически по всем объектам исследования.

3. Все полученные в п. 2 результаты заносились в таблицы MS-Excel, где в дальнейшем проводились все необходимые расчеты (как встроенными функциями, так и набранными вручную), составлялись таблицы, строились графики зависимостей и корреляционные кривые.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Влияние на фрактальную размерность различных масштабов измерений

Для проведения анализа влияния масштаба векторного изображения на значение фрактальной размерности был выбран программный пакет «Minkowski Dimension Calculator для QGIS». Данный программный продукт

различное количество шагов размера ячейки): 1-я – стартовые и конечные размеры ячеек устанавливались «по умолчанию»; 2-я – стартовые и конечные размеры ячеек брались в 100 раз меньше, чем «по умолчанию»; 3-я – стартовые размеры ячеек брались одинаковые (минимально возможные для всех объектов, но реальные по времени выполнения расчетов), а конечные варьировались; 4-я – варьировались стартовые размеры, при постоянных конечных; 5-я серия отличалась от 4-й тем, что был увеличен вдвое размер конечных ячеек.

Методика работы со встроенным калькулятором фрактальной размерности программы ImageJ отличалась от базовой, тем, что предварительно в настройках выставлялось больше число накладываемых ячеек различных размеров, а конкретнее это был ряд:

16 18 20 24 28 32 36 40

случае использовался ряд размеров ячеек:

9 10 11 12 13 14

разработан специально для фрактального анализа векторных слоев QGIS.

Результаты предварительных исследований показали, что масштаб отображения векторного слоя совсем не влияет на значение рассчитанной фрактальной размерности.

Исследования влияния на фрактальную размерность вариации максимального и минимального размеров накладываемых ячеек, а также шага между их размерами включали в себя пять серий определений. Начальные условия этих измерений представлены в табл. 1 и 2 (методика описана выше).

Результаты фрактального анализа, исходя из вышеуказанных условий для каждого из выбранных объектов приведены в таблице 3.

Таблица 1. Начальные условия выполнения 1 и 2 серии измерений

Table 1. Initial conditions for performing the 1st and 2nd series of measurements

1-я серия (A) / 1st series (A)			2-я серия (B) / 2nd series (B)		
Start	End	Number	Start	End	Number
					50
		20	0,1	0,02	40
					30
					50
		30	0,2	0,005	40
					30
					50
Auto	Auto	40	0,3	0,008	40
					30
					50
		50	0,4	0,01	40
					30
					50
		60	0,5	0,05	40
					30

Таблица 2. Начальные условия выполнения 3, 4 и 5 серии измерений
Table 2. Initial conditions for the 3rd, 4th and 5th series of measurements

Number	3-я серия (C) / 3rd series (C)		4-я серия (D) / 4th series (D)		5-я серия (E) / 5th Series (E)	
	Start	End	Start	End	Start	End
50						
45						
40	0,1	0,01	0,1	0,01	0,2	0,01
35						
30						
50						
45						
40	0,2	0,01	0,1	0,02	0,2	0,02
35						
30						
50						
45						
40	0,4	0,01	0,1	0,04	0,2	0,04
35						
30						
50						
45						
40	0,8	0,01	0,1	0,08	0,2	0,08
35						
30						

Для сравнения средних значений, полученных в результате эксперимента выборок данных, использовался t-критерий Стьюдента. Критерием наличия различий между группами фрактальных размерностей (между средними значениями, приведенными в табл. 3), служил уровень значимости меньше 0,05. Полученные значения t-критерия по исследуемым бассейнам показали, что ясного и последовательного заключения о зависимости различия или не различия средних показателей фрактальной размерности от начальных условий эксперимента сделать невозможно. Но при графическом рассмотрении данных (табл. 3) была выявлена корреляция между графиками зависимости фрактальной размерности от объекта измерения для каждого начальных условий (рис. 1).

На рисунке 1 явно прослеживается корреляция между рассматриваемыми зависимостями. В виду этого было принято решение провести сравнение среднего значения фрактальной размерности, рассчитанного для всех условий с литературными данными (см. табл. 3). Данный сравнительный анализ приведен на рисунке 2.

На рисунке 2 хорошо заметна корреляция между рассматриваемыми зависимостями. Для трех слегка «выпадающих» точек (р. Белая, у. Волги и у. Лены) следует отметить, что литературные данные о значении фрактальной размерности приведены для растровых изображений, некоторые из которых получены даже не из слоев QGIS.

Какой же вывод по вопросу о влиянии на фрактальную размерность различных масштабов измерений при ее определении?

Влияет ли изменение масштабирования накладываемых ячеек на результаты расчёта фрактальной размерности в рамках метода «box-counting» – определено да. Попытка количественно определить это влияние,

например, расчетом значения t-критерия не дало определенного результата. Но, как положительный результат, можно считать, то что между зависимостями значений фрактальной размерности от объекта измерения для каждого из начальных условий определения фрактальной размерности существует явная прямая корреляция. Причем полученные зависимости вполне заметно коррелируют и с литературными данными. А это очень существенно т.к., как мы хорошо знаем, для объектов, полученных в неравновесных условиях в первую очередь имеет значение корреляции, а не абсолютные величины.

Исходя из выше сказанного, для дальнейшего исследования была выбрана серия измерений в табл. 3 обозначенная литерой «С». Причины этого выбора обосновываю двумя их характеристиками:

1. Именно зависимость этой серии наиболее близка к зависимости средних значений, рассчитанных по всем сериям вычислений.

2. В этой серии наиболее низкий порог значения наименьшего размера накладываемой ячейки при вполне приемлемых временных затратах.

2. Выявление наличия корреляций между значениями фрактальной размерности водных бассейнов, полученными при помощи разных прикладных программ
 Данные по рассчитанным значениям фрактальной размерности для девяти водосборов (выбранных как объекты исследования), полученные при помощи семи специальных компьютерных программ представлены в табл. 4.

Следует отметить, что при обработке экспериментальных данных, в среде MS-Excel было подтверждено, что изучаемые объекты являются монофракталами. Об этом свидетельствует линейная зависимость логарифма числа «занятых ячеек» ($\log N$) от логарифма размера этих ячеек ($\log a$), например, для водосбора реки Белая рис. 3.

Таблица 3. Зависимость фрактальной размерности гидрологического бассейна (реки или устья) от начальных условий расчёта
Table 3. Dependence of the fractal dimension of a hydrological basin (river or mouth) on the initial conditions of calculation

Начальные условия Initial conditions	Бассейн / Basin									
	р. Белая Belaya R.	р. Сура Sura R.	р. Сарс Sars R.	р. Аяя Ayia R.	р. Уфа Ufa R.	р. Юрюзань Yuryuzan R.	Устья р. Селенги mouth of Selenga R.	Устья р. Волги mouth of Volga R.	Устья р. Лены mouth of Lena R.	
	Фрактальная размерность / Fractal dimension									
A	1,6140	1,6118	1,4528	1,5602	1,4772	1,4405	1,4468	1,5674	1,4761	
B	1,6370	1,6137	1,2486	1,4180	1,4767	1,3485	1,3399	1,3793	1,3489	
C	1,5835	1,5493	1,4011	1,4969	1,4904	1,4295	1,3980	1,4578	1,4127	
D	1,5959	1,5818	1,4246	1,5365	1,5345	1,4865	1,4508	1,5237	1,3475	
E	1,7432	1,7081	1,4776	1,6423	1,6393	1,5518	1,4557	1,5962	1,5264	
Среднее Mean value	1,6347	1,6129	1,4009	1,5308	1,5236	1,4513	1,4182	1,5049	1,4223	
Литературные данные Literature data	1,2000	1,5640	1,2400	1,3900	1,4800	1,3400	1,3800	1,7200	1,5600	

Примечание: серым цветом выделены значения фрактальной размерности для растровых слоев
Note: Fractal dimension values for raster layers are highlighted in gray

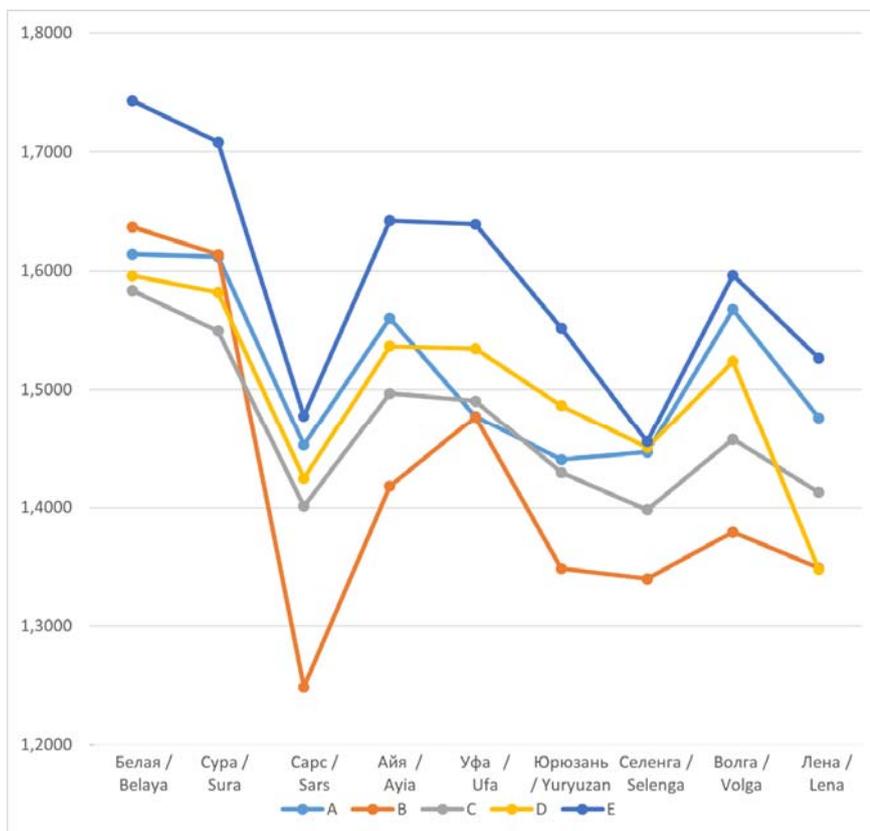


Рисунок 1. Графики зависимости фрактальной размерности от объекта измерения для каждого начальных условий (описание условий А, В, С, D, E – смотри таблицы 1 и 2)

Figure 1. Graphs of fractal dimension dependence on the object of measurement for each initial conditions (description of conditions A, B, C, D, E – see Tables 1 and 2)

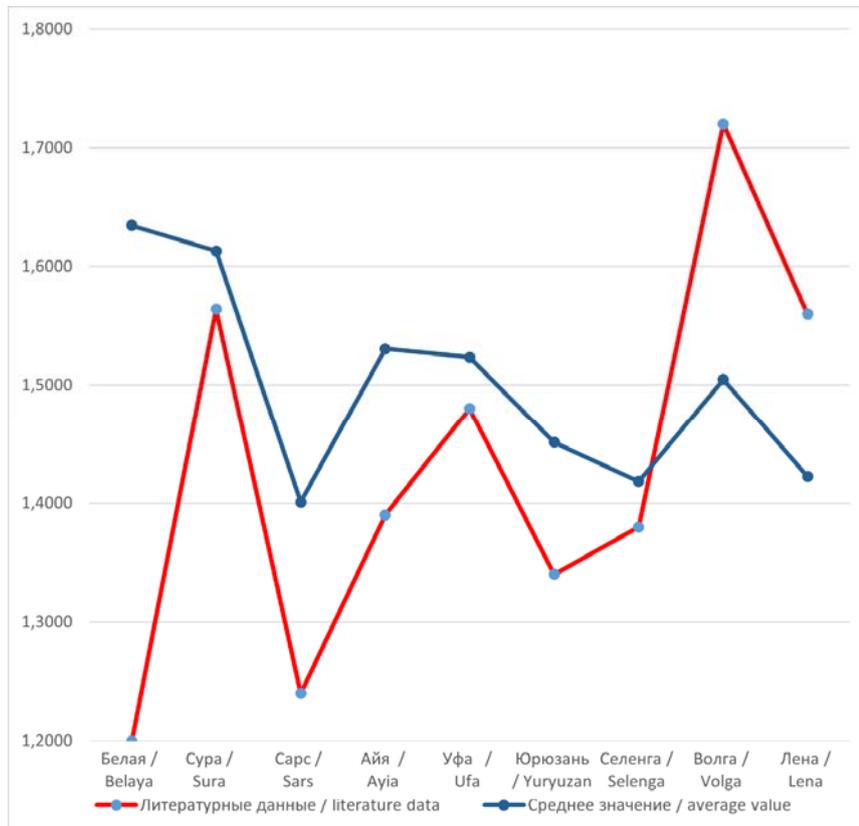


Рисунок 2. Сравнительный анализ зависимости среднего значения фрактальной размерности, рассчитанного для всех условий с литературными данными

Figure 2. Comparative analysis of the dependence of the average fractal dimension value calculated for all conditions with literature data

Таблица 4. Значения фрактальных размерностей водосборов рассчитанных при помощи разных программ
Table 4. Values of fractal dimensions of watersheds calculated using different software

Река / River	Программа Software	р. Белая Belaya R.	р. Сура Sura R..	р. Сарс Sars R.	р. Айя Ayia R.	р. Уфа Ufa R.	р. Юрюзань Yuryuzan R.	р. Селенга Selenga R.	р. Волга Volga R.	р. Лена Lena R.
	Min Dem	1,5835	1,5493	1,4011	1,4969	1,4904	1,4295	1,3980	1,4578	1,4127
	Fractalyse	1,5761	1,542	1,336	1,478	1,480	1,407	1,313	1,439	1,394
	ImageJ	1,6857	1,5617	1,1312	1,3760	1,3559	1,3413	1,0863	1,2182	1,2820
	Frac_Lac	1,7199	1,6816	1,2600	1,5861	1,5606	1,4595	1,2640	1,5555	1,5460
	FDE	1,7900	1,6900	1,3200	1,5100	1,5300	1,4600	1,2400	1,5000	1,5200
	Gwyddon	1,6260	1,5410	1,2510	1,4390	1,4150	1,3350	1,1800	1,4510	1,3480
	Fractal	1,4735	1,3081	1,1444	1,2094	1,1915	1,1960	1,0683	1,1304	1,1960

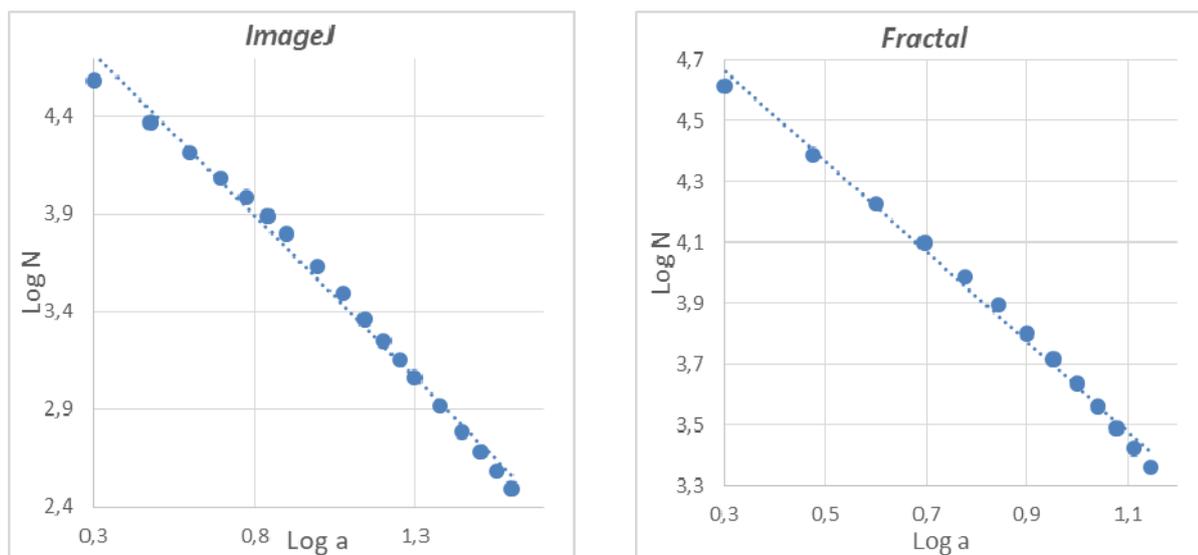


Рисунок 3. Пример графиков зависимости ($\log N$) от ($\log a$), для р. Белая

Figure 3. An example of dependency plots for values ($\log N$) versus ($\log a$) for the Belaya River

Если данные таблицы 4 отобразить в виде графиков зависимости фрактальной размерности от водного бассейна для каждой из используемой компьютерной программы, то получим картину (рис. 4), в некотором роде схожую с рисунком 1.

Как хорошо видно из рисунка, мы наблюдаем хорошо заметную корреляцию между рассматриваемыми зависимостями. Более подробно анализируя рис. 4 можно заметить некоторую большую «плавность»

графиков, относящихся к программам Minkowski Dimension Calculator и Fractalyse. Это является следствием того, что именно эти программы работают непосредственно с shp-файлами и полностью не зависят от масштаба обрабатываемых изображений. Остальные же программы работают с bmp-изображениями и результаты их расчётов уже подвержены влиянию масштаба, при котором было получено изображение.

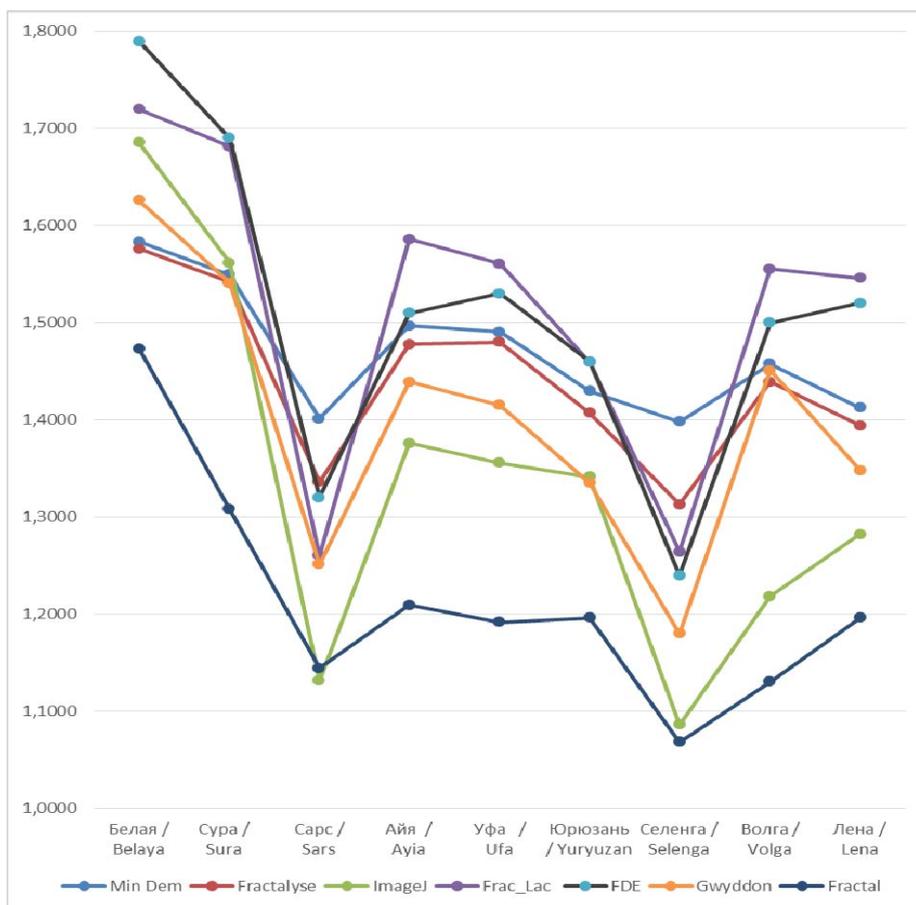


Рисунок 4. Графики зависимости фрактальной размерности от выбранного водного бассейна для семи компьютерных программ

Figure 4. Graphs of dependence of fractal dimension on the selected water basin for seven used software

Из пяти программ, работающих с bmp-файлами, на рисунке 4 можно выделить графики ImageJ и Fractal. Их некоторое отличие от других наблюдается как для расположения точек, соответствующих бассейнам реки Белая и устья реки Лены, так и заниженными значениями фрактальной размерности для всех объектов.

Это объясняется, тем что именно эти две программы выдают как результат не готовое значение фрактальной размерности, а только значения количества «занятых ячеек» в зависимости от их размера (N от a). А уже в дальнейшем, при получении некоторого массива данных (рис. 3), средствами MS-Excel проводится расчёт фрактальной размерности.

Какие выводы можно сделать по этой части исследования?

Если рассматривать «Свободное программное обеспечение (free software)», то выбор программы будет зависеть от цели исследования:

1. Если цель – выявление каких-либо зависимостей фрактальной размерности от независимого параметра исследуемого объекта, то преимущество имеют пакеты Minkowski Dimension Calculator и Fractalyse, т.к. они дают результаты, не зависящие от масштаба т.к. работают непосредственно с векторными слоями. Причем Minkowski Dimension Calculator более удобная в использовании программа, а Fractalyse более «быстрая».

2. Если цель – различного рода работы, связанные с исследованием распределения «занятых ячеек» в зависимости от их размера или работы, выявляющие некоторые статистические закономерности, то для этого имеются все преимущества у ImageJ и Fractal. При этом ImageJ еще дает широкие возможности работы с изображениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами предложенной работы стали, обоснованные выше, следующие общие выводы:

1. При работе непосредственно с векторными слоями (shp-файлами), зависимость фрактальной размерности от объекта исследования качественно сохраняется, не зависимо от исходных данных (стартовые и конечные размеры налагаемых ячеек, шаг размера ячейки). Поэтому точность расчётов, при помощи понижения стартовых и конечных размеров ячеек, можно повышать до разумных пределов (время выполнения) ограниченными вычислительными мощностями ПК.

2. При применении программ, использующих графические форматы, например, bmp, также качественно сохраняются корреляции между получаемыми графиками. Это дает широкие возможности для использования преимуществ каждой программы, в зависимости от целей и задач исследования.

3. Полученные результаты также качественно коррелируют с имеющимися в отечественной литературе данными.

Предполагаемое развитие данного исследования видится в следующих логических шагах: во-первых, выявление наличия корреляций между значениями фрактальной размерности полученных при помощи разных прикладных программ для растровых слоев водных бассейнов и сравнение этих результатов с соответствующими данными, полученными для векторных слоев. Во-вторых, определение более эффективных

и надежных методик исследования: выбор вида и формата слоя, выбор программы и ее предварительных настроек.

Положительное решение всех поставленных задач (шагов) в дальнейшем позволит расширить возможности качественного и количественного описания параметров водных объектов, в прогнозировании их изменения, что в настоящее время очень востребовано в научных целях или для решения конкретных прикладных задач [3; 7; 8; 10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mandelbrot B.B. The Fractal Geometry of Nature. New York: Freeman, 1983. 468 с.
2. Насонов А.Н., Цветков И.В., Кульнев В.В., Базарский О.В., Жогин И.М. Фрактальный анализ биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза // В сборнике: Проблемы управления водными и земельными ресурсами. Материалы международного научного форума: в 3 частях. Москва, 2015. С. 165–180.
3. Соболев С.В. Фрактальные параметры водных объектов. Н. Новгород: ННГАСУ, 2019. 232 с.
4. Abid R.I., Tortum A.T., Atalay A. Fractal Dimensions of Road Networks in Amman Metropolitan Districts // Alexandria Engineering Journal. 2021. V. 60. Iss. 4. P. 4203–4212. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.020>
5. Saa A., Gascò G., Grau J.B., Anton J.M., Tarquis A.M. Comparison of gliding box and box-counting methods in river network analysis // Nonlinear Processes in Geophysics. 2007. V. 14. P. 603–613. <https://doi.org/10.5194/npg-14-603-2007>
6. Tian S., Wang W., Shang H., Peng H. Comparison of Traditional Methods and Fractal Dimension Method in River Pattern Discrimination // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. V. 5 (23). P. 5450–5456. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.4217>
7. Красногорская Н.Н., Белозерова Е.А. Методология определения фрактальной размерности водосборной территории // Гидрометеорология и экология. 2021. N 62. С. 52–74. <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2021-62-52-74>
8. Сидорчук А.Ю. Фрактальная геометрия речных сетей // Геоморфология. 2014. Т. 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-1-3-14>
9. Красильников В.М., Соболев С.В. Фрактальные параметры рыбинского водохранилища на реке Волге // Приволжский научный журнал. 2018. N 4 (48). С. 87–94.
10. Соболев С.В., Красильников В.М. Фрактальные параметры водных объектов бассейна реки суры // Водное хозяйство России. 2018. N 6. С. 4–15.
11. Тунакова Ю.А. и др. Разработка методики определения самоочищающей способности рек на основе фрактальной геометрии для установления допустимого антропогенного воздействия // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18. N 19. С. 249–253.
12. Тищенко Н.Н., Цветков И.В. Фрактальный анализ речных систем Тверской области // Моделирование сложных систем. Выпуск 1. Тверь, 1998. С. 134–144.
13. Балханов В.К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления / от. ред. Ю.Б. Башкуев. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. 224 с.
14. Зынь В.И., Молчатский С.Л. Фрактальный анализ продуктов газоразрядной полимеризации // Химическая физика. 1998. Т. 17. N 5. С. 130–134.
15. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 134 с.
16. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.

REFERENCES

1. Mandelbrot B.B. *The Fractal Geometry of Nature*. New York, Freeman, 1983, 468 c.
2. Nasonov A.N., Tsvetkov I.V., Kul'nev V.V., Bazarskii O.V., Zhogin I.M. *Fraktal'nyi analiz biologicheskoi reabilitatsii vodnykh ob'ektov metodom korrektsii al'gotsenoza* [Fractal analysis of biological rehabilitation of water bodies by the method of correction of algocenosis]. In: *Problemy upravleniya vodnymi i zemel'nymi resursami* [Problems of water and land resources management]. Moscow, 2015, pp. 165–180. (In Russian)
3. Sobol S.V. *Fraktal'nye parametry vodnykh ob'ektov* [Fractal parameters of water bodies]. Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 2019, 232 p. (In Russian)
4. Abid R.I., Tortum A.T., Atalay A. Fractal Dimensions of Road Networks in Amman Metropolitan Districts. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, vol. 60, iss. 4, pp. 4203–4212. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.020>
5. Saa A., Gascò G., Grau J.B., Anton J.M., Tarquis A.M. Comparison of gliding box and box-counting methods in river network analysis. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2007, vol. 14, pp. 603–613. doi: 10.5194/npg-14-603-2007
6. Tian S., Wang W., Shang H., Peng H. Comparison of Traditional Methods and Fractal Dimension Method in River Pattern Discrimination. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, vol. 5 (23), pp. 5450–5456. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.4217>
7. Krasnogorskaya N.N., Belozeroва E.A. Methodology for determining the catchment area fractal dimension. *Journal of Hydrometeorology and Ecology*, 2021, no. 62, pp. 52–74. (In Russian). <https://doi.org/10.33933/2074-2762-2021-62-52-74>
8. Sidorchuk A.Yu. Fractal geometry of the river network. *Geomorfologiya*, 2014, vol. 1, pp. 3–14. (In Russian) <https://doi.org/10.15356/0435-4281-2014-1-3-14>
9. Krasilnikov V.M., Sobol S.V. Fractal parameters of the Rybinsk reservoir on the Volga River. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal* [Privolzhsky scientific]. 2018, no. 4 (48), pp. 87–94. (In Russian)
10. Sobol S.V., Krasilnikov V.M. The Sura river basin water bodies' fractal parameters. *Vodnoe khozyaistvo Rossii* [Water sector of Russia: problems, technologies, management]. 2018, no. 6, pp. 4–15. (In Russian)
11. Tunakova Yu.A. et al. Development of a methodology for determining the self-cleaning capacity of rivers based on fractal geometry to establish acceptable anthropogenic impact. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University]. 2015, vol. 18, no. 19, pp. 249–253. (In Russian)
12. Tishhenko H.H., Cvetkov I.V. Fraktal'nyi analiz rechnykh sistem Tverskoi oblasti [Fractal analysis of river systems of the Tver region]. In: *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Modeling of complex systems]. Tver', 1998, vol. 1, pp. 134–144. (In Russian)
13. Balkhanov V.K. *Osnovy fraktal'noi geometrii i fraktal'nogo ischisleniya* [Fundamentals of Fractal Geometry and Fractal Calculus]. 2013, 224 p. (In Russian)
14. Zyn' V.I., Molchatskii S.L. Fractal analysis of the polymerization products formed in gas discharge. *Khimicheskaya fizika* [Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics]. 1998, vol. 17, no. 5, pp. 130–134. (In Russian)
15. Smirnov B.M. *Fizika fraktal'nykh klasterov* [Physics of fractal clusters]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 134 p. (In Russian)
16. Feder E. *Fraktaly* [Fraktals]. Moscow, Mir Publ., 1991, 260 p. (In Russian)

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Сергей Л. Молчатский выполнил все этапы исследования. Автор написал рукопись и несет ответственность при обнаружении плагиата и самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Sergey L. Molchatsky completed all stages of the research. The author wrote the manuscript and is responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The author declares no conflict of interest.

ORCID

Сергей Л. Молчатский / Sergey L. Molchatsky <https://orcid.org/0009-0005-4156-2012>