

УДК 599.322.2:591.526

Фрактальность динамики численности белки

Колесников В. В.^{1,2}, Машкин В. И.²

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт охотничьего хозяйства и звероводства имени профессора Б. М. Житкова*

*Киров, Россия;
wild-res@mail.ru*

²*Вятская государственная сельскохозяйственная академия*

*Киров, Россия
mashkin_v_i@mail.ru*

Анализ многолетних рядов данных о численности белки на территории России показал, что колебания численности выглядят хаотичными. Авторы проверили гипотезу, является ли временной ряд данных о численности природным объектом, подчиненным принципам фрактала. По Б. Мандельброту (2015), если изучаемый объект близок к фракталу, то зависимость числа кубов, занятых объектом от размера элементарной ячейки будет расти в степенной зависимости. А в дважды логарифмических координатах данная зависимость будет стремиться к прямой линии. Хорошая аппроксимация линейной регрессии с логарифмическими отражениями числа квадратов от их размера подтверждает, что динамика численности белки подчиняется принципам фрактала, может быть использована как характеристика этого объекта, а внешняя хаотичность изменений ресурса на самом деле имеет природные определенности. Фрактальный анализ позволил в очередной раз подтвердить состоятельность данных Службы «урожая» ВНИИ охотничьего хозяйства и звероводства, выделить отличия динамики численности белки в периоды с различной промысловой нагрузкой и показал, что этот фактор имеет влияние на динамику промысловых охотничьих ресурсов. Анализ динамики численности по регионам показал, что ряды данных о ресурсах диких животных, не имеющие надежной фактологической и методической основы, скорее всего, не обладают фрактальными свойствами природных объектов. То есть фрактальный анализ может быть одним из критериев оценки качества мониторинга. Скорее всего такой анализ применим и к другим видам животных.

Ключевые слова: фрактальная размерность, белка, мониторинг, оценка ресурсов, динамика численности.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ данных мониторинга необходим для его совершенствования и возможности обоснованного прогноза изменений, наблюдаемых явлений и ресурсов. Особенно это актуально для эксплуатируемых человеком ресурсов. Мониторинг численности многих животных на регулярной основе ведется не давно. Например, одна из старейших мониторинговых служб Служба «урожая» ВНИИ охотничьего хозяйств и звероводства им. проф. Б. М. Житкова собирает данные оценок численности охотничьих животных более 80 лет. Список наблюдаемых видов увеличивался постепенно, постепенно совершенствовалась и методическая основа сбора и оценки информации. Поэтому анализ многолетних данных о численности тех животных, по которым это возможно, является ценным опытом для совершенствования этого мониторинга. Анализ длинных хронологических рядов достаточно трудоемок из-за большого количества информации (большой ряд лет, большое число регионов и пр.), но уже на первых стадиях анализа оценок численности можно заметить закономерности, ускользающие от внимания при работе с короткими периодами времени.

Анализ длинных рядов данных в абсолютных единицах численности можно продемонстрировать на примере ресурсов широкоареального вида. Например, белка – многочисленный ресурс, еще недавно вполне востребованный. В прошлом по ценности валовой продукции белка занимала в нашем пушном промысле первое место, оставляя позади себя соболя, лисицу, куницу и другие пушные виды. В «советское» время по стране в среднем за год заготавливалось до 4 млн. шкурок белки.

Цель настоящих исследований – на примере белки обыкновенной найти закономерности изменения ресурсов промысловых зверей, для понимания механизмов существования их

популяций, поиска возможностей долговременного прогнозирования численности этих животных и для обнаружения критериев оценки объективности мониторинга охотничьих ресурсов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ.

Ряды численности за несколько десятков лет взяты из данных Службы «урожая», которые на наш взгляд неплохо отражают тенденции динамики численности. Сбор опросной информации проводится на территории всей России по 18 формам анкет, адаптированных к 9 регионально-природным зонам страны. Бланки анкет рассылаются охоткорреспондентам два раза в год (для сбора данных по осенне-зимнему и весенне-летнему сезонам). Всего вопросы анкет охватывают 49 видов/групп млекопитающих и 24 видов/групп птиц. Полученные в результате опроса сведения заносятся в электронную базу данных и обрабатываются в специальном программном комплексе «Охотничьи ресурсы», после чего проводится распечатка видовых сводок, являющихся основой для составления текстовых обзоров состояния ресурсов во всех субъектах Российской Федерации и карты плотностей населения для каждого вида. Для перевода относительных балльных оценок в абсолютные показатели численности разработаны видовые пересчетные коэффициенты, базирующиеся на учетных данных. Для видов, по которым не проводятся регулярные учеты, для перевода балльных оценок в абсолютные показатели используются другие данные (объем добычи или заготовок, емкость и продуктивность угодий и т. п.). В 2000 году были сделаны первые попытки перевода средневзвешенных глазомерных балльных оценок в абсолютные показатели численности (Отчет о НИР..., 2000; Учеты и ресурсы..., 2007).

Служба «урожая» ВНИИОЗ в течении многих десятилетий собирает и обрабатывает анкетную информацию о численности охотничьих животных. По белки наиболее полны и информативны данные за 68 сезонов с 1950 по 2018 год. Именно их мы использовали в своём исследовании. Кроме стандартных методов вариационной статистики (Ивантер, Коросов, 2012), который проводился с применением программ Excel и Statistica 10, применяли метод оценки фрактальной размерности графика динамики численности, описанный Бенуа Мандельбротом (2015).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Динамика численности белки за рассматриваемый период в абсолютных единицах, как и в балльных значениях (Кирис, 1973), подтверждает характер, присущий лабильному типу. Максимальный всплеск численности в масштабах страны отмечены в сезон 1987/88 года – по сравнению с предыдущим в 3,18 раза (на 332 %). Изменения численности нерегулярны, при этом трудно выявить какую-то закономерность кроме той, что за 68 лет наблюдалось 22 пика численности, то есть средняя продолжительность цикла составляет 3,09 лет. Примерно такие же результаты имеют место при рассмотрении динамики в отдельных регионах.

Анализ добычи белки по анкетным данным ограничен размером выборки корреспондентов, и здесь пересчёт на реальные заготовки, скорее всего, невозможен. Связь между анкетными относительными показателями добычи белки и ее численностью ни на региональном, ни на федеральном уровне обнаружить не удалось. Это может объясняться низкой долей добычи белки, особенно в последние 20 лет. В периоды активного промысла белки в России заготавливалось до 4 млн. шкурок – это 16 % от ее средней численности, а в последние 20 лет среднее изъятие составляет около 200 тыс. особей (менее 1 % от средней численности). Для вида, прирост популяций которого может быть до 400 %, такое изъятие ничтожно. Скорее всего, охота на белку не может влиять на ресурсы этого зверька. Корреляции между численностью и добычей белки не обнаружено (для максимальной добычи охотников коэффициент корреляции $r_1 = -0,031$; для средней добычи охотников $r_2 = 0,225$).

Данные о добыче говорят, о том, что изменение в отношении к ресурсу белки в нашей стране произошел в конце восьмидесятых годов двадцатого столетия. До этого времени белка

воспринималась как промысловый ресурс, а после 1988 года добывать белку стали меньше и все чаще попутно. На первый взгляд это не отразилось на динамике ресурса белки в стране и по регионам.

При анализе многолетних рядов численности белки было замечено, что в целом линия динамики (график) напоминает хаотически ломаную линию (рис. 1), похожую на береговую линию, охарактеризованной, в свое время, как фрактал (от латинского *fractus*, прилагательного от глагола *frangere* – ломать, разбивать на части). Подобные объекты могут быть проанализированы специальными статистическими методами. Введение математиками понятий «фрактал», «фрактальная размерность» и разработка теории фракталов во второй половине XX века позволяет формализовать математическое описание природных объектов и успешно применить эту теорию во многих областях человеческой деятельности.

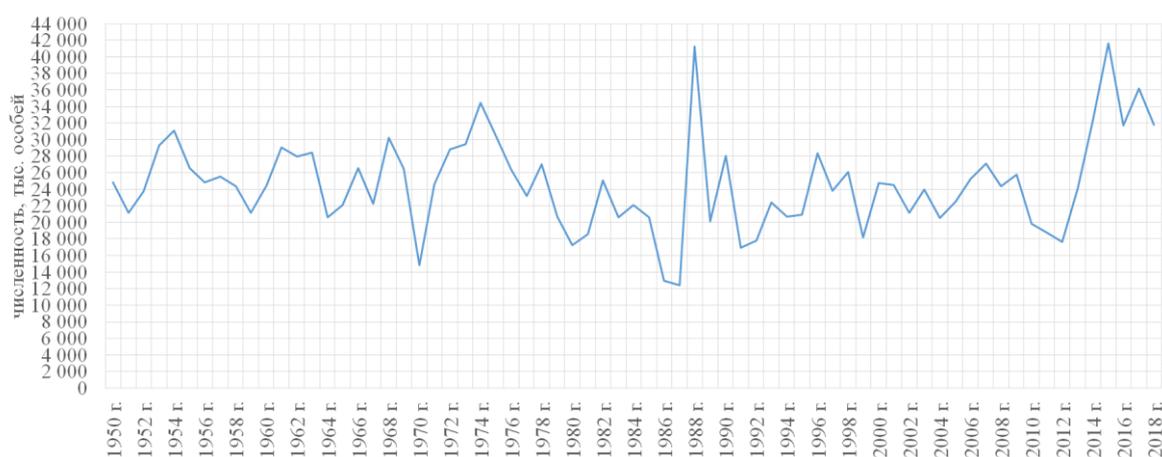


Рис. 1. Динамика численности белки в России

Фрактал – это множество, части которого подобны целому. Само понятие фрактал появилось благодаря работам Бенуа Мандельброта в семидесятых годах XX столетия.

Классическим примером природного фрактального объекта служит береговая линия. С проблемами измерения длины береговой линии Британии столкнулся в начале прошлого столетия английский гидромеханик Ричардсон при попытке заменить линию ломаной. Оказалось, что при уменьшении масштаба измерения длина ломаной резко возрастает. Мандельброт предложил аппроксимировать степень увеличения длины береговой линии в зависимости от масштаба степенным законом. Основной характеристикой фрактального объекта является фрактальная размерность:

$$D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(\delta)}{\ln(\frac{1}{\delta})},$$

где: δ – масштаб измерения, N – количество измерительных отрезков.

Соответственно, если изучаемый объект близок к фракталу, то зависимость числа кубов, занятых объектом от размера элементарной ячейки будет расти в степенной зависимости. А в дважды логарифмических координатах данная зависимость будет стремиться к прямой линии. Фрактальная размерность определяется как тангенс угла наклона этой линии. По Мандельброту, для фрактальных объектов фрактальная размерность должна быть больше топологической. Этот метод впоследствии стал считаться классическим.

По аналогии, определим, является ли временной ряд данных о численности природным объектом, подчиненным принципам фрактала. Если это так, то при определении фрактальной размерности мы сможем определить и оценить аппроксимацию линейной регрессии к точкам

с логарифмическими координатами. Если эта аппроксимация R^2 близка к 1, то можно предположить, что динамика численности белки подчиняется принципам фрактала. И внешняя хаотичность изменений ресурса на самом деле имеет природные определенности, пусть даже и не достаточно изученные.

Возьмем за масштаб (δ) количество лет в графике динамики численности и соответствующий ему интервал на шкале ОУ, чтобы получить квадратную сетку в поле построения графика, и пересчитаем количество квадратов (m), которые пересекает график динамики. Изменяя масштаб сетки сделаем это 5–6 раз. Затем прологарифмируем полученные значения (табл. 1) и построим график $y(x)$ (рис. 2). Для графика важна аппроксимация (R^2), по которой мы судим о фрактальности объекта исследования, и коэффициент a уравнения линейной регрессии $y(x)$, из которого можно рассчитать фрактальную размерность объекта по формуле $D=1-a$ (Мандельброт, 2015).

Таблица 1

Вычисление значений x и y динамики численности белки для построения графика в двойной логарифмической шкале

δ , лет	6	5	4	3	2	1
$x=\ln\delta$	1,7917595	1,6094379	1,3862944	1,0986123	0,6931472	0
m	25	31	40	54	85	184
$y=\ln(m\times\delta)$	5,0106353	5,0434251	5,0751738	5,0875963	5,1357984	5,2149358

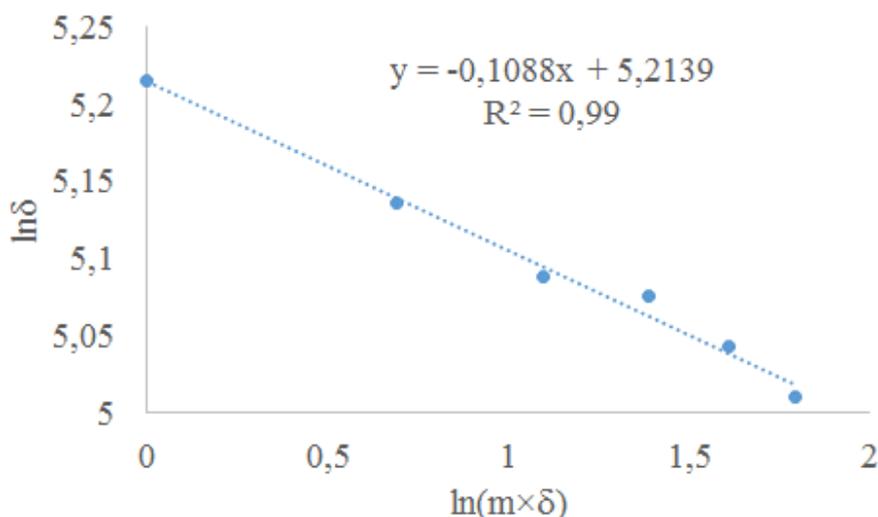


Рис. 2. Оценка фрактальной размерности графика динамики численности белки в России по аппроксимации графика $y(x)$, $R^2=0,99$; $D=1,1088$

Полученные показатели подтверждают нашу гипотезу о фрактальной природе динамики численности не только для белки, но и для волка (табл. 2, рис. 3).

Таблица 2

Вычисление значений x и y динамики численности волка для построения графика в двойной логарифмической шкале

δ , лет	6	5	4	3	2	1
$x=\ln\delta$	0,78	0,69897	0,60206	0,477121	0,30103	0
m	9	11	14	19	30	63
$y=\ln(m\times\delta)$	1,73	1,740363	1,748188	1,755875	1,778151	1,799341

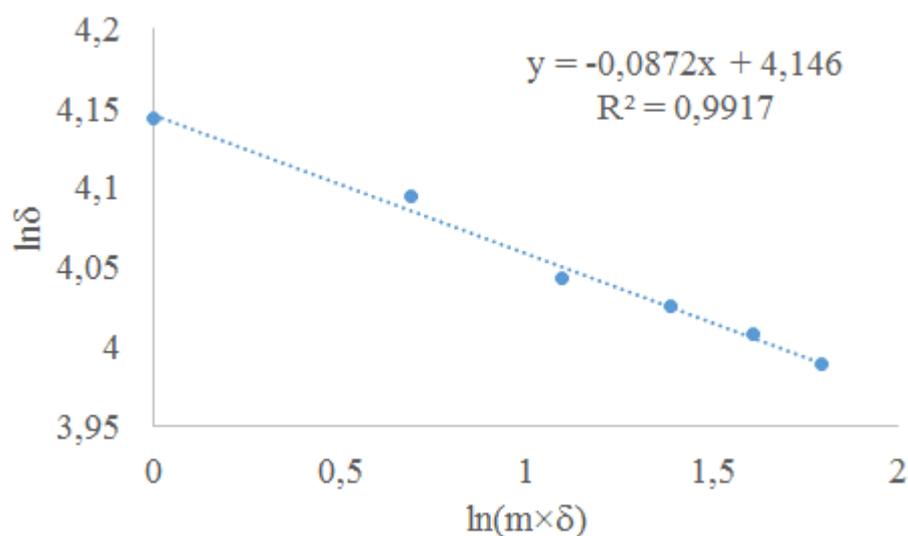


Рис. 3. Оценка фрактальной размерности графика динамики численности волка в России

Проверка гипотезы о фрактальной размерности динамики численности белки по периодам, отмеченным выше и связанным с изменением отношения охотников к промыслу белки, показала, что эти периоды отличаются (рис. 4). Мы выделили два периода: 1950–1987 годы (в этот период стабильной советской экономики заготовки белки были организованы плановым образом и имели стабильный характер) и 1988–2018 годы (когда интерес к добыче белки сильно упал и ее стали добывать в большей части попутно).

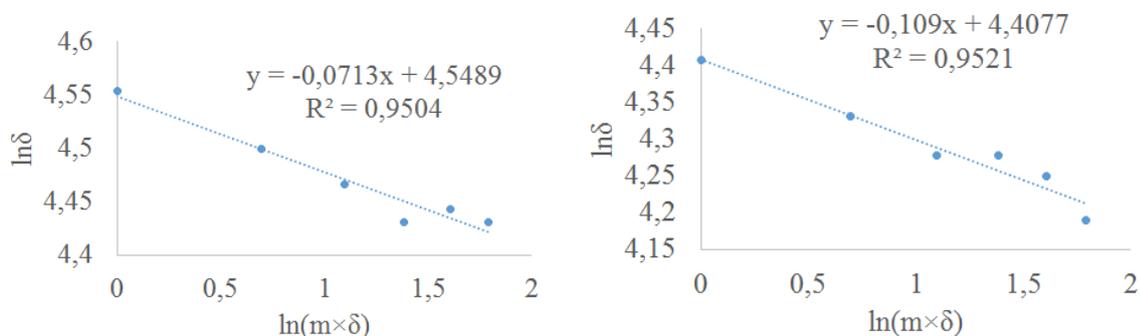


Рис. 4 - Оценка фрактальной размерности графика динамики численности белки в России по двум периодам: 1950–1987 и 1988–2018 годы

Выбрав несколько регионов (из-за трудоемкости метода) мы проверили нашу гипотезу для регионального масштаба и сравнили показатели фрактальной размерности по аналогичным периодам и за весь наблюдаемый период (табл. 3)

Фрактальная размерность взятых периодов несколько отличается – $D_1=1,0713$, а $D_2=1,109$. В последнем периоде она увеличилась, то есть динамика стала более ломаной. Как правило увеличение фрактальности говорит об увеличении неустойчивости объекта. Есть исследования, которые показывают, что увеличение фрактальной размерности является предвестником кризисных явлений (Цветков и др., 1999; Гуляева и др., 2001; Цветков и др., 2001, Фрактальный анализ..., 2020)

Любопытно проследить этот процесс на примере динамики численности диких животных в будущем. Хотя увеличение размерности было небольшим, оно указывает на некоторую дестабилизацию и подтверждает, что стабильная эксплуатация вида является залогом

устойчивого развития охотничьего ресурса, а изменение промыслового усилия имеет отрицательную окраску. Любопытно, что показатели фрактальной размерности для всего ряда и для неустойчивого периода практически одинаковы – 1,109 и 1,1088. Очевидно величину размерности ломаной определяет ее более ломаный участок.

Таблица 3

Сравнение фрактальной размерности динамики численности белки в некоторых регионах России и в целом по стране по разным отрезкам времени

Регион	Значение показателей и годы					
	D ₁	D ₂	D _{общ.}	R ₁ ²	R ₂ ²	R _{общ.} ²
	1950–1987	1988–2018	1950–2018	1950–1987	1988–2018	1950–2018
Российская Федерация	1,0713	1,109	1,1088	0,9504	0,9521	0,9900
Рязанская область	1,1356	1,0868	1,1315	0,9333	0,8871	0,9955
Кировская область	1,1317	1,0800	1,1333	0,9746	0,9334	0,9755
Республика Коми	1,1356	1,0868	1,1315	0,9333	0,8871	0,9955
Иркутская область	1,1074	1,0982	1,1163	0,9901	0,9428	0,9830
Хабаровский край	1,1074	1,0862	1,1028	0,9901	0,9317	0,9946
Тульская область	1,002	1,0416	1,0567	0,0039	0,1088	0,3213

Примечание к таблице. D₁ – фрактальная размерность за период 1950–1987 годы; D₂ – фрактальная размерность за период 1988–2018 годы; D_{общ.} – фрактальная размерность за период 1950–2018 годы; R₁² – аппроксимация линейной регрессии y(x) за период 1950–1987 годы; R₂² – аппроксимация линейной регрессии y(x) за период 1988–2018 годы; R_{общ.}² – аппроксимация линейной регрессии y(x) за период 1950–2018 годы.

В результате такого анализа, можно предположить, что ослабление промысла все-таки сказалось на популяциях белки в России.

Аппроксимация графиков по большинству территорий достаточно высокая, что подтверждает природную определенность фрактала для динамики численности белки. Показатели фрактальной размерности имеют достаточно близкие значения по выбранным периодам. Отличается от этих закономерностей показатели по Тульской области (табл. 3).

Это может иметь следующее объяснение. Из некоторых регионов сведения от охоткорреспондентов с оценкой численности белки поступают нерегулярно. Это происходит по разным причинам. Где-то белка не является эксплуатируемым ресурсом, и охотники не обращают на нее должного внимания, где-то недостаточно корреспондентов, где-то белка обитает не на всей территории региона и корреспондент из той части, где белка не обитает не дает сведения и т.п. Таких регионов достаточно много, но ресурсы там, составляют от общей численности белки в стране менее одного процента. Тем не менее, в мониторинге сочли некорректным оставлять эти территории без всякой оценки численности. В этом случае специалисты Службы «урожая» экспертно (по другим возможным источникам) дают свою оценку. Например, в Тульской области, где численность белки редко оценивалась корреспондентами, значительная часть оценок была сделана по аналогии с соседними территориями (экспертно), без полевых наблюдений. То есть ряд можно считать искусственным. Очевидно, поэтому тенденция изменения фрактальной размерности по выбранным периодам и в целом не совпадает с таковой у регионов с надежными оценками, а аппроксимация регрессии логарифмических отражений числа квадратов от их размера далека от приемлемой; таким образом, этот объект не похож на объект с природными фрактальными свойствами. Возможно, ряды экспертных данных, не имеющие достаточной фактологической базы, нефрактальны и по этой характеристике выделяются на фоне достоверных данных в худшую сторону. Предстоит выяснить, может ли эта характеристика помочь в выбраковке недостоверных данных или мы наблюдали частный случай. То есть, может ли этот момент быть ключевым методическим положением для контроля мониторинга? Предстоит выяснить,

о чем говорит изменение фрактальной размерности, с чем это связано и к чему ведет. Эти и подобные вопросы конструктивны в построении методических положений контроля мониторинга и требуют разрешения в будущих исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период «Перестройки» произошла смена отношения охотников к ресурсам белки: в советский период она добывалась планомерно и стабильно, а в дальнейшем интерес к этому ресурсу сильно ослаб. Поэтому в анализе динамики ресурсов белки можно выделить хронологическую границу – около 1987–88 годы.

Можно сказать, что ослабление промысла сказалось на популяциях белки в России. Фрактальная размерность ее динамики численности изменилась, и линия ее графика стала выглядеть более ломанной. Как правило, изменение фрактальной размерности говорит об увеличении неустойчивости объекта.

Хорошая аппроксимация линейной регрессии с логарифмическими отражениями числа квадратов от их размера подтверждает, что динамика численности белки подчиняется принципам фрактала и внешняя хаотичность изменений ресурса на самом деле имеет природные определённости. Это так же говорит о неплохом качестве данных, собранных Службой «урожая».

Фрактальная размерность временного ряда данных мониторинга может быть использована как характеристика этого объекта.

Мониторинговые ряды данных о ресурсах диких животных, не имеющие надежной фактологической и методической основы, скорее всего, не обладают фрактальными свойствами природных объектов.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность всем охоткорреспондентам Службы «урожая» ВНИИОЗ им. проф. Б. М. Житкова.

Работа выполнена в рамках научно исследовательских работ ФГБНУ ВНИИОЗ им. проф. Б.М. Житкова по государственному заданию темы № 0766-2019-0001.

Список литературы

- Гуляева О. С., Толкаченко Г. Л., Цветков В. П., Цветков И. В. Фрактальная размерность в исследовании динамики валютного курса // Моделирование сложных систем. – Вып. 3. – Тверь : Изд-во ТвГУ, 2001. – С. 176–189.
- Ивантер Э. В., Коросов А. В. Элементарная биометрия. – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2013. – 110 с.
- Кирис И. Д. Белка. – Киров : Волго-Вятское кн. изд-во, 1973. – 447 с.
- Мандельброт Б. Б. Какова длина побережья Британии? Статистическое самоподобие и фрактальная размерность. – СПб. : «Страта», 2015. – 129 с.
- Отчет о НИР по заданию «Разработать шкалу региональных оценок численности охотничьих животных» по теме 01.01. Обосновать систему комплексного устойчивого природопользования в регионах РФ Раздел 01.01.03. Совершенствовать методическую основу мониторинга охотресурсов. – Киров : ВНИИОЗ РАСХН, 2000. – 147с.
- Учеты и ресурсы охотничьих животных России / [Ред. В. И. Машкин]. – Киров, 2007. – 302 с.
- Фрактальный анализ и его применение к исследованию временных рядов. <https://revolution.allbest.ru/mathematics/d00243832.html> (Обращение 20.04.20)
- Цветков В. П., Рыжиков В. Н., Цветков И. В., Иванов В. В. Фрактальные методы в изучении социально-экономических систем // Моделирование сложных систем. – 1999. – Вып. 2. – С. 72–81.
- Цветков И. В. Фрактальная размерность временного ряда как «флаг» катастроф в социально-экономических процессах // Моделирование сложных систем. – 2001. – Вып. 3. – С. 121

Kolesnikov V. V., Mashkin V. I. Fractality of the dynamics of the number of squirrel // Ekosistemy. 2020. Iss. 23. P. 133–140.

The analysis of long-term series of data on the number of squirrel in Russia showed that fluctuations of population look chaotic. The authors tested the hypothesis whether the time series of abundance data is a natural object that follows the fractal principles. According to B. Mandelbrot, if the studied object is close to a fractal, the dependence of the number of cubes occupied by the object on the size of the unit cell will grow in a power-law dependence. This dependence will tend to a straight line in the double logarithmic coordinates. A good approximation of linear regression with logarithmic reflections of the number of squares from their size confirms that the dynamics of the number of squirrels follows the principles of the fractal, and can be used as a characteristic of this object, and the external randomness of changes in the resource actually has natural determinations. Fractal analysis once again confirmed the consistency of the data from the “Harvest” Service of the Russian Research Institute of Game Management and Fur Farming, highlighted the differences in the dynamics of the abundance of squirrels during periods with different fishing loads and showed that this factor has an effect on the dynamics of commercial hunting resources. An analysis of the dynamics of abundance by region showed that data series on wild animal resources that do not have a reliable factual and methodological basis most likely do not have fractal properties of natural objects. That is, fractal analysis can be one of the criteria for assessing the quality of monitoring. Most likely, this analysis is applicable to other animal species.

Key words: fractal dimension, squirrel, monitoring, resource estimation, population dynamics.

Поступила в редакцию 10.05.20