

**ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ****ECONOMIC STUDIES**

DOI: 10.12731/2070-7568-2022-11-4-7-23

УДК 519.862.2, 51-77

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
МЕТОДОВ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА***Ю.В. Мельникова, Ю.В. Лажаннинкас*

*Развитие современных информационно-аналитических технологий открывает новые возможности экономического анализа и прогнозирования рыночных ситуаций. Многие технологии современного финансового анализа базируются на гипотезе эффективного рынка, согласно которой изменение цен на рынке ценных бумаг в логарифмических координатах представляют собой случайный (гауссовский) процесс. Однако, исследования последних 30 лет свидетельствуют, что это не так и обычная статистическая модель зачастую не пригодна для анализа большинства экономических показателей. На смену гипотезе эффективного рынка приходит фрактальная теория и гипотеза фрактального рынка, основанная на понятии самоподобия в разных временных шкалах. Статья посвящена математическому и статистическому анализу динамики экономических показателей на основе теории фракталов. Представлены результаты фрактального анализа временного ряда динамики курса EUR/RUB за период 2013-2022 гг. методом нормированного размаха Херста. Результатом исследования стало выявление фрактальных свойств указанного временного ряда, доказательство его нелинейности и присутствия в динамике эффекта долговременной памяти. Полученные результаты доказывают необходимость использования специализированных фрактальных методов для дальнейшего исследования*

*и прогнозирования динамики временных рядов, обладающих самоподобной статистической структурой.*

**Цель** – анализ экономических процессов на основе инструментов фрактальной математики

**Метод или методология проведения работы.** В ходе исследования использованы общеметодологические принципы научного познания: сравнительного, аналитического, абстрактно-логического анализов, экономико-математических, экономико-статистических моделей и моделирования с использованием современного программного обеспечения. Расчеты проводились средствами прикладных программ Microsoft Excel, Statistica, R, Matrixer.

**Результаты.** Выявлены фрактальные свойства финансового временного ряда, обоснована необходимость использования новых методов прогнозирования экономических показателей.

**Область применения результатов.** Полученные результаты целесообразно применять экономистам, трейдерам и бизнес-аналитикам, осуществляющим исследование динамики экономических и финансовых показателей.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование; фрактал; показатель Херста; непараметрический анализ; фрактальный ряд; персистентность; трендоустойчивость; модель; динамика; цикличность

## COMPUTER MODELING OF ECONOMIC PROCESSES USING FRACTAL ANALYSIS METHODS

*J.V. Melnikova, J.V. Lazhauninkas*

*The development of modern information and analytical technologies opens up new opportunities for economic analysis and forecasting of market situations. Many technologies of modern financial analysis are based on the efficient market hypothesis, according to which price changes in the securities market in logarithmic coordinates represent a random (Gauss) process. However, studies of the last 30 years show that this is not the case*

*and the usual statistical model is not suitable for analyzing most economic indicators. The effective roar hypothesis is replaced by the fractal theory and the fractal market hypothesis based on the concept of self-similarity in different time scales. The article is devoted to the mathematical and statistical analysis of the dynamics of economic indicators based on the theory of fractals. The results of the fractal analysis of the time series of the dynamics of the EUR/RUB exchange rate for the period 2013-2022 by the method of the normalized Hearst swing are presented. The result of the study was the identification of the fractal properties of the specified time series, the proof of its nonlinearity and the presence of the effect of long-term memory in the dynamics. The results obtained prove the necessity of using specialized fractal methods for further research and forecasting the dynamics of time series with a self-similar statistical structure.*

**Purpose of the work** is to analyze economic processes based on the tools of fractal mathematics.

**The method or methodology of work:** in the course of the research, general methodological principles of scientific cognition were used: comparative, analytical, abstract-logical analyses, economic-mathematical, economic-statistical models and modeling using modern software. The calculations were carried out using the application programs Microsoft Excel, Statistica, R, Matrixer.

**Results:** we have identified fractal properties of the financial time series, justified the need to use new methods of forecasting economic indicators.

**Scope of the results:** it is advisable to apply the obtained results to economists, traders and business analysts studying the dynamics of economic and financial indicators.

**Keywords:** computer modeling; fractal; Hurst index; nonparametric analysis; fractal series; persistence; trend tolerance; model; dynamics; cyclicity

Открытие Бенуа Мандельбротом фрактальной геометрии позволило по-другому описать существующие объекты и явления окружающего мира. В краткие сроки методология теории фракталов нашла

свое практическое применение в различных областях науки и техники. Фракталом (от латинского Fractus – дроблённый, сломанный, разбитый) Бенуа Мандельброт обозначил геометрическую фигуру, обладающую свойством самоподобия, то есть составленную из нескольких частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком [16, 17]. Фракталы имеют уникальные параметры, которые могут быть точно рассчитаны, и обладают свойствами, позволяющими улучшить процесс моделирования объектов.

Исключительным качеством фракталов является наличие эффекта самоподобия, которое означает масштабную инвариантность его во времени и пространстве. Графически фрактальные зависимости имеют вид прямой линии, где координатные оси имеют логарифмический масштаб. Модели, описываемые таким образом должны использовать степенную зависимость. Эта особенность масштабирования по степенному закону является вторым свойством фракталов, фрактальной размерностью, которая может описывать либо физическую структуру, либо временной ряд [15, 16]. Основной количественной характеристикой фракталов является их дробная размерность  $D$ , введенная Хаусдорфом в 1919 г. для компактного множества в произвольном метрическом пространстве [14, 15].

Отдельной областью применения теории фракталов является анализ разнообразных временных рядов: упорядоченных по времени последовательностей статистических значений каких-либо параметров исследуемого процесса. В настоящее время многими отечественными и зарубежными учеными выявлено, что фракталами являются графики, отражающие динамику различных процессов [2, 4, 5, 7, 8]. Фрактальные временные ряды возникают, например, при измерениях различных естественных процессов: структура соцветий растений, линия вершин гор, уровни разливов рек, строение кровеносной и нервной системы человека и многие другие.

Применение новой методологии теории фракталов в экономических исследованиях активно занимаются многие ученые. Использование математического аппарата фрактального исчисления открывает широкие возможности анализа и моделирования финансовых

процессов, а правильно построенная статистическая фрактальная модель позволяет получить достаточно точные и адекватные прогнозы на перспективу [4, 6, 10].

С недавних пор появилось понятие фрактальных временных рядов как целого класса кривых, широко используемых при описании и моделировании разнообразнейших явлений, в том числе экономических процессов. Способ для исследования фрактальных временных рядов был предложен Мандельбротом [16, 17]. Основой метода стали исследования, проведенные английским исследователем Херстом, изучавшим геометрическую структуру береговой линии реки. [14]. Метод исследования назван R/S – анализом и построен на анализе размаха параметра (разности между наибольшим и наименьшим значением на изучаемом отрезке) и среднеквадратичного отклонения.

R/S-анализ является непараметрической статистикой, поэтому форма распределения случайной величины не имеет значения. Важно лишь соблюдение условия статистической независимости исследуемой величины, т.е. отсутствие автокорреляций показателей. Учеными замечено, что для большинства временных рядов, описывающих природные процессы: осадки, разливы рек, урожайность и т.п. автокорреляции выражены незначительно. Временные ряды финансовых показателей наоборот обладают ярко выраженными и продолжительными автокорреляциями. Кроме того, хорошо известно, что финансовые ряды представляют собой ряды с геометрическим ростом, а природные – ряды с арифметическим ростом. Поэтому при проведении R/S-анализа временных рядов природных процессов исследуют исходные ряды, а при исследовании финансовых рядов – ряды разностей логарифмов цен (логарифмические приращения) [4, 7, 11].

Методика исследования подробно описана в работах [3, 5, 6, 10, 12, 17, 19]. Главным результатом расчетов является нахождение величины показателя Херста  $H$  и дробной размерности фрактального ряда  $D$ . Показатель Херста может быть: менее 0,5; равен 0,5 или находиться в промежутке от 1/2 до 1.

В случае, когда значение показателя Херста  $H = 1/2$ , считается, что ряд составлен из независимых случайных значений. Корреляция

между значениями ряда отсутствует и события абсолютно случайны.

Если показатель Херста находится в промежутке от  $1/2$  до  $1$ , то временной ряд называют персистентным, т.е. устойчивым. В этом случае говорят об эффекте долговременной памяти ряда. Это означает, что вектор его направления с высокой долей вероятности не изменится в ближайшее время. Трендоустойчивость поведения ряда (так называемая сила персистентности) увеличивается при приближении показателя Херста к единице. Чем ближе значение  $H$  к  $1/2$ , тем более зашумлен ряд и тем, соответственно, менее выражен его тренд. Персистентный ряд – это обобщенное броуновское движение, или смещенные случайные блуждания. Сила этого смещения зависит от того, насколько  $H > 1/2$ . Чем выше показатель Херста, тем менее «зашумлен» временной ряд.

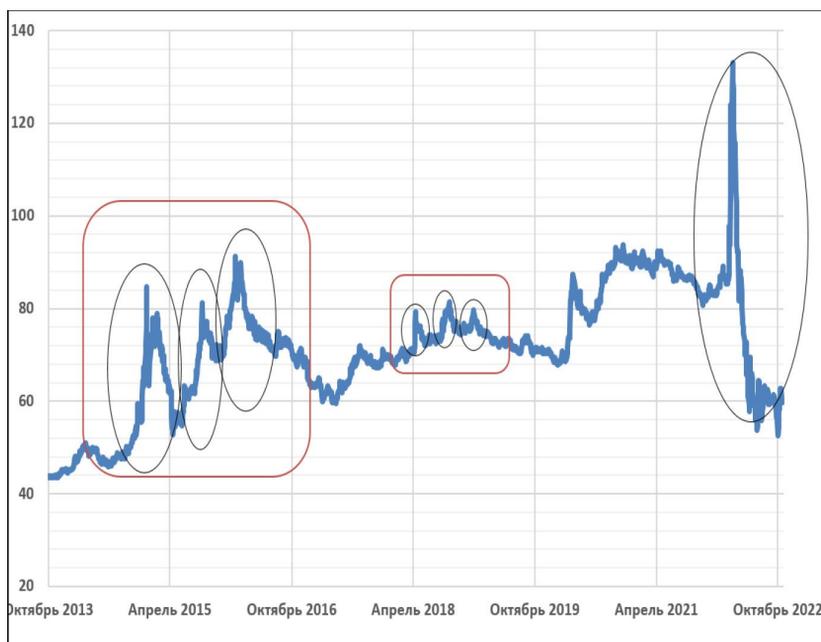
Когда величина  $H$  попадает в промежуток от  $0$  до  $1/2$  – временной ряд называют антиперсистентным, т.е. неустойчивым. Элементы статистической выборки ряда обладают повышенной волатильностью, но эти изменения незначимы [3, 5, 6, 10, 12, 17, 19].

Проверить состоятельность расчетов показателя Херста можно, согласно Петерсу [15, 16], перемешав исходные данные. В случае наличия эффекта долговременной памяти порядок данных важен, поэтому снижение значения показателя Херста будет доказывать персистентность. Если при перемешивании изменение показателя Херста незначительно, то исходная выборка признается несостоятельной [14].

Временной ряд, как было сказано выше, представляет собой последовательность числовых значений исследуемой величины, зарегистрированных через равные отрезки времени. Наиболее типичными представителями финансовых временных рядов являются колебания обменных курсов валют. Именно на примере динамики курса EUR/РУБ за период 23.08.2002-25.10.2022 гг. авторы статьи исследуют фрактальные свойства финансовых временных рядов. Исходная выборка содержит 5000 наблюдений.

Фрагмент исходного временного ряда графически представлен на рисунке 1. Невооруженным взглядом видны непериодические циклы

и его нелинейная структура. На разных таймфреймах наблюдаются одинаковые фигуры разного масштаба, что дает возможность предположить факт наличия самоподобной (фрактальной) структуры рассматриваемой кривой. Предполагаемые границы фрактала обозначены на рисунке рамкой. Самоподобная структура состоит из трех нелинейных элементов, в настоящее время «очерчен» первый ее элемент. Каждая из этих фигур имеет в своей структуре участки аномальных флуктуаций показателя. Вероятно, они отражают реакцию рынка на различные финансовые и политические кризисы. При изменении масштаба графика такие же структуры можно наблюдать на меньшем или большем количестве наблюдений.



**Рис. 1.** Динамика курса EUR/РУБ с выделенными элементами самоподобия  
*\*построено авторами на основе данных [12]*

Согласно методике, применив логарифмические преобразования к исходному ряду, получим статистическую выборку для построения регрессии. При формировании длин расчетных интервалов учитыва-

ются собственные делители числа равного суммарному количеству элементов в выборке. В рассматриваемой выборке 5000 элементов, значит в логарифмическом регрессионном уравнении минимум десять периодов длиной 10, 25, 50, 100, 200, 250, 500, 1000, 1250, 2500 элементов. Результаты R/S-анализа после проведения соответствующих вычислений отображены в таблице 1.

Таблица 1.

## Численные результаты R/S-анализа

Длина интервала (n)	R/S-анализ	log n	log (R/S)
10	1,3	2,32	0,38
25	2,8	3,24	1,04
50	4	3,94	1,40
100	7,7	4,64	2,06
200	15,1	5,33	2,73
250	28,6	5,56	3,38
500	64,2	6,26	4,19
1000	130,4	6,95	4,90
1250	231,7	7,18	5,48
2500	388,9	7,88	6,00

*\*Источник [авторские расчеты]*

Графическое отображение линейной регрессии в логарифмических шкалах представлено на рисунке 2. В качестве зависимой переменной выступает логарифм показателя R/S, а факторным признаком является логарифм количества элементов в каждом интервале.

По результатам расчетов, значение величины Херста  $H$  составляет 0,6445, фрактальная размерность кривой  $D=1,3555$ . Показатель  $H > 1/2$ , что теоретически позволяет сделать предположение о том, что исследуемый временной ряд обладает персистентностью. Однако, значение  $H$  довольно близко к  $1/2$ , что говорит о наличии зашумленности ряда, слабой устойчивости в настоящий момент и необходимости регулярного исследования экономического показателя при обновлении данных. Прогнозирование в такой ситуации на долгий срок нецелесообразно. Максимальный горизонт предсказаний не должен превышать 1-2 временных отрезков.

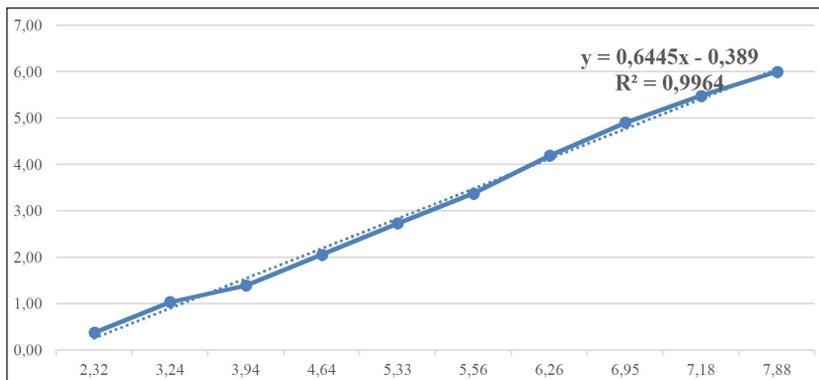


Рис. 2. R/S-траектория в логарифмических шкалах

*\*Источник [авторские расчеты]*

Для проверки состоятельности(значимости) гипотезы о фрактальной природе исследуемого ряда авторы перемешали числовые значения показателей случайным образом и повторили расчеты. При этом величина показателя Херста значительно снизилась и стала равной 0,103. Полученные расчеты позволяют предположить, что статистическая выборка состоятельна и динамика исходного временного ряда не является случайным блужданием. Авторы считают, что временной ряд динамики курса EUR/РУБ представляет собой персистентный фрактальный ряд, обладающий долговременной памятью, и, как следствие, имеющий в своей структуре устойчивый тренд и непериодические циклы.

Таким образом, расчеты доказывают, что в каждом текущем наблюдении отражена память обо всех предшествующих ему событиях. Это долговременная память и, несмотря на то, что вектор направленности зависим от недавних событий больше, чем от удаленных – остаточное влияние предшествующих событий будет всегда ощущимо в дальнейшем. Масштабирование системы во времени позволит получить более точные результаты моделирования длинного потока взаимосвязанных событий на основе статистики Херста [5].

Графический анализ рассматриваемого индикатора на рисунке 1 свидетельствует о том, что курс европейской валюты описывает

самоподобную структуру, которая уже наблюдалась в предшествующих периодах. В настоящий момент довольно длительно вектор движения снижается, наблюдается замедление скорости процесса и «зазубривание». В свою очередь, результат R/S-анализа на рисунке 2 доказывает, что временной ряд находится в так называемом «персистентном» интервале. Сила персистентности слабо выражена, велика вероятность «разворота» и повторения траектории фрактального поведения кривой, наблюдаемых в предшествующих периодах.

Исследование таких сложных структур классическими методами малоэффективно. Выявление новых свойств экономических рядов вызывает необходимость проведения их анализа различными узко специализированными методами для повышения достоверности экономических прогнозов на перспективу. В настоящее время существует множество программных средств анализа и моделирования данных, в которых предлагаются как встроенные способы и алгоритмы анализа, так и инструменты создания собственных программных модулей. Такая интеграция позволяет значительно автоматизировать расчеты для специалистов, не имеющих узкопрофильного математического образования [9,10]. Одними из таких приложений являются Matrigex и R. Используя встроенные модули анализа этих приложений, авторы провели компьютерное моделирование динамики рассматриваемого ряда методом построения авторегрессионной фрактально-интегрируемой модели скользящего среднего – ARFIMA (p, d, q), которая является развитием интегрированной авторегрессионной модели скользящего среднего ARIMA(p, d, q) Г.Е.П. Бокса и Г.М. Дженкинса. Параметры p (порядок авторегрессии) и q (порядок интегрирования) в обоих моделях совпадают, а d (порядок интегрирования) различается: в модели ARFIMA параметр d является дробным числом [1, 13] и зависит от величины показателя Хёрста. Согласно расчетам, порядок интегрирования во фрактальной модели будет равен  $H-0,5 = 1,3555-0,5 = 0,8555$ . Параметры p, q модели ARIMA идентифицированы автоматически в программной среде R и равны соответственно 0 и 1. Статистические характеристики первоначально подобранной модели представлены в таблице 1.

Таблица 2.

## Статистические данные модели ARIMA (0,1,1)

Показатель	Значение
Коэффициент детерминации $R^2$	86,14%
Критерий AIC	1359,73
Критерий BIC	1363,25
Ошибка	0,29

Доля вариации зависимой переменной, представленная как коэффициент детерминации  $R^2$ , составляет 86,14%. Это достаточно высокий показатель, свидетельствующий о том, что модель хорошо описывает исходный ряд. Адекватность модели также подтверждается графиками на рисунках 3 и 4.

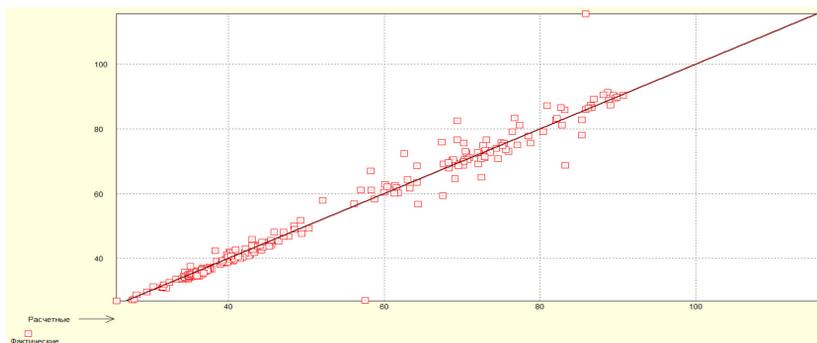


Рис. 3. Графическое рассеяния фактических и подобранных значений временного ряда

По графику рассеяния фактических и подобранных значений (рисунок 3) видно, что автоматически подобранная модель ARIMA(0,1,1) достаточно хорошо аппроксимирует фактические данные – практически все поле корреляции расположено близко к прямой линии.

Рисунок 4 свидетельствует о нормальном распределении остатков, что также подтверждает адекватность модели.

Используя полученные данные параметров  $p, d, q$  можно построить модель ARFIMA(0,0,8555,1) в приложении Matrxer. Меры ошибок подобранной модели представлены в таблице 3.

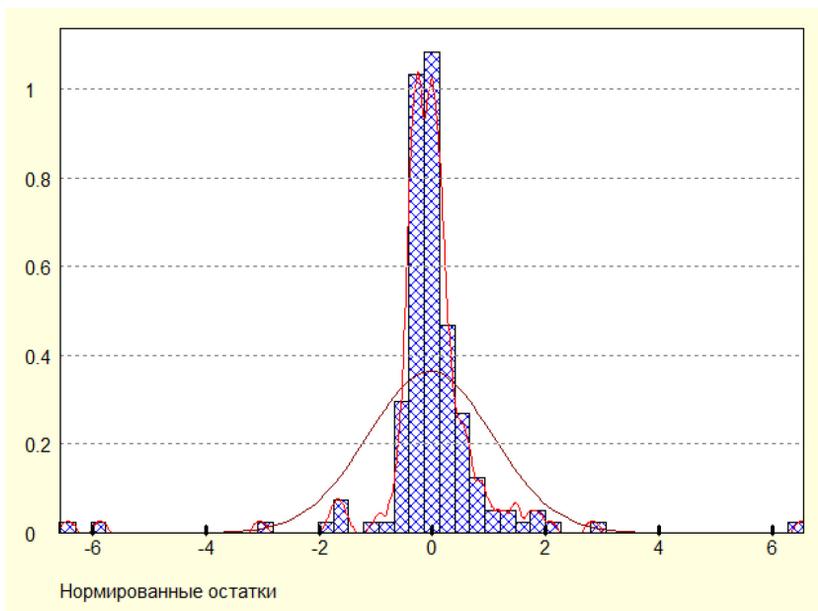


Рис. 4. График остатков

Таблица.

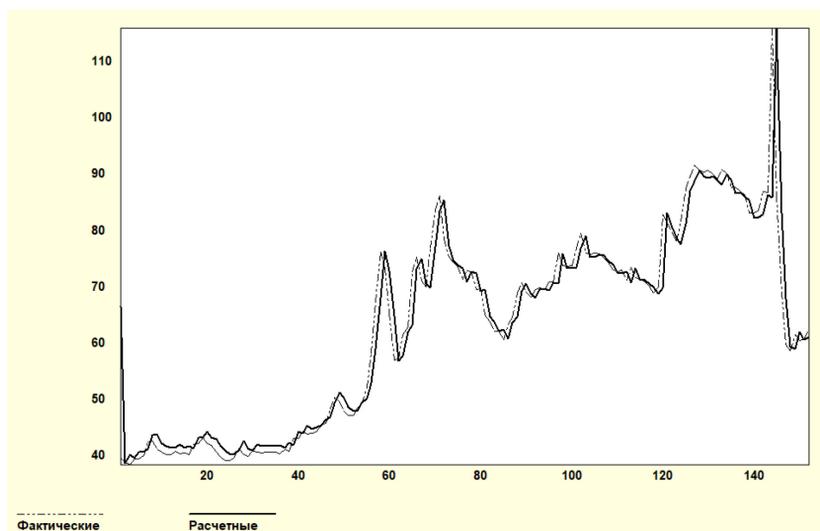
Меры ошибок модели ARFIMA(0,0.8555,1)

Показатель	ME	RMSE	MAE	MAPE	MPE	ACF1
Величина, %	0,1401417	3,64928	1,58949	2,59437	0,222061	0,062934

Коэффициент аппроксимации по сравнению с предыдущей моделью увеличился и стал равным 91,11%, а меры ошибок снизились. Фрактальная модель по сравнению с авторегрессионной лучше аппроксимирует кривую рассматриваемого индикатора (рисунок 5).

Результаты моделирования оказывают непосредственное влияние на дальнейшую работу с временным рядом, главной целью которой является создание прогнозной модели исследуемого экономического процесса. От ее качества будет зависеть точность предсказания. Исследование, проведенное в статье, не является окончательным. Ежедневно появляются новые данные о динамике рынка, что вызы-

вает необходимость повторения процедуры анализа для повышения качества и достоверности прогноза.



**Рис. 5.** Исходный и смоделированный ряд

Если поведение ряда станет неустойчивым, усилятся так называемые «зазубривания» – вероятность того, что кривая в скором сменит направление увеличится. Ситуация меняется стремительно, полученные данные очень быстро устаревают. Именно поэтому повышается роль компьютерного моделирования как метода автоматизации процесса. Современному бизнес-аналитику не нужно проводить время за долгими математическими расчетами. Пользователь должен лишь правильно корректировать входящую и интерпретировать выходящую информацию.

### *Список литературы*

1. Бокс, Дж., Дженкинс, Г. Анализ временных рядов, прогноз и управление/ Пер. с англ. под ред. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1974. кн. 1. 406 с.
2. Галаган К.Ю., Масловская А.Г. Применение аналитических инструментов теории фракталов и мультифракталов для анализа валютных

- рынков // Математическое и компьютерное моделирование. Сборник материалов V Международной научной конференции, посвященной памяти Р.Л. Долганова. 2017. С. 25-28.
3. Зиненко А.В. R/S-анализ на фондовом рынке // Междисциплинарный научно-практический журнал «Бизнес-информатика». 2012. № 3(21). С. 24–30.
  4. Кривоносова Е.К. Первадчук В.П. Применение фрактального анализа к исследованию динамики макроэкономических показателей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная математика и механика. 2013. № 11. С. 48-55.
  5. Масловская А.Г. Осокина Т.Р. Барабаш Т.К. Применение фрактальных методов для анализа динамических данных // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. 2010. № 51. С. 13.
  6. Мельникова Ю.В. Предпрогнозный анализ временных рядов методами непараметрической статистики Херста // Аграрный научный журнал. 2014. № 10. С. 73-76.
  7. Мельникова Ю.В. Совершенствование стратегического планирования производства и сбыта подсолнечника на основе прогнозирования рыночной конъюнктуры / автореферат дис. ... кандидата экономических наук / Саратов. гос. аграр. ун-т им. Н.И. Вавилова. Саратов, 2017.
  8. Паловина А.С. Фрактальный анализ финансового рынка на основе коэффициента Херста // Вектор Экономики. 2019. № 4(34). С. 30.
  9. Петерс Э. Фрактальный анализ финансовых рынков: применение теории Хаоса в инвестициях и экономике. М.: Интернет-трейдинг, 2004. 304 с.
  10. Романов В.П., Бачинин Ю.Г., Московской И.Н., Бадрина М.В. Прогнозирование кризисных ситуаций на финансовых рынках методом мультифрактального анализа // Вестник Российской экономической академии им. Г.В. Плеханова. 2009. № 1 (25). С. 35-40.
  11. Симонов П.М., Гарафутдинов Р.В. Моделирование и прогнозирование динамики курсов финансовых инструментов с применением эконометрических моделей и фрактального анализа // Вестник Пермского университета. Серия: Экономика. 2019. Т.14. № 2. С. 268-288.

12. Официальный сайт Центрального Банка Российской Федерации. Электронный ресурс. URL: <https://cbr.ru/>
13. Chen, C. Fractal feature analysis in medical imaging / C. Chen, J Deponte, M. Fox // IEEE Trans. Med. Imaging. 1989. № 8. P. 133–142.
14. Hurst H. E. Long-term Storage of Reservoirs // Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1951. № 116. P. 770-799.
15. Hyndman R. J. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. / R. J. Hyndman, Y. Khandakar // Journal of Statistical Software. 2008. №26(3). P. 1-22.
16. Mandelbrot B. The Misbehavior of Markets: A Fractal View of Financial Turbulence. Basic Books, 2006. 352 p.
17. Mandelbrot B. B. Fractals and Scaling in Finance: Discontinuity, Concentration, Risk (Selecta, Volume E) Springer-Verlag, New York. 1997. 558 p.
18. Peters E. E. Chaos and order in the capital markets. New York: Wiley NewYork, 1991. 288 p.
19. Peters E. E. Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics. Wiley, 1994. 336 p.
20. Schroeder M. Fractals, Chaos, Power-laws. New York: W. H. Freeman, 1991. 429 p.

### *References*

1. Box, J., Jenkins, G. *Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie* [Analysis of time series, forecast and management]. M.: Mir, 1974, book 1, 406 p.
2. Galagan K. Yu., Maslovskaya A. G. *Matematicheskoe i komp'yuternoe modelirovanie. Sbornik materialov V Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy pamyati R.L. Dolganova* [Mathematical and computer modeling. Collection of materials of the V International scientific conference dedicated to the memory of R.L. Dolganov]. 2017, pp. 25-28.
3. Zinenko A. V. *Biznes-informatika*, 2012, no. 3(21), pp. 24–30.
4. Krivonosova E. K. Pervadchuk V. P. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya matematika i mekhanika*, 2013, no. 11, pp. 48-55.
5. Maslovskaya A. G. Osokina T. R. Barabash T. K. *Vestnik Amurskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i ekonomicheskie nauki*, 2010, no. 51, p. 13.

6. Mel'nikova Yu.V. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal*, 2014, no. 10, pp. 73-76.
7. Mel'nikova Yu.V. *Sovershenstvovanie strategicheskogo planirovaniya proizvodstva i sbyta podsolnechnika na osnove prognozirovaniya rynochnoy kon'yunktury* [Improving the strategic planning of production and marketing of sunflower seeds based on forecasting market conditions]. Saratov, 2017.
8. Palyuvina A.S. *Vektor Ekonomiki*, 2019, no. 4(34), p. 30.
9. Peters E. *Fraktal'nyy analiz finansovykh rynkov: primeneniye teorii Khaosa v investitsiyakh i ekonomike* [Fractal analysis of financial markets: the application of Chaos theory in investment and economics]. M.: Internet trading, 2004, 304 p.
10. Romanov V.P., Bachinin Yu.G., Moskovoy I.N., Badrina M.V. *Vestnik Rossiyskoy ekonomicheskoy akademii im. G.V. Plekhanova*, 2009, no. 1 (25), pp. 35-40.
11. Simonov P.M., Garafutdinov R.V. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Ekonomika*, 2019, vol. 14, no. 2, pp. 268-288.
12. Official website of the Central Bank of the Russian Federation. <https://cbr.ru/>
13. Chen, C. Fractal feature analysis in medical imaging / C. Chen, J Deponte, M. Fox. *IEEE Trans. Med. Imaging*, 1989, no. 8, pp. 133-142.
14. Hurst H. E. Long-term Storage of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, no. 116, pp. 770-799.
15. Hyndman R. J. Automatic time series forecasting: The forecast package for R. / R. J. Hyndman, Y. Khandakar. *Journal of Statistical Software*, 2008, no. 26(3), pp. 1-22.
16. Mandelbrot B. *The Misbehavior of Markets: A Fractal View of Financial Turbulence*. Basic Books, 2006, 352 p.
17. Mandelbrot B. B. *Fractals and Scaling in Finance: Discontinuity, Concentration, Risk (Selecta, Volume E)* Springer-Verlag, New York, 1997, 558 p.
18. Peters E. E. *Chaos and order in the capital markets*. New York: Wiley NewYork, 1991, 288 p.
19. Peters E. E. *Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics*. Wiley, 1994, 336 p.
20. Schroeder M. *Fractals, Chaos, Power-laws*. New York: W. H. Freeman, 1991, 429 p.

## ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

**Мельникова Юлия Владимировна**, доцент кафедры «Математическое и компьютерное моделирование», кандидат экономических наук  
*ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университета имени Н.Г.Чернышевского»*  
*ул. Астраханская, 83, г. Саратов, 410012, Российская Федерация*  
*umlnkv@yandex.ru*

**Лажаннинкас Юлия Владимировна**, доцент кафедры «Цифровое управление процессами в АПК», кандидат педагогических наук  
*ФГБОУ ВО Вавиловский университет*  
*пр-кт им. Петра Столыпина, 4, стр. 3, г. Саратов, 410012, Российская Федерация*  
*lazhauninkas@yandex.ru*

## DATA ABOUT THE AUTHORS

**Julia V. Melnikova**, Associate Professor «**Mathematical and computer modeling**», Candidate of Economic Sciences  
*Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky*  
*83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russian Federation*  
*umlnkv@yandex.ru*  
*SPIN-code: 7182-3875*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2957-3588>*

**Julia V. Lazhauninkas**, Associate Professor «**Digital process management in the agro-industrial complex**», Candidate of Pedagogical Sciences  
*Vavilov University*  
*4/3, Pyotr Stolypin Ave., Saratov, 410012, Russian Federation*  
*lazhauninkas@yandex.ru*  
*SPIN-code: 8735-6760*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8018-7818>*

Поступила 24.11.2022

После рецензирования 05.12.2022

Принята 20.12.2022

Received 24.11.2022

Revised 05.12.2022

Accepted 20.12.2022