

ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

<https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2023.20-1.5>

УДК 330.42

JEL C69, F690 D000 E000



Теория хаоса: расширение границ экономических исследований¹

Юлия Г. ЛАВРИКОВА¹⁾, Ольга Н. БУЧИНСКАЯ²⁾✉, Юлия Г. МЫСЛЯКОВА³⁾

^{1, 2, 3)} Институт экономики УрО РАН, г. Екатеринбург, Российская Федерация

¹⁾ <https://orcid.org/0000-0002-6419-2561>

²⁾ <https://orcid.org/0000-0002-5421-2522>

✉ buchinskaia.on@uiec.ru

³⁾ <https://orcid.org/0000-0001-7635-3601>

Для цитирования: Лаврикова, Ю. Г., Бучинская, О. Н., Мыслякова, Ю. Г. (2023). Теория хаоса: расширение границ экономических исследований. *AlterEconomics*, 20(1), 79–109.

<https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2023.20-1.5>

Аннотация. Применение теории хаоса в экономике связано с нарастающим уровнем неопределенности, а также внешними шоками, с которыми сталкиваются экономические системы. Целью данной статьи служит обзор и систематизация подходов к использованию теории хаоса в экономических исследованиях. Для достижения поставленной цели были сформулированы задачи, касающиеся раскрытия содержания понятия хаоса и его востребованности; выявления наиболее распространенных сфер исследования, в которых возможно применение теории хаоса. Методологию исследования составили методы системно-функционального и системно-исторического анализа содержания научных публикаций, посвященных применению теории хаоса в области ценовых колебаний на отдельных рынках, поведения фирм в условиях несовершенной конкуренции, анализа неопределенности потребительского поведения, а также циклического развития экономики и неравновесности, связанной с балансом безработицы и инфляции, обострения международных отношений. В результате работы произведено разделение понятий синергетики и теории хаоса как двух смежных наук, имеющих различный фокус приложения. Выявлены закономерности применения инструментов теории хаоса в экономических исследованиях. Установлено, что на первом этапе происходит поиск элементов хаоса, фракталов и нелинейности в рядах экономических данных, на втором этапе исследователи пытаются объяснить происходящие события с помощью инструментария теории хаоса, на третьем этапе теория хаоса используется для моделирования и впоследствии прогнозирования краткосрочных и в перспективе долгосрочных трендов. Раскрыто, что теория хаоса расширяет математический аппарат экономических исследований, позволяя использовать инструментарий из области физики и других естественных наук, что усиливает междисциплинарный синтез в экономике.

Ключевые слова: теория хаоса, управляемый хаос, методология исследований, математические методы, экономическая динамика, динамика цен, потребительское поведение, поведение фирмы, безработица, инфляция

Благодарность: Статья выполнена в рамках государственного задания 0327-2021-0006 для Института экономики УрО РАН на 2023 г.

¹ © Лаврикова Ю. Г., Бучинская О. Н., Мыслякова Ю. Г. Текст. 2023.

Chaos Theory: Expanding the Boundaries of Economic Research

Yuliya G. LAVRIKOVA¹⁾, Olga N. BUCHINSKAIA²⁾✉, Yuliya G. MYSLYAKOVA³⁾

^{1, 2, 3)} Institute of Economics of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

¹⁾ <https://orcid.org/0000-0002-6419-2561>

²⁾ <https://orcid.org/0000-0002-5421-2522>

✉ buchinskaia.on@uiec.ru

³⁾ <https://orcid.org/0000-0001-7635-3601>

For citation: Lavrikova, Yu. G., Buchinskaia, O. N. & Myslyakova, Yu. G. (2023). Chaos Theory: Expanding the Boundaries of Economic Research. *AlterEconomics*, 20(1), 79–109.

<https://doi.org/10.31063/AlterEconomics/2023.20-1.5>

Abstract. The application of chaos theory in economics is associated with an increasing level of uncertainty and external shocks faced by economic systems. This article reviews and systematizes the approaches to the use of chaos theory in economic research. To this end, we discuss the concept of chaos and its relevance; and identify those areas of research for which the application of chaos theory holds most promise. The research methodology comprises methods of system-functional and system-historical analysis. These methods are used to analyze the content of publications devoted to the application of chaos theory to study price fluctuations in individual markets, the behaviour of firms in the conditions of imperfect competition, the analysis of uncertainty of consumer behaviour, as well as cyclical economic development and disequilibrium associated with the balance of unemployment and inflation and geopolitical tensions. The study draws the distinction between the concepts of synergetics and chaos theory. It is shown that although these two research areas are related, they have a different focus of application. The study also identifies some common patterns in the use of chaos theory tools for economic research: at the first stage, elements of chaos, fractals and nonlinearity in the series of economic data are identified; at the second stage, researchers try to explain certain events by using the tools of chaos theory; and at the third stage, chaos theory is used to model and subsequently predict short-term and long-term trends. Chaos theory expands the mathematical apparatus of economic research, allowing researchers to access tools from the field of physics and other natural sciences, which enhances interdisciplinary synthesis.

Keywords: chaos theory, controlled chaos, research methodology, mathematical methods, economic dynamics, price dynamics, consumer behaviour, firm behaviour, unemployment, inflation

Acknowledgments: The article has been prepared in accordance with the state assignment project 0327-2021-0006 for the Institute of Economics of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences for 2023.

1. Введение

В настоящее время для описания и понимания все более сложных реальных систем оказывается недостаточно таких абстракций, как концепция устойчивого экономического равновесия, совершенная конкуренция, рациональные ожидания, модель «человека экономического», на которые ориентировалась ранняя экономическая наука и на которые во многом опирается современный мейнстрим. Подобные абстракции не отражают сложившихся экономических реалий, поскольку экономическая система представляет собой все более сложный комплекс взаимосвязанных и взаимодействующих акторов, имеющих собственные интересы. При этом на нее постоянно воздействует ряд экзогенных факторов, связанных с климатическими, ресурсными, техногенными, политическими, эпидемиологическими и другими событиями, которые приводят систему в неравновесное состояние и усложняют прогнозирование ее развития. Соответственно имеет место научный запрос на инструментарий, способный создавать и анализировать теоретические модели, приближенные к реальным процессам. Одним

из таких методов выступает инструментарий теории хаоса, который изначально сформировался в области пересечения физики и математики, но впоследствии распространился на различные сферы наук, включая экономику.

Целью данного исследования является обзор и систематизация подходов к использованию теории хаоса в экономических исследованиях. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1) раскрыть содержание понятия хаоса и его востребованности в экономической науке;

2) выявить наиболее распространенные сферы исследования, в которых используется инструментарий теории хаоса.

Решение поставленных задач позволит установить, возможна ли модификация инструментария теории хаоса в соответствии со спецификой исследуемых экономических феноменов в условиях неопределенности.

2. Теория хаоса: возникновение и путь в экономику

В процессе эволюции теории хаоса можно проследить, как менялось само определение понятия хаоса. В начальный период развития теории хаоса он понимался как нерегулярное движение, описываемое детерминистскими уравнениями (Haken, 1978). Однако в настоящее время используется более расширенное определение: «теория хаоса математически показывает, как небольшое изменение может привести к резким структурным изменениям» (Zhang, 2021). То есть изначально в области хаоса и неопределенности превалировала математическая составляющая хаоса как процесса. Современное определение, данное уже специалистом в области исследования процессов хаоса в экономике, расширяет сферу применения теории хаоса, которая может использоваться при исследовании возмущений в экономической системе и оценке их потенциальных последствий. Это изменение обусловлено логикой развития теории хаоса, представленной ниже.

Теория хаоса берет свое начало в математической науке, и отправной ее точкой можно назвать теорию КАМ (Колмогорова — Арнольда — Мозера), сформулированную в середине XX века (Колмогоров, 1954; Möser, 1962; Арнольд, 1963). В ней показано, что эволюция переменных «действие» представляет собой более или менее случайное блуждание по резонансам вокруг инвариантных торов (Арнольд и др., 1985). В то же время ряд ученых (Арнольд, 2006; Верхозин, 2012; Мухин, 2014) относят возникновение теории хаоса к работам А. Пуанкаре (Poincaré, 1892; Poincaré, 1893; Poincaré, 1899).

Далее крупные исследователи теории хаоса И. Пригожин и И. Стенгерс (Prigogine & Stengers, 1984) определяют разницу между динамическими и термодинамическими системами, к которым относятся хаотические процессы: в то время как первые системы управляемы через варьирование первоначальных условий и в известной степени обратимы, вторые управляемы не до конца и могут порождать произвольные изменения. В результате свойством термодинамических систем является необратимость происходящих изменений. Система будет стремиться к аттрактору, однако точка нового равновесия может возникнуть в координатах, отличных от первоначального состояния. Подобное свойство термодинамической системы находит свое отражение в реальных экономических процессах.

Во многом хаос и термодинамические процессы связаны с производством энтропии¹. В работе (Prigogine & Stengers, 1997) показано взаимоотношение между порядком и хаосом в термодинамических системах: с одной стороны, протекание необратимых процессов внутри системы порождает «производство энтропии», но с другой, такая система стремится к состоянию равновесия, сопровождающегося снижением энтропии и достижению ею нулевого уровня, когда система придет в состояние равновесия, таким образом стрела времени служит источником порядка. И эта связь появляется в социальных и, прежде всего, экономических системах даже более четко, нежели в естественных природных системах: с одной стороны экономические системы стремятся к равновесию, но с другой стороны равновесие в экономике является фактически недостижимым идеалом, рассматриваемым в качестве статичной и крайне упрощенной картины экономического мировоззрения. В реальности системы под воздействием постоянно меняющихся факторов демонстрируют возрастание энтропии, что приводит их в новое неравновесное состояние до тех пор, пока система не выйдет на траекторию, приближающуюся к состоянию нового динамического равновесия.

Параллельно исследованиям И. Пригожина, учение о динамических неравновесных системах сложилось в междисциплинарное направление исследований, получившее название синергетики, которое берет свое начало с работы Г. Хакена (Haken, 1977). Синергетика, подход к изучению сложных систем, получила широкое распространение в России. В частности академик В. С. Степин (2013) при анализе саморазвивающихся систем отмечает, что их развитие подразумевает переход от одного вида саморегуляции к другому, а смена вида саморегуляции происходит в рамках фазового перехода, который может быть охарактеризован в терминах динамического хаоса. Б.Л. Кузнецов (2004) выводит определение экономической синергетики как научного направления, исследующего изменения в экономических системах с использованием идей, принципов, положений и моделей синергетики. Большой вклад в развитие теории синергетики привнесли работы Р.Н. Евстигнеева и Л.П. Евстигнеевой. Они отмечают, что синергетическое общество строится на совершенно иных принципах, подразумевающих взаимодействие, а не управление (Евстигнеева, Евстигнеев, 2010а), используют синергетическую парадигму для анализа макроэкономических процессов, вводят понятие экономического кванта, который задает условия максимизации социальной энергетики развития общества и экономики (Евстигнеева, Евстигнеев, 2012). Активно используется парадигма синергетики российскими учеными для анализа развития экономических институтов, в том числе с использованием принципа Кюри (Кирдина-Чэндлер, 2017). И.Л. Кирилук (Кирилук, 2020) использует синергетический подход для исследования иерархических систем. Теория синергетики имеет не только теоретические, но и практические приложения. Так А.А. Акаев и А.И. Рудской (Акаев, Рудской, 2015) приводят модель синергетического эффекта от применения NBIC-технологий в сравнении с базисными технологиями 5-го технологиче-

¹ По определению И. Пригожина «Entropy is an essential part of thermodynamics, the science that deals specifically with irreversible, time-oriented processes» (пер. на рус.: «энтропия — существенная часть термодинамики, науки, которая занимается изучением необратимых ориентированных во времени процессов» (Prigogine & Stengers, 1997).

ского уклада. М.А. Любарская и др. (Любарская и др., 2021) исследуют с позиции синергетического подхода энергетическую трансформацию в сторону «зеленой» экономики и ее последствия.

Несмотря на схожесть подходов к изучению систем, теория хаоса и синергетика не являются идентичными. Различие заключается не только в широте использования математического аппарата, который более превалирует у сторонников теории хаоса, но и в фокусе исследования представителей этих наук. М.А. Дерябина (Дерябина, 2018) определяет место хаоса как сферу действия преимущественно в системах микроуровня, в то время как синергетика изучает процессы самоорганизации на мезо- и макроуровне. Также теория хаоса, как правило, используется как инструмент в экономических исследованиях прикладной направленности, в то время как синергетика выступает больше как парадигма и концентрируется на изучении общих закономерностей поведения неравновесных систем. Поскольку синергетическая наука обладает огромным потенциалом и имеет собственную огромную базу исследований, мы в данной работе отойдем от анализа достижений в области синергетики и ограничимся исследованиями, непосредственно раскрывающими особенности приложения теории хаоса в экономике, которые начинаются с работ Б. Мандельбро.

Б. Мандельбро является не только автором фрактальной геометрии как иллюстрации процессов упорядоченности в хаотических изменениях, но и пионером их анализа в экономических процессах. В серии своих работ (Mandelbrot, 1960; Mandelbrot, 1961; Mandelbrot, 1962; Mandelbrot, 1963; 2002) ученый отмечает распространенность гиперболического распределения в экономических процессах. Практической альтернативой данному распределению служат не другие типы распределения, а хаос. Динамика цен, по мнению Мандельбро, будучи на первый взгляд хаотичной, подчиняется скейлинговому принципу, поэтому может прогнозироваться. Введенные им понятия эффекта Ноя (*Noah effect*) — резкого колебания, вызванного внешним событием, и эффекта Иосифа (*Joseph effect*) — длительных периодов необычно высоких или низких показателей конъюнктуры цен, нарушающих «привычную» структуру делового цикла, показывают сложную природу изменений экономической динамики (Mandelbrot, 1971).

По мнению А. Батлера, хаосу присуща нелинейная динамика, при этом нельзя сказать, что все нелинейные функции являются хаотичными (Butler, 1990). Экономическая функция является хаотичной при следующих критериях:

- функция никогда не достигает одной и той же точки дважды за любой определенный интервал времени;
- временной путь чувствителен к изменениям начального условия так, что небольшое изменение значения начального условия значительно изменит временной путь функции.

С развитием степени изученности хаотических процессов началось и применение инструментария по изучению хаоса в экономике. У. Баумоль и Дж. Бенхабиб (Baumol & Benhabib, 1989) указывают на следующие преимущества использования теории хаоса в экономике:

- она позволяет понять, что внешне случайное поведение может быть вовсе не случайным, и демонстрирует трудности, которые могут возникнуть при экономическом прогнозировании;

— обеспечивает основу экономического моделирования поведения рациональных агентов: от простейших моделей до сложных моделей обучающегося поведения;

— дает дополнительную информацию об экономических источниках колебаний в ряде экономических моделей.

В то же время, хотя развитие компьютерных технологий и моделирования шагнуло далеко вперед и позволяет моделировать реальные экономические процессы с достаточно большой точностью, как показывают Р. Дэй и О. Павлов (Day & Pavlov, 2004), не стоит абсолютизировать компьютерное моделирование хаоса для нахождения реальных «точек» применения экономического регулирования. Подобное моделирование дает только частичные объяснения повсеместной неравномерности колебаний экономических данных, точные же данные остаются невычислимыми. Тем не менее, П. Чен (Chen, 2008) считает, что изучение нелинейной динамики позволяет исследовать более реалистичные механизмы неравновесных систем, учитывая многие факторы влияния — от человеческих до природных.

М. Фаггини и А. Парзиале (Faggini & Parziale, 2012), говоря о кризисе мейнстрима экономической теории, основанной на понятиях стабильности и равновесия, утверждают, что применение хаоса и теории нелинейных систем даст более «трезвый» и адекватный взгляд на комплексные экономические процессы, отходя от крайне упрощенных абстракций типа единичного репрезентативного агента, действующего в условиях четко заданной траектории. С. Ачикалин и С. Эрчетин (Açikalın & Erçetin, 2022) раскрывают потенциал применения теории хаоса в виду чувствительности моделирования к начальным условиям, точкам бифуркации, нелинейности и самоорганизации для анализа глобальных внешних шоков.

Таким образом, мировой опыт исследований представляет теорию хаоса как инструмент, обладающий большим потенциалом расширения границ современной экономической науки.

3. Методология исследования

Для достижения поставленной в данной работе научной цели и решения связанных с ней задач, нами была предложена процедура исследования, на первом этапе которой осуществлялся поиск и выполнялся анализ научной литературы, посвященной применению теории хаоса в экономике. На втором этапе были определены наиболее часто встречающиеся сферы, в которых используется теория хаоса и сделаны выводы о росте ее прикладной значимости.

Период исследований охватил временной промежуток с 1980 г. по 2022 г. Выборка научного материала была выполнена на базе следующих запросов: «*chaos and economics*», «*the chaos and economics*», «*chaos and microeconomics*», «*chaos and macroeconomics*», «*chaos and international economics*» и др. Кроме того, принципами отбора статей на русском и английском языке, представленных в международных научных базах (МНБ): Scopus и Google Academy, для контент-анализа и систематизации научных идей являлся открытый доступ к содержанию материалов, а также наличие в них экономически ориентированных выводов. Как видно из таблицы 1, количество статей по теории хаоса в экономике неуклонно растет.

Мы можем отметить два значительных скачка статей по теории хаоса в экономике в 1991–2000 и 2001–2010 гг. Обусловлено это двумя причинами — развитием компьютерных технологий, облегчающих моделирование, но главное — экономи-

Таблица 1

Динамика выхода статей по теории хаоса в экономике

Table 1

Dynamics of Publications on Chaos Theory in Economics

МНБ	Периоды, гг.					
	1970–1980	1981–1990	1991–2000	2001–2010	2011–2020	2021–н.в.
Scopus	1	8	64	167	178	31
Google Academy	41	546	9660	16200	17400	5260

ческими кризисами 1998 г. и 2008 г., которые вызвали интерес к анализу внезапных шоков в экономике и их последствий.

В таблице 2 представлен сравнительный вклад в развитие теории хаоса и расширение ее применения в экономических исследованиях 30 стран. Авторами наибольшего количества статей в экономике являются специалисты из США (161 статья), Китая (47 статей), Великобритании (39 статей) и Италии (31 статья). Российская Федерация находится на 17 месте (8 статей).

Результатами авторской научной выборки стали 12 монографий и статьи, представленные в 55 научных журналах, из которых 11 % издано в России, остальные 89 % журналов – за рубежом. Наибольший вклад по доле статей в общем списке используемых статей внесли следующие научные периодические издания: «Journal of Economic Behavior & Organization» – 18,2 %; «Chaos, Solitons & Fractals» – 16,4 %;

Таблица 2

Структура статей с применением теории хаоса в экономических исследованиях по странам

Table 2

Breakdown of Publications Using Chaos Theory for Economic Research, by Country

Место в рейтинге	Страна	%*	Место в рейтинге	Страна	%*
1	США	22,31	16	Турция	1,73
2	Китай	9,04	17	Россия	1,54
3	Великобритания	7,50	18	Сингапур	1,54
4	Италия	5,96	19	Германия	1,35
5	Канада	4,04	20	Иран	1,35
6	Австралия	3,65	21	Ирландия	1,15
7	Франция	3,08	22	Польша	1,15
8	Греция	2,50	23	Бразилия	0,96
9	Япония	2,50	24	Египет	0,96
10	Испания	2,50	25	Швейцария	0,96
11	Гонконг	2,12	26	Чехия	0,77
12	Индия	2,12	27	Саудовская Аравия	0,77
13	Португалия	1,92	28	Словакия	0,77
14	Тайвань	1,92	29	Швеция	0,77
15	Нидерланды	1,73	30	Украина	0,77

* от общего количества статей в МНБ на 15.01.2023 (Scopus)

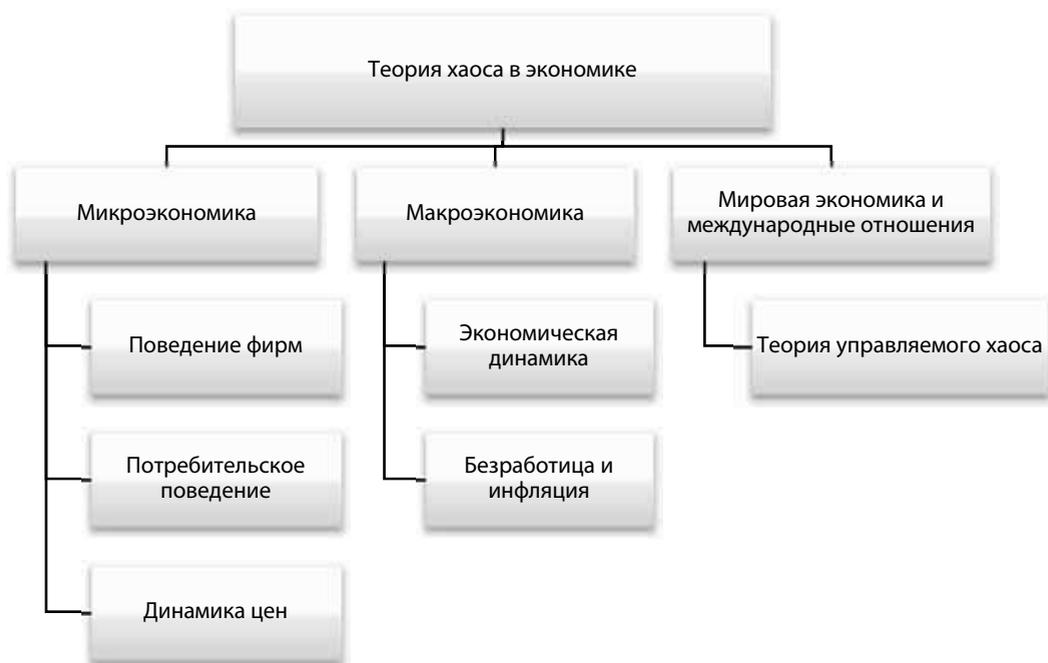


Рис. Сферы использования теории хаоса в экономических исследованиях
Fig. Field of Application of Chaos Theory for Economic Research

«Dynamics & Econometrics» — 5,45 %; «Applied Mathematics and Computation» — 3,6 %. Остальные журналы распределились равномерно со значением 1,8 %.

Выполненный контент-анализ представленной выборки научных изданий позволяет отметить, что теория хаоса в экономике имеет много приложений. Их систематизация позволила выявить следующие сферы экономических исследований, в которых наиболее часто используются инструменты теории хаоса (см. рис.), а также некоторые закономерности их применения.

4. Теория хаоса в микроэкономических исследованиях

4.1. Поведение фирм

Автор серии работ по применению хаоса, Т. Пуу (Puu, 1991), рассматривает дуополистическое ценообразование в рамках модели Курно. Пуу показывает динамику упорядоченного хаоса как в условиях действия фирм по очереди, так и в условиях одновременной реакции участников рынка. Х. Агиза и А. Элсадани (Agiza & Elsadany, 2004) анализируют как меняется динамика рынка, когда игроки применяют разные ожидания и убеждения, вариативность которых может привести к сложности межфирменного взаимодействия.

А. Мацумото и Й. Нонака (Matsumoto & Nonaka, 2006) при анализе модели Курно, в которой товары дополняют друг друга, а функции реакции не линейны, обнаруживают, что сочетание положительного внешнего эффекта продаж через рыночный спрос и отрицательного внешнего эффекта производства через функцию затрат, могут быть источниками хаотических колебаний объема производства. При этом фирмы, производящие дополнительные товары и сталкивающиеся с ха-

отическими колебаниями корректировки выпуска, при сильной асимметрии эффекта продаж могут иметь более высокую среднюю прибыль в долгосрочном периоде. Л. Чен и Г. Чен (Chen & Chen, 2007) исследуют возможность управления хаотичным рынком и предлагают в рамках модели Курно-Пуу метод управления с поддержкой обратной связи, изначально предложенный К. Пирагасом (Pyragas, 1992) для изучения физических систем. В. Ву и др. (Wu et al., 2010), исследуя модель Курно, приходят к выводу, что модель дуополии может сохранять память о слабой хаотической динамике, подразумевающей возвращение к устойчивому состоянию до перехода к сильному хаосу, когда достижение устойчивого состояния уже невозможно. На основе этого авторы утверждают, что экономическая система не станет полностью неупорядоченной и всегда может вернуться в устойчивое состояние или в слабое хаотическое состояние. Дж. Занг и др. (Zhang et al., 2009) в рамках модели Бертрана с ограниченной рациональностью отмечают важность скорости адаптации актора с ограниченной рациональностью: при увеличении этого значения равновесие Нэша становится неустойчивым и формируются сложные аттракторы, которые могут быть периодическими циклами или хаотическими множествами. К похожим результатам приходят Е. Ахмед и др. (Ahmed et al., 2016), что равновесие Нэша теряет стабильность из-за бифуркации с удвоением периода, и система в конечном итоге становится хаотичной, что делает невозможной дальнейшую адаптацию. В. Жоу и Т. Чу (Zhou & Chu, 2019) подтверждают данные результаты и добавляют, что модель дуополии может иметь 3 или даже 4 аттрактора.

Я. Ли и Л. Ванг (Li & Wang, 2019), исследуя развитие технологических инноваций и их влияние на рынок дуополии, показывают, что выпуск фирм-дуополистов будет стремиться к равновесию, если коэффициенты реакции дуополиста в виде изменения выпуска в ответ на изменения прибыли будут меньше некоторого значения. В противном случае предположительное вариационное равновесие станет нестабильным и склонным к появлению хаоса и непредсказуемости. Здесь инновации имеют оптимальное технологическое содержание в качестве верхнего предела, который может принести максимальную прибыль, но, когда технологическое содержание становится больше, в системе появляется хаос. В. Жоу и К. Ванг (Zhou & Wang, 2019), исследуя дуополию в рамках конкуренции в сфере научных разработок, показывают, что соперничество между двумя высокотехнологичными предприятиями наблюдается только на первом этапе их взаимодействия. На втором этапе обе фирмы выбирают сотрудничество и стремятся к максимизации совместной прибыли, однако граничные точки равновесия всегда неустойчивы, а точка равновесия Нэша стабильна только тогда, когда параметры удовлетворяют некоторым условиям.

Достаточно неоднозначные результаты дает применение теории хаоса для выявления влияния налогообложения на стабильность цен в условиях дуополии. Ф. Ванг и др. (Wang et al., 2020) на основе модели Бертрана и теории управления хаосом, изучают влияние государственного налога на динамику цен. Авторы показывают, что государственный налог способствует стабильности рыночных цен. Повышение ставки государственного налога может увеличить стабильную область ценового равновесия и уменьшить бифуркацию и хаос системы ценовой игры. С другой стороны, С. Аскар (Askar, 2022) при анализе воздействия налогообложения на дуополию Курно отмечает, что увеличение налогообложения приво-

дит к усилению нестабильности системы и возникает непредсказуемое поведение акторов для динамики игры.

Несколько меньшее, но все же заметное внимание исследователи хаоса уделяют модели монополии. Т. Пуу (Puу, 1995) вводит понятие монополиста с ограниченной рациональностью, который не знает полной информации о рынке и может даже вести себя хаотично. Он отмечает, что кривая спроса на продукцию монополиста может менять свой наклон, становясь на какое-то время высокоэластичной, затем, возможно, становясь относительно неэластичной, а затем снова эластичной, что может иметь место на рынке, состоящем из нескольких подгрупп потребителей с разным уровнем доходов. Кривая предельного дохода, соответствующая такой кривой спроса, также может менять свой наклон с нисходящего на восходящий и обратно, в результате чего будет несколько точек монопольного равновесия. Чистый доход монополии в каждой точке будет разным, но, маловероятно, что какой-либо монополист будет обладать достаточными знаниями о ситуации, чтобы позволить ему выбрать из них наибольший. Если монополист не нашел такого равновесия, он может разработать процесс поиска, основанный на местных оценках предельных доходов, что определяет нелинейную динамику его поведения в рамках теории хаоса. А. Наимзада и Г. Рикчиути (Naimzada & Ricchiuti, 2008) исследуют равновесие монополиста с ограниченной рациональностью, когда он, не зная всей функции спроса, при определении оптимального выпуска, ориентируется на предыдущий опыт. Авторы приходят к выводу, что изменения в производстве от одного периода к следующему пропорциональны экзогенно заданной скорости адаптации к изменениям и предельной прибыли. Эти изменения определяют только скорость, с которой реализуются все производства. Впоследствии С. Аскар (Askar, 2013), изучая динамику поведения монополиста с позиции исследования точек бифуркации теории хаоса, показывает, как именно скорость адаптации к изменениям совместно с предельными издержками определяют интенсивность, с которой меняется производство.

А. Матсумото и Ф. Сидаровски (Matsumoto & Szidarovszky, 2022) анализируют поведение двух типов рациональных монополистов: тех, кто осведомлен о ценах, но не могут вычислить оптимальный уровень выпуска и тех, кто знает только значения цен и объема производства, но только за два предыдущих периода времени. Авторы, используя для анализа монополистов одно- и двухгодичные временные лаги, определяют направления изменения стабильности поведения фирм и находят кривые переключения стабильности, вычисляя индекс стабильности для каждой точки кривых.

4.2. Потребительское поведение

Относительно анализа потребительского поведения А. Смит (Smith, 2002) выделяет 3 основных направления исследований: концептуальное применение, связанное с поиском хаотических закономерностей, математическое моделирование и дескриптивный анализ, связанный с интерпретацией временных рядов, вычислением экспоненты Ляпунова, применением фазовых диаграмм и спектрального анализа.

Дж. Бенхабиб и Р. Дэй (Benhabib & Day, 1981) показывают, как рациональный выбор в стационарной среде может привести к неустойчивому поведению, когда предпочтения зависят от опыта. К направлению анализа потребительского пове-

дения можно отнести и работу Д. Стермана (Sterman, 1989), в которой на условиях моделирования двухсекторной экономической системы анализируется возникновение хаоса в процессе принятия индивидами экономических решений.

В. Гаэртнер и Й. Юнгеилгес (Gaertner & Jungeilges, 1988) при анализе потребительского поведения индивида, на которого влияет не только собственный опыт, но и потребительское поведение другого человека, с которым этот индивид связан, приходят к выводу, что потребители могут отказаться от стабильного плана потребления в пользу регулярного переключения между двумя альтернативными наборами потребления в результате более сильного внешнего влияния, причем данное переключение имеет хаотическую природу.

Д. Ричардс (Richards, 1990) при попытке исследовать нелинейность стратегического поведения человека обнаруживает признаки хаотических процессов в повторении игр по «дилемме заключенного». Ф. Фаттас-Виллафранка и др. (Fatás-Villafranca et al., 2009) с помощью нелинейного моделирования разработали модель дискреционных решений ограниченного потребителя, в которой выявили два режима поведения: статичный с долгосрочной концентрацией на одной модели поведения и динамический, который характеризуется разнообразием применяемых моделей потребления. Н. МакКаллен и др. (McCullen et al., 2011) посредством моделирования показали, что негативный обмен информацией, такой как недоверие или дезинформация между индивидами приводит к потере возможности принятия разумных решений. П. Ние и др. (Nie et al., 2019) используют математическую модель для интерпретации поведения потребителей в условиях рекламы и «сарафанного радио». В результате доказывается периодичность воздействия рекламы на поведение потребителей, а кратковременное снижение воздействия не оказывает влияния на общественное признание бренда.

Е. Екатеринбург и др. (Ekaterinchuk et al., 2018) по результатам моделирования приходят к выводу, что различные типы долгосрочного поведения спроса могут наблюдаться для пары рациональных, возможно, взаимодействующих потребителей, склонных к краткосрочному планированию. Тип поведения, который будет наблюдаться, может зависеть от первоначального распределения потребительских товаров. И. Тиан и др. (Tian et al., 2020) анализируют влияние скорости корректировки количества заказов, предпочтений клиентов и усилий по продажам на динамику предложения. Исследование позволяет выявить и проанализировать параметры настройки системы цепочки поставок для снижения потерь и максимизации прибыли. Й. Юнгеилгес и др. (Jungeilges et al., 2022), рассматривая поведенческие изменения в контексте потребления, отмечают наличие в системе мультистабильности и предлагают использование в качестве искусственного аттрактора так называемого «призрака» — расплывчатого проявления непривлекательного хаотического множества (*chaotic repeller*).

4.3. Ценовая динамика

Основоположником исследования процессов хаоса в рамках паутинообразной модели спроса и предложения можно считать К. Чиареллу. В работе (Chiarella, 1990) он отходит от линейной функции спроса в пользу нелинейных (оставляя функцию предложения совершенно эластичной с уровнем цен, стремящимся к нулю), вводит временные лаги трансакций и ожиданий и выделяет в получившейся модели участки асимптотичной стабильности, увеличения периода ко-

лебаний и перехода к хаосу. Рассматривая теории рациональных и адаптивных ожиданий изменения цен в рамках паутинообразной модели, Чиарелла показывает, что модели, основанные на адаптивных ожиданиях, могут приводить к хаотичному, непредсказуемому поведению, в то время как рациональные агенты теоретически могут оценить модель и предсказать последующие временные траектории. Однако эти траектории будут включать интервалы, в которых рациональные агенты делают неправильные прогнозы, что противоречит природе рациональных агентов. Дж. Галлас и Е. Нуссе (Gallas & Nusse, 1996), исследуя паутинообразные модели спроса и предложения, нашли сочетание как хаотических, фрактальных, так и периодических элементов. Дж. Соннеманс и др. (Sonnemans et al., 2004) в попытке понять механизмы возникновения хаоса протестировали 102 стратегии взаимодействия спроса и предложения в рамках паутинообразной модели и изучили динамику равновесия в краткосрочном, среднесрочном и долгосрочном периодах. Они пришли к выводу, что однородные рынки сходятся к далекому от устойчивого состояния стабильному циклу, тогда как гетерогенные рынки сходятся, скорее всего, к близкому устойчивому состоянию хаоса. Т. Онозаки (Onozaki, 2018), анализируя одно-, двух- и многопро- странственные паутинообразные модели, показывает развитие модели от простого к сложному, отход от стабильного состояния системы и различные типы бифуркации, которые проявляются в ходе движения от порядка к хаосу, и возникновение в системе внутреннего кризиса — расширение диапазона хаотической орбиты при небольших вариациях параметров.

Ф. Гуо и др. (Guo et al., 2019) рассматривают динамику паутинообразной модели относительно наивной или рациональной стратегии поведения акторов. При этом, если контрагент наивен, то имеет место 2-периодный ценовой цикл. Актор, пытающийся предсказать ценовую динамику, получает систематические ошибки прогнозирования при однородных ожиданиях, но при этом он может генерировать разумные прогнозы в рамках неоднородных ожиданий. Если же контрагент рационален, то 2-периодный ценовой цикл исчезает, и актер, пытающийся предсказать ценовую динамику, подвержен систематической ошибке прогнозирования. В результате авторы утверждают, что в модели, когда стоимость рационального предиктора превышает его выгоду, для агентов рационально не применять сложную рациональную стратегию. Другими словами, агенты демонстрируют рациональное невежество, что согласуется с теорией Чиареллы. Р. Диеси и др. (Dieci et al., 2022), анализируя паутинообразную модель в условиях рынка, на котором фирмы могут использовать одну из двух технологий производства (медленной и негибкой, но дешевой или быстрой, гибкой, но дорогой), приходят к выводу, что равновесие рынка может стать нестабильным, если достаточно много фирм выбирают технологию медленного производства, после чего в модели наблюдается нерегулярная колебательная динамика цены.

Де Костер и др. (De Coster et al., 1992), применяя технику корреляционного измерения, показывают наличие нелинейной динамики в движении близких фьючерсных цен на сахар, серебро, медь и кофе. Т. Люкс (Lux, 1998) предложил социально-экономическую модель взаимодействия спекулянтов на финансовом рынке, в которой показывает, что теория хаоса может объяснить внезапное образование рыночных пузырей и ценовых нисходящих потоков. К. Чиарелла и др. (Chiarella et al., 2001) в исследовании динамики цен на активы, основанной на взаимодей-

ствии двух типов трейдеров: приверженцев фундаментальной оценки фундаментальной стоимости актива и тех, кто основывается на техническом анализе ценовой динамики; показывают, что отход от локально стабильного состояния происходит при высоких силе спроса «фундаменталистов» и скорости корректировки ожиданий «техников». Возникают хаотические переходные процессы перед сходимостью к устойчивому равновесию или в область притяжения аттракторов.

С. Мошири и Ф. Фороутан (Moshiri & Foroutan, 2006) в попытке прогнозирования цен на рынке нефти приходят к выводу, что ежедневные цены на сырую нефть не линейно детерминированы, однако для прогнозирования хаотического ряда без знания спецификации его структуры необходимо использование искусственных нейронных сетей (ANN). К. Фан и др. (Fan et al., 2016) проводят аналогичное исследование уже относительно цен на уголь и используют при этом модель нейронных сетей с многослойным восприятием (MLP) для предсказания нелинейной динамики цен. При анализе такого чисто спекулятивного актива как криптовалюта, С. Лаамири и С. Бекирос (Lahmiri & Bekiros, 2019) использовали для прогнозирования нейронные сети глубокого обучения с долговременной / кратковременной памятью (LSTM), а также регрессионные нейронные сети (GRNN) и пришли к результатам, что сети глубокого обучения, хотя и имеют большие затраты по времени, значительно эффективнее в предсказании хаотических колебаний.

Наиболее современные исследования посвящены прогнозированию динамики акционерного капитала и формированию инвестиционного портфеля. М. Ханиас и др. (Hanas et al., 2020) в попытке применения теории хаоса для анализа и прогнозирования динамики цена акции Amazon утверждают, что прогнозирование на один и два дня вперед достигается с помощью реконструкции фазового пространства, соответствующего странного аттрактора.

Дж. Чен и др. (Chen et al., 2021) используют для прогнозирования нелинейную динамическую систему на основе сети RVFL-GMDH (функциональная связь случайного вектора в сочетании с групповым методом обработки данных) и теорию хаоса, благодаря чему достигается эффективность метода в прогнозировании поворотных моментов временных рядов акций. По мнению авторов, данная процедура может быть использована и для других целей, таких как прогнозирование нагрузки на электросети, планирование спроса на материалы и прогноз международных цен на нефть. М. Буфало и др. (Bufalo et al., 2022), а также А. Спелта и др. (Spelta et al., 2022) предлагают использование теории хаоса для разработки инвестиционной стратегии, которая способна правильно делать прогнозы на длительных временных горизонтах.

В итоге мы можем отметить, что теория хаоса на микроэкономическом уровне позволяет проследить и до некоторой степени предсказать особенности поведения экономических агентов не только в условиях анализа действий монополиста или дуополиста, но и значительного количества разрозненных акторов, преследующих собственные интересы. Несмотря на то, что мнения отдельных исследователей относительно сходимости систем в сторону порядка или хаоса могут диаметрально расходиться, ожидается прогресс развития исследований с более точными результатами. Интересным является наблюдение, что рациональное поведение экономических агентов менее поддается прогнозам, нежели «наивное» поведение.

5. Теория хаоса в макроэкономических исследованиях

5.1. Экономическая динамика

Достаточно много работ посвящено выявлению хаоса в теориях бизнес-циклов и экономического роста. Так Р. Дэй (1983) демонстрировал явление хаоса в мальтузианской модели роста. Одной из первых работ по анализу хаоса и нелинейности в макроэкономических процессах можно назвать работу М. Болдрина и Л. Монтруччо (Boldrin & Montrucchio, 1985), по результатам которой был сделан вывод о том, что с увеличением рациональности выбора человеком, хаотические траектории становятся все более вероятными. Если же люди придерживаются «наивных» решений, оптимальные траектории экономического роста становятся более простыми и предсказуемыми. Д. Келси (Kelsey, 1988) показывает наличие упорядоченного хаоса в разрезе экономических циклов, анализируя модель пересекающихся поколений и теории рациональных ожиданий Лукаса. Р. Дэй и Т. Лин (Day & Lin, 1991) в свою очередь утверждают, что циклические тенденции могут быть подавлены, когда ценам, производственным мощностям и различным побочным эффектам предложения будет позволено играть явную роль, но для этого могут потребоваться довольно широкие колебания в других переменных.

К. Нишимура и Д. Соргер (Nishimura & Sorger, 1996) приводят целый ряд моделей экономических циклов, действующих на основе хаоса, включая модели функций полезности в уменьшенной форме, проявление хаоса в циклических колебаниях двухсекторных моделей роста, модели с гетерогенными агентами, модели рекурсивной полезности, модели непрерывного времени.

П. Чен (Chen, 1996), развивая модель цветового хаоса (*color chaos*), показывает, что цветовой хаос непрерывного времени, генерируемый нелинейными дифференциальными уравнениями, способен описывать бизнес-циклы, поскольку колебания и повторяющиеся паттерны переменных могут характеризоваться нелинейностью с нерегулярной амплитудой и узкой полосой в цветовом спектре.

М. Весет (Veseth, 1998), анализируя феномен хаоса в сфере глобальных финансов, говорит о том, что хаос может привести к отсоединению валютных курсов от реальной экономики, делая бессмысленными представления о рациональном принятии глобальных решений, а турбулентность хаотических финансовых моделей побуждает государственное вмешательство в экономику с целью ее стабилизации. Это приводит к кризисам и спекулятивным атакам, в результате чего возникает порочный круг глобального кризиса и хаоса.

Если К. Ишияма и Й. Сайки (Ishiyama & Saiki, 2005) отмечают наличие хаотических элементов в теории экономических циклов Гудвина, то А. Якимович (Jakimowicz, 2010), осуществляя цифровое моделирование, показывает наличие хаоса в данной модели и утверждает, что любое внешнее воздействие на систему приведет к существенным изменениям ее функционирования.

Д. Мендес и В. Мендес (Mendes & Mendes, 2005) показывают, что хаотические колебания динамической модели пересекающихся поколений могут управляться с помощью небольших возмущений в ее параметрах и переводить экономическую систему в установившееся устойчивое состояние. Управление системой может выполняться с большими или меньшими возмущениями, но, не пересекая определенных границ их значений. Если изменения будут излишними, то изменится природа системы. Если они будут слишком малы, управление станет неэффективным.

Таким образом, теория хаоса не противоречит, а даже в некотором роде оправдывает вмешательство в экономические системы с целью проведения экономической политики. Качественно новый подход использовали С. Халлигатте и др. (Hallegatte et al., 2008), используя хаос как инструмент изучения циклов, а не исследуя циклы на наличие хаоса. Приведенная ими модель неравновесного делового цикла построена на неоклассической модели Солоу. В результате ее тестирования авторы отмечают, что амплитуда бизнес-цикла увеличивается, когда гибкость инвестиций возрастает. Если инвестиции подвержены финансовым ограничениям, они не могут продолжать реагировать на сигнал о прибыли, и эта ситуация порождает сложную динамику и хаотичное поведение. Хаотичная динамика также возникает и когда имеют место и другие ограничения, включая лимитированность природных ресурсов или рабочей силы. Х. Йошида и Т. Асада (Yoshida & Asada, 2007) используют похожий способ, применяя хаос как инструмент анализа эффективности кейнсианской политики. Они показывают, что в условиях длительных лагов очень активное вмешательство государства имеет тенденцию усиливать возмущения и вызывать сложные колебания экономической системы. Однако правительство может уменьшить амплитуду циклических колебаний, приняв правильное значение параметров экономической политики. Монография В.-Б. Занга (Zhang, 2006) как работа, суммирующая многие достижения в области исследования хаоса в макроэкономике, иллюстрирует использование инструментария хаоса в исследовании колебательных траекторий в теории экономического роста с пересекающимися поколениями, теории роста Солоу, теории экономического роста в сочетании с отвлекающим воздействием на окружающую среду, в сочетании с ростом населения, а также динамики монетарной экономики. Т. Онозаки и др. (Onozaki et al., 2015) в результате анализа деловых циклов показывают, что если производители делают упор на максимизацию прибыли и медленно корректируют свои ожидания в сторону среднего уровня, объявленного правительством, то повышается вероятность того, что экономика будет демонстрировать хаотичные траектории.

М. Симионеску и М. Шмеховски (Simionescu & Śmiechowski, 2016) предлагают использовать теорию хаоса для прогнозирования экономического роста. В исследовании Н. Мостеану (Mosteanu, 2019) используются фракталы для оценки экономического роста государства и представления возможного решения проблемы оценки риска возможной экономической рецессии. Л. Ксу и А. Серлетис (Xu & Serletis, 2019) показывают роль коммуникационных трений в усилении хаотичной составляющей бизнес-циклов: небольшие колебания в шоках могут вызвать большие изменения в совокупном объеме производства. Р. Ступ (Stoop, 2021) рассматривает инструментарий ограниченного контроля хаотичной динамики в бизнес-циклах. К. Занг и Й. Му (Zhang & Mu, 2022) разработали для прогнозирования экономического роста систему выравнивающей нейронной сети с учетом параметров, контролирующей хаотичную динамику.

5.2. Безработица и инфляция

Одним из существенных, но малозаметных достижений применения теории хаоса в макроэкономике, стала работа П. Ферри и др. (Ferri et al., 2001) по исследованию кривой Филлипса. В результате анализа авторы доказывают отсутствие такого явления как NAIRU (не ускоряющий инфляцию уровень безработицы), поскольку взаимозависимость между реальными и монетарными факторами ослабляет те-

оретическую основу самой концепции NAIRU и доказывает существование множества равновесий, что подразумевает более одной точки, на которую теоретически может ориентироваться регулятор. Л. Фанти и П. Манфредди (Fanti & Manfredi, 2007) доказывают, что в противовес неоклассическим утверждениям об обязательном возникновении кривой Филлипса как долгосрочного явления, в хаотическом случае возникает область «ловушки», в которой равновесие Вальраса полностью теряет свою прогностическую способность. М. Билдириси и Ф. Сонустун (Bildirici & Sonustun, 2019) применяют теорию хаоса для оценки влияния нефтяных цен на динамику безработицы и инфляции. В. Сарвесварарао и В. Рави (Sarveswararao & Ravi, 2020) используют теорию хаоса и машинное обучение для создания двухэтапной модели предсказания динамики индекса потребительских цен. У. Барнетт и др. (Barnett et al., 2022) через исследования аттракторов показывают нисходящий уклон на орбитах процентных ставок и инфляции, вызывающий явление, похожее на «ловушку» ликвидности (но не являющееся ею, поскольку эти два явления могут существовать одновременно), что может объяснить проблемы, с которыми сталкивается регулятор, проводящий активную монетарную политику.

Таким образом, теория хаоса и ее инструментарий могут применяться в области макроэкономики, для того, чтобы проанализировать источники хаотических возмущений, которые могут вызывать изменение в продолжительности и амплитуде циклических колебаний, выявить пределы государственного вмешательства в экономику, найти «ловушки», в которые может попасть экономическая система при реализации антикризисной экономической политики.

6. Теория хаоса в исследованиях мировой экономики и международных отношений

Проникновение теории хаоса в анализ мировой экономики и международных отношений демонстрирует работа С.Р. Манна (Mann, 1992), давшая начало теории управляемого хаоса внутри социальных систем в национальном и геополитическом масштабе. Он рассматривает социальную систему как хаотическую, поскольку множество акторов в динамичной системе имеют широко варьирующиеся цели и ценности. При этом даже в отсутствии внешних шоков такая система содержит факторы, которые приведут ее за границу стабильности, к турбулентности и изменению порядка. Анализируя хаотическую систему, С.Р. Манн выделяет два особых свойства социальной хаотической системы: конфликтную энергию и самоорганизующуюся критичность. Конфликтная энергия понимается как сила, которая провоцирует изменение статус-кво и формирует критическое состояние системы. Для перенаправления данной энергии, присущей всем людям, в интересах какого-либо гегемона используются «психологические вирусы», т. е. идеология. Самоорганизующаяся критичность — термин, введенный П. Баком и др. (Bak et al., 1988) для физических систем, рассматривается П. Баком и К. Ченом (Bak & Chen, 1991) для систем социальных как свойство больших интерактивных систем организовать до некоторого критического состояния, в котором незначительное событие запускает цепную реакцию, что может привести к катастрофе. Примерами проявления самоорганизующейся критичности являются такие крупные малопредсказуемые спады в экономике как, например, Великая депрессия. С.Р. Манн рассматривает самоорганизующуюся критичность как естественную способность социальных динамических систем приходить в состояние временной стабильности после катастрофических изменений порядка. Он отрицает ста-

бильность как самоцель систем, считая, что возникновение хаоса приводит к образованию новых систем, более подконтрольных гегемону. К примеру, Азиатский кризис 1998 г. стал точкой самоорганизующейся критичности, которая привела к потере власти индонезийского президента Сухарто и оправданию военного вмешательства Австралии в ситуацию в Восточном Тиморе (Kuruc, 2003).

А. В. Молчанов и Ф. А. Смирнов (Молчанов, Смирнов, 2012) рассматривают в качестве события самоорганизующейся критичности глобальный финансовый кризис 2008 г. и считают его точкой начала движения к глобальной финансовой трансформации на основе развития многополярности и регионализации, отмечая однако, что прежняя мировая система будет бороться за собственное выживание.

А. Кобылко и Х. Хаддад (Kobybko & Haddad, 2016) показывают, что межсистемные переходы обычно протекают, в соответствии с моделью управляемого хаоса, по следующим стадиям:

— системное удержание — повышение эффективности государства и подбор средств защиты от иностранной агрессии (как военно-политической, так и экономической);

— подрывная деятельность — применение против противников различных мер воздействия от организации политических переворотов до санкций относительно экономического противника;

— разрушение — намеренное накаливание ситуации через осуществление «цветных» революций, гибридных и санкционных войн;

— переправление — атакованная система сражается за свое выживание и пытается перенаправить внешнее воздействие в сторону снижающую угрозу системе через проведение реформ. Одновременно атакующие силы усиливают давление на атакуемую систему;

— системное изменение — атакуемая система успешно отражает внешнюю агрессию и возвращается к его первоначальному состоянию с учетом реформ, которые позволяют сохранить и, возможно, даже усилить свою предыдущую модель.

Таким образом, теория управляемого хаоса помогла сформировать набор инструментов, который достаточно широко применяется мировыми лидерами в отношении появляющихся экономических и политических конкурентов на мировой арене. В свою очередь А. С. Славянов (Славянов, 2015) выделяет такие опасные точки возникновения управляемого хаоса как избыточные иностранные инвестиции, спекуляции на рынке ценных бумаг, нестабильные финансовые институты и существенное имущественное расслоение населения, когда наиболее богатые слои общества ориентированы на внешний рынок. Такая ситуация не только увеличивает нестабильность, но и ставит страну в излишнюю зависимость от зарубежных партнеров. Л. Сулейманова (Suleymanova, 2017) анализирует политику управляемого хаоса как выражение геополитических и экономических интересов мировых игроков в странах Магриба. А. Фернандез-Херейра и Ф. Мартинез-Родригез (Fernández-Herrería & Martínez-Rodríguez, 2019) относят состояние хаоса и слома системы не к конкретным государствам, а ко всему мировому сообществу, переживающего существенный экономический и геополитический слом. И. С. Иванченко и др. (Ivanchenko et al., 2021) показывают экономические и социальные проблемы, с которыми сталкиваются страны-жертвы практического применения теории управляемого хаоса на своей территории и иллюстрируют двойные стандарты, применяемые развитыми странами в управлении экономикой,

которые основаны на постулатах различных экономических школ. Более «традиционное» использование теории хаоса, связанное с математическим моделированием, применяют Х. Барами и др. (Bahrami et al., 2012), развивая теорию взаимодействия современного государства-империалиста со своими колониями. Эта статья вызвала впоследствии серию работ по оптимизации отношений глобального лидера с колониями через различные методы компьютерного моделирования, однако без дальнейшего использования в них теории хаоса.

Несмотря на то, что теория управляемого хаоса отрицается рядом экономистов, считающих ее феноменом российской пропаганды (Kakhovska et al. 2020), реальность показывает, что теория управляемого хаоса имеет место в экономической и геополитической реальности, что признается не только российскими, но и зарубежными специалистами. Ввиду этого органам власти при разработке национальной стратегии развития государства необходимо обращать внимание на проявление элементов управляемого хаоса на территории с целью сохранения ее экономического суверенитета.

7. Заключение

Механизмы изучения нелинейности и неопределенности все больше вызывают интерес у экономистов, в исследованиях которых применение теории хаоса набирает обороты. В процессе обзорного исследования были получены следующие результаты.

1. Произведено разделение понятий синергетики и теории хаоса как двух смежных наук, имеющих различный фокус приложения. Если синергетика фокусируется на макро- и мезоуровне рассматриваемых систем, то теория хаоса оперирует на микроуровне систем. Применение теории хаоса доминирует в экономических исследованиях прикладной направленности, в то время как постулаты синергетики чаще применяются при изучении общих закономерностей поведения неравновесных систем.

2. Выявлены закономерности применения теории хаоса в проанализированных прикладных экономических исследованиях. Так, на первом этапе происходит поиск элементов хаоса, фракталов и нелинейности в рядах экономических данных, на втором этапе исследователи пытаются объяснить происходящие события с помощью инструментария теории хаоса, на третьем этапе теория хаоса используется для моделирования и впоследствии прогнозирования краткосрочных и в перспективе долгосрочных трендов.

3. Показано, что использование теории хаоса способствует расширению математического аппарата экономических исследований, позволяя использовать инструментарий из области физики и других естественных наук, что усиливает междисциплинарный синтез. Этот синтез необходим для расширения границ экономической науки и решения проблем неопределенности, не находящих ответа в современном экономическом мейнстриме.

Таким образом, в условиях турбулентности современных социально-экономических процессов и необходимости исследования поведения неравновесных динамических систем теория хаоса становится все более востребованным инструментом исследования экономических процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Акаев, А. А., Рудской, А. И. (2015). Об одной математической модели для прогнозных расчетов синергетического эффекта NBIC-технологий и оценки его влияния на экономический рост в первой половине XXI века. *Доклады Академии наук*, 461(4), 383–383. <https://doi.org/10.7868/S0869565215100047>

Арнольд, В. И. (1963). Малые знаменатели и проблемы устойчивости движения в классической и небесной механике. *Успехи математических наук*, 18(6), 91–192.

Арнольд, В. И. (2006). Недооцененный Пуанкаре. *Успехи математических наук*, 61(1), 3–24. <https://doi.org/10.4213/rm1714>

Арнольд, В. И., Козлов, В. В., Нейшгадт, А. И. (1985). Математические аспекты классической и небесной механики. *Итоги науки и техники. Сер. «Современные проблемы математики. Фундаментальные направления»*, 3, 5–290.

Верхозин, А. Н. (2012). Анри Пуанкаре (к 100-летию со дня смерти). *Вестник Псковского государственного университета. Сер. Естественные и физико-математические науки*, 1, 197–202.

Дерябина, М. А. (2018). Самоорганизация: теоретические и методологические основания в оптике синергетической парадигмы. *Общественные науки и современность*, 6, 149–161. <https://doi.org/10.31857/S086904990002757-4>

Евстигнеева, Л. П., Евстигнеев, Р. Н. (2010). Экономическая интеграция как синергетический феномен. *Мир перемен*, 4, 99–114.

Евстигнеева, Л. П., Евстигнеев, Р. Н. (2010). *Экономика как синергетическая система*. Москва: ЛЕНАНД, 272.

Евстигнеева, Л. П., Евстигнеев, Р. Н. (2012). Становление экономической синергетики. *Общественные науки и современность*, 1, 122–133.

Кирдина-Чэндлер, С. Г. (2017). Эволюция социально-экономических систем на мезоуровне: пределы многообразия. *Очерки по экономической синергетике*. Москва: Институт экономики Российской академии наук, 47–68.

Кирилюк, И. Л. (2020). Математический аппарат для исследования иерархических систем в экономике. *Эволюция иерархических структур в экономике и экономический рост*, 116–126.

Колмогоров, А. Н. (1954). О сохранении условно-периодических движений при малом изменении функции Гамильтона. *Доклады Академии Наук СССР*, 98(4), 527.

Кузнецов, Б. Л. (2004). Экономическая синергетика как методология экономического развития. *Экономическое возрождение России*, 2, 34–36.

Любарская, М. А., Чекалин, В. С., Ким, О. Л. (2021). Исследование энергоперехода 4.0 с позиции экономической синергетики. *Экономический вектор*, 4(27), 144–148. <https://doi.org/10.36807/2411-7269-2021-4-27-144-148>

Мандельброт, Б. (2002). *Фрактальная геометрия природы*. Москва, Ижевск: Институт компьютерных исследований, 656.

Молчанов, А. В., Смирнов, Ф. А. (2012). Наступление эры финансового хаоса как кризис цивилизации Запада. *Новый университет. Серия «Экономика и право»*, 3(13), 4–13.

Мухин, Р. Р. (2014). Динамический хаос: трудный путь открытия. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*, 22(4), 43–54.

Славянов, А. С. (2015). Проблемы противодействия технологиям управляемого хаоса в развивающихся экономических системах. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*, 22(307), 2–12.

Степин, В. С. (2013). Типы научной рациональности и синергетическая парадигма. *Сложность. Разум. Постнеклассика*, 4, 45–59.

Açikalin, Ş. N., Erçetin, Ş. Ş. (2022). Understanding COVID-19 with Chaos Theory: Dynamics and Implications for Societies. *Beyond Covid-19: Multidisciplinary Approaches and Outcomes on Diverse Fields*, 1–18. https://doi.org/10.1142/9781800611450_0001

- Agiza, H. N., Elsadany, A. A. (2004). Chaotic dynamics in nonlinear duopoly game with heterogeneous players. *Applied Mathematics and Computation*, 149(3), 843–860. [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(03\)00190-5](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(03)00190-5)
- Ahmed, E., Elsadany, A. A., Puu, T. (2015). On Bertrand duopoly game with differentiated goods. *Applied Mathematics and Computation*, 251, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.051>
- Askar, S. S. (2013). On complex dynamics of monopoly market. *Economic Modelling*, 31, 586–589. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2012.12.025>
- Askar, S. S. (2022). On the Dynamics of Cournot Duopoly Game with Governmental Taxes. *Complexity*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5195337>
- Bahrami, H., Abdechiri, M., Meybodi, M. R. (2012). Imperialist competitive algorithm with adaptive colonies movement. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 4(2), 49–57. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2012.02.06>
- Bak, P., Chen, K. (1991). Self-organized criticality. *Scientific American*, 264(1), 46–53.
- Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K. (1988). Self-organized criticality. *Physical review A*, 38(1), 364. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.364>
- Barnett, W. A., Bella, G., Ghosh, T., Mattana, P., Venturi, B. (2022). Shilnikov chaos, low interest rates, and New Keynesian macroeconomics. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 134(C). <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2021.104291>
- Baumol, W. J., Benhabib, J. (1989). Chaos: significance, mechanism, and economic applications. *Journal of economic perspectives*, 3(1), 77–105. <https://doi.org/10.1257/jep.3.1.77>
- Benhabib, J., Day, R. H. (1981). Rational choice and erratic behavior. *The Review of Economic Studies*, 48(3), 459–471. <https://doi.org/10.2307/2297158>
- Bildirici, M. E., Sonustun, F. O. (2019). Chaotic characteristic of inflation-unemployment relation in Turkey. *AIP Conference Proceedings*, 2178(1). <https://doi.org/10.1063/1.5135468>
- Boldrin, M., Montrucchio, L. (1985). The emergence of dynamic complexities in models of optimal growth: The role of impatience. *Rochester Center for Economic Research, Working Paper*, 7, 1–50.
- Bufalo, M., Liseo, B., Orlando, G. (2022). Forecasting portfolio returns with skew-geometric Brownian motions. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 38(4), 620–650. <https://doi.org/10.1002/asmb.2678>
- Butler, A. (1990). A methodological approach to chaos: are economists missing the point? *Economic Research Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 72(2), 36–48. <https://doi.org/10.20955/r.72.36-48>
- Chen, J., Yang, S., Zhang, D., Nanekaran, Y. A. (2021). A turning point prediction method of stock price based on RVFL-GMDH and chaotic time series analysis. *Knowledge and information systems*, 63(10), 2693–2718. <https://doi.org/10.1007/s10115-021-01602-3>
- Chen, L., Chen, G. (2007). Controlling chaos in an economic model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 374(1), 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.07.022>
- Chen, P. (1996). A Random walk or color chaos on the stock market? Time-frequency analysis of S&P indexes. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 1(2), 87–103. <https://doi.org/10.2202/1558-3708.1014>
- Chen, P. (2008). Equilibrium illusion, economic complexity and evolutionary foundation in economic analysis. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 5(1), 81–127. <https://doi.org/10.14441/eier.5.81>
- Chiarella, C. (1990). The Cobweb Model; Its Instability and the Onset of Chaos. *The Elements of a Nonlinear Theory of Economic Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 86–99. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46707-3_6
- Chiarella, C., Dieci, R., Gardini, L. (2002). Speculative behaviour and complex asset price dynamics: a global analysis. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 49(2), 173–197. [https://doi.org/10.1016/S0167-2681\(02\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2681(02)00066-5)
- Day, R. H. (1983). The emergence of chaos from classical economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 98(2), 201–215. <https://doi.org/10.2307/1885621>

- Day, R. H., Lin, T. Y. (1991). A Keynesian business cycle. *Nicholas Kaldor and mainstream economics*. London: Palgrave Macmillan, 281–305. https://doi.org/10.1007/978-1-349-10947-0_16
- Day, R. H., Pavlov, O. V. (2004). Computing economic chaos. *Computational Economics*, 23(4), 289–301. <https://doi.org/10.1023/B:CSEM.0000026787.81469.1f>
- DeCoster, G. P., Labys, W. C., Mitchell, D. W. (1992). Evidence of chaos in commodity futures prices. *The Journal of Futures Markets*, 12(3), 291–305. <https://doi.org/10.1002/fut.3990120305>
- Dieci, R., Mignot, S., Westerhoff, F. (2022). Production delays, technology choice and cyclical cobweb dynamics. *Chaos, Solitons & Fractals*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111796>
- Ekaterinchuk, E., Jungeilges, J., Ryazanova, T., Sushko, I. (2018). Dynamics of a minimal consumer network with bi-directional influence. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 58, 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.04.007>
- Faggini, M., Parziale, A. (2012). The failure of economic theory. Lessons from chaos theory. *Modern Economy*, 3(1). <https://doi.org/10.4236/me.2012.31001>
- Fan, X., Wang, L., Li, S. (2016). Predicting chaotic coal prices using a multi-layer perceptron network model. *Resources Policy*, 50, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.08.009>
- Fanti, L., Manfredi, P. (2007). Neoclassical labour market dynamics, chaos and the real wage Phillips curve. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 62(3), 470–483. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2005.01.007>
- Fatás-Villafranca, F., Saura, D., Vazquez, F. J. (2009). Diversity, persistence and chaos in consumption patterns. *Journal of bioeconomics*, 11(1), 43–63. <https://doi.org/10.1007/s10818-009-9059-8>
- Fernández-Herrera, A., Martínez-Rodríguez, F. M. (2019). The earth charter as a new worldview in a post-neoliberal world: chaos theory and morphic fields as explanatory contexts. *World Futures*, 75(8), 591–608. <https://doi.org/10.1080/02604027.2019.1634417>
- Ferri, P., Greenberg, E., Day, R. H. (2001). The Phillips curve, regime switching, and the NAIRU. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 46(1), 23–37. [https://doi.org/10.1016/s0167-2681\(01\)00185-8](https://doi.org/10.1016/s0167-2681(01)00185-8)
- Gaertner, W., Jungeilges, J. (1988). A non-linear model of interdependent consumer behaviour. *Economics Letters*, 27(2), 145–150. [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(88\)90087-0](https://doi.org/10.1016/0165-1765(88)90087-0)
- Gallas, J. A. C., Nusse, H. E. (1996). Periodicity versus chaos in the dynamics of cobweb models. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 29(3), 447–464. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(95\)00082-8](https://doi.org/10.1016/0167-2681(95)00082-8)
- Guo, F., Liu, C., Shi, Q. (2019). Smart or stupid depends on who is your counterpart: a cobweb model with heterogeneous expectations. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 23(5), 20170082. <https://doi.org/10.1515/snde-2017-0082>
- Haken, H. (1977). Synergetics. *Physics Bulletin*, 28(9), 412–414.
- Haken, H. (1978). *Synergetics: An Introduction Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. New York, the USA: Springer, 376.
- Hallegatte, S., Ghil, M., Dumas, P., Hourcade, J. C. (2008). Business cycles, bifurcations and chaos in a neo-classical model with investment dynamics. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 67(1), 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2007.05.001>
- Hanias, M., Tsakonas, S., Magafas, L., Thalassinos, E. I., Zachilas, L. (2020). Deterministic chaos and forecasting in Amazon's share prices. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, 15(2), 253–273. <https://doi.org/10.24136/eq.2020.012>
- Ishiyama, K., Saiki, Y. (2005). Unstable periodic orbits embedded in a chaotic economic dynamics model. *Applied Economics Letters*, 12(12), 749–753. <https://doi.org/10.1080/13504850500120318>
- Ivanchenko, I. S., Boeva, K. Y., Temirkanova, A. V., Jiang, H. (2021). Controlled Chaos as a Tool of Modern Globalization. *Strategies and Trends in Organizational and Project Management. DITEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 214–218. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94245-8_29
- Jakimowicz, A. (2010). Catastrophes and Chaos in Business Cycle Theory. *Acta Physica Polonica, A*, 117(4), 640–646.

- Jungeilges, J., Pavletsov, M., Perevalova, T. (2022). Noise-induced behavioral change driven by transient chaos. *Chaos, Solitons & Fractals*, 158, 112069. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112069>
- Kakhovska, O., Popova, D., Skyba, E., Tyshchenkova, I. (2020). Demythologization of the “controlled chaos” as a tool for geopolitical war: economic and sociocultural markers. *Economic Annals-XXI*, 184(7–8), 94–106. <https://doi.org/10.21003/ea.V184-09>
- Kelsey, D. (1988). The economics of chaos or the chaos of economics. *Oxford economic papers*, 40(1), 1–31. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.oep.a041839>
- Korybko, A., Haddad, H. (2016). Chaos theory, global systemic change, and Hybrid Wars. *Comparative Politics Russia*, 7(4(25)), 25–35 [https://doi.org/10.18611/2221-3279-2016-7-4\(25\)-25-35](https://doi.org/10.18611/2221-3279-2016-7-4(25)-25-35)
- Kuruc, A. (2003). The relevance of Chaos Theory to operations. *Australian Defence Force Journal*, 162, 4–18.
- Lahmiri, S., Bekiros, S. (2019). Cryptocurrency forecasting with deep learning chaotic neural networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 118, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.11.014>
- Li, Y., Wang, L. (2019). Chaos in a duopoly model of technological innovation with bounded rationality based on constant conjectural variation. *Chaos, Solitons & Fractals*, 120, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.11.038>
- Lux, T. (1998). The socio-economic dynamics of speculative markets: interacting agents, chaos, and the fat tails of return distributions. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 33(2), 143–165. [https://doi.org/10.1016/S0167-2681\(97\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0167-2681(97)00088-7)
- Mandelbrot, B. B. (1971). When can price be arbitrated efficiently? A limit to the validity of the random walk and martingale models. *The Review of Economics and Statistics*, 53(3), 225–236. <https://doi.org/10.2307/1937966>
- Mandelbrot, B. (1963). New methods in statistical economics. *The Journal of political economy*, 71(5), 421–440. <https://doi.org/10.1086/258792>
- Mandelbrot, B. (1962). Paretian distributions and income maximization. *The Quarterly Journal of Economics*, 76(1), 57–85. <https://doi.org/10.2307/1891131>
- Mandelbrot, B. (1961). Stable Paretian random functions and the multiplicative variation of income. *Econometrica*, 29(4), 517–543. <https://doi.org/10.2307/1911802>
- Mandelbrot, B. (1960). The Pareto-Levy law and the distribution of income. *International economic review*, 1(2), 79–106. <https://doi.org/10.2307/2525289>
- Mann, S. R. (1992). Chaos Theory and Strategic Thought. *Parameters*, 22(3), 54–68.
- Matsumoto, A., Nonaka, Y. (2006). Statistical dynamics in a chaotic Cournot model with complementary goods. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 61(4), 769–783. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2004.07.008>
- Matsumoto, A., Szidarovszky, F. (2022). The chaotic monopolist revisited with bounded rationality and delay dynamics. *Chaos, Solitons & Fractals*, 159, 112142. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112142>
- McCullen, N. J., Ivanchenko, M. V., Shalfeev, V. D., Gale, W. F. (2011). A dynamical model of decision-making behavior in a network of consumers with applications to energy choices. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21(09), 2467–2480. <https://doi.org/10.1142/S0218127411030076>
- Mendes, D. A., Mendes, V. (2005). Control of chaotic dynamics in an OLG economic model. *Journal of Physics: Conference Series*, 23, 158–181. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/23/1/019>
- Möser, J. (1962). On invariant curves of area-preserving mappings of an annulus. *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, II*, 1–20.
- Moshiri, S., Foroutan, F. (2006). Forecasting nonlinear crude oil futures prices. *The energy journal*, 27(4), 81–96. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol27-No4-4>
- Moşteanu, N. R. (2019). Intelligent tool to prevent Economic Crisis–Fractals. A possible solution to assess the Management of Financial Risk. *Calitatea*, 20(172), 13–17.
- Naimzada, A. K., Ricchiuti, G. (2008). Complex dynamics in a monopoly with a rule of thumb. *Applied Mathematics and Computation*, 203(2), 921–925. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.04.020>

- Nie, P., Abd-Rabo, M. A., Sun, Y., Ren, J. (2019). A consumption behavior model with advertising and word-of-mouth effect. *Journal of Nonlinear Modeling and Analysis*, 1, 461–489. <http://dx.doi.org/10.12150/jnma.2019.461>
- Nishimura, K., Sorger, G. (1996). Optimal cycles and chaos: A survey. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 1(1), 11–28. <https://doi.org/10.2202/1558-3708.1009>
- Onozaki, T. (2018). One-dimensional nonlinear cobweb model. *Nonlinearity, Bounded Rationality, and Heterogeneity*, 25–77. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54971-0_8
- Onozaki, T., Esashi, K., Saiki, Y., Sato, Y. (2015). Chaotic Itinerancy in Regional Business Cycle Synchronization. 立正大学経済学会ディスカッション・ペーパー [Rissho University Economic Society Discussion Paper], 1, 1–17.
- Poincaré, H. (1892). *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste. Tome I. Solutions périodiques. Non-existence des intégrales uniformes. Solutions asymptotiques.* Paris: Gauthier-Villars et fils, imprimeurs-libraires, 385.
- Poincaré, H. (1893). *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste. Tome II. Méthodes de MM. Newcomb, Gylden, Lindstedt et Bohlén.* Paris: Gauthier-Villars et fils, imprimeurs-libraires, 479.
- Poincaré, H. (1899). *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste. Tome III. Invariants intégraux. Solutions périodiques du deuxième genre. Solutions doublement asymptotiques.* Paris: Gauthier-Villars et fils, imprimeurs-libraires, 414.
- Prigogine, I., Stengers, I. (1997). *The end of certainty: time, chaos, and the new laws of nature.* New York: Free Press, 228.
- Prigogine, I., Stengers, I. (1984). *Order out of Chaos: man's new dialogue with nature.* Toronto; New York, N.Y.: Bantam Books, 349.
- Puu, T. (1991). Chaos in duopoly pricing. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1(6), 573–581. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(91\)90045-B](https://doi.org/10.1016/0960-0779(91)90045-B)
- Puu, T. (1995). The chaotic monopolist. *Chaos, Solitons & Fractals*, 5(1), 35–44. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(94\)00206-6](https://doi.org/10.1016/0960-0779(94)00206-6)
- Pyragas, K. (1992). Continuous control of chaos by self-controlling feedback. *Physics letters A*, 170(6), 421–428. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90745-8](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90745-8)
- Richards, D. (1990). Is strategic decision making chaotic? *Behavioral Science*, 35(3), 219–232. <https://doi.org/10.1002/bs.3830350305>
- Sarveswararao, V., Ravi, V. (2020). Chaos, Machine Learning and Deep Learning based Hybrid to forecast Consumer Price Index Inflation in India. *2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2551–2557. <https://doi.org/10.1109/ssci47803.2020.9308309>
- Simionescu, M., Śmiechowski, M. (2016). Forecasting economic growth using chaos theory. *Czech Journal of Social Sciences, Business and Economics*, 5(3), 37–42.
- Smith, A. (2002). Three scenarios for applying chaos theory in consumer research. *Journal of Marketing Management*, 18(5–6), 517–531. <https://doi.org/10.1362/0267257022683640>
- Sonnemans, J., Hommes, C., Tuinstra, J., van de Velden, H. (2004). The instability of a heterogeneous cobweb economy: a strategy experiment on expectation formation. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 54(4), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2003.02.004>
- Spelta, A., Pecora, N., Pagnottoni, P. (2022). Chaos based portfolio selection: A nonlinear dynamics approach. *Expert Systems with Applications*, 188, 116055. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116055>
- Sterman, J. D. (1989). Deterministic chaos in an experimental economic system. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 12(1), 1–28. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(89\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0167-2681(89)90074-7)
- Stoop, R. (2021). Stable periodic economic cycles from controlling. *Nonlinearities in Economics. Dynamic Modeling and Econometrics in Economics and Finance*, 29, 209–244. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70982-2_15
- Suleymanova, L. (2017). The influence of the “Controlled Chaos” technology on the geopolitical situation in the Greater Middle East. *The Open Journal of Political Science*, 7(2), 189–196. <https://doi.org/10.4236/ojps.2017.72015>

- Tian, Y., Ma, J., Xie, L., Koivumäki, T., Seppänen, V. (2020). Coordination and control of multi-channel supply chain driven by consumers' channel preference and sales effort. *Chaos, Solitons & Fractals*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109576>
- Veseth, M. (1998). *Selling globalization: the myth of the global economy*. Boulder, the USA: Lynne Rienner Publishers, 215.
- Wang, F., Wu, C. H., Tsai, S. B., Jiang, Y. Z. (2020). An Empirical Study of a Mathematical Model for Influence of Government Tax on the Price Behavior and the Stability of Market Price. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8097402>
- Wu, W., Chen, Z., Ip, W. H. (2010). Complex nonlinear dynamics and controlling chaos in a Cournot duopoly economic model. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 11 (5), 4363–4377. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2010.05.022>
- Xu, L., Serletis, A. (2019). Communication frictions, sentiments, and nonlinear business cycles. *International Journal of Economic Theory*, 15 (2), 137–152. <https://doi.org/10.1111/ijet.12163>
- Yoshida, H., Asada, T. (2007). Dynamic analysis of policy lag in a Keynes–Goodwin model: stability, instability, cycles and chaos. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 62 (3), 441–469. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2004.10.014>
- Zhang, J., Da, Q., Wang, Y. (2009). The dynamics of Bertrand model with bounded rationality. *Chaos, Solitons & Fractals*, 39 (5), 2048–2055. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2007.06.056>
- Zhang, Q., Mu, Y. (2022). Economic Forecasting Model Based on Chaos Simulated Annealing Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9005833>
- Zhang, W.-B. (2006). *Discrete dynamical systems, bifurcations and chaos in economics*. Oxford: Elsevier, 460.
- Zhang, W.-B. (2021). Mao Zedong and the Preconditions for the Butterfly Effect. *The Butterfly Effect in China's Economic Growth*. Singapore: Palgrave Macmillan, 1–27. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9889-0_1
- Zhou, W., Chu, T. (2019). Complex Dynamical Behavior of a Bounded Rational Duopoly Game with Consumer Surplus. *Research Advances in Chaos Theory*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87200>
- Zhou, W., Wang, X. X. (2019). On the stability and multistability in a duopoly game with R&D spillover and price competition. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019, 1–21. <https://doi.org/10.1155/2019/2369898>

References

- Açikalin, Ş. N. & Erçetin, Ş. Ş. (2022). Understanding COVID-19 with Chaos Theory: Dynamics and Implications for Societies. *Beyond Covid-19: Multidisciplinary Approaches and Outcomes on Diverse Fields*, 1–18. https://doi.org/10.1142/9781800611450_0001
- Agiza, H. N. & Elsadany, A. A. (2004). Chaotic dynamics in nonlinear duopoly game with heterogeneous players. *Applied Mathematics and Computation*, 149 (3), 843–860. [https://doi.org/10.1016/S0096-3003\(03\)00190-5](https://doi.org/10.1016/S0096-3003(03)00190-5)
- Ahmed, E., Elsadany, A. A. & Puu, T. (2015). On Bertrand duopoly game with differentiated goods. *Applied Mathematics and Computation*, 251, 169–179. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2014.11.051>
- Akaev, A. A. & Rudskoi, A. I. (2015). Ob odnoy matematicheskoy modeli dlya prognoznykh raschetov sinergeticheskogo effekta NBIC-tehnologiy i otsenki ego vliyaniya na ekonomicheskiy rost v pervoy polovine XXI veka [A Mathematical Model for Predictive Computations of the Synergy Effect of NBIC Technologies and the Evaluation of Its Influence on the Economic Growth in the First Half of the 21st Century]. *Doklady Akademii nauk [Reports of the Academy of Sciences]*, 461 (4), 383–383. <https://doi.org/10.7868/S0869565215100047> (In Russ.)
- Arnol'd, V. I. (1963). Malye znamenateli i problemy ustoychivosti dvizheniya v klassicheskoy i nebesnoy mekhanike [Small denominators and problems of stability of motion in classical and celestial mechanics.]. *Uspekhi matematicheskikh nauk [Successes of mathematical sciences]*, 18 (6), 91–192. (In Russ.)

Arnol'd, V. I. (2006). Nedootsenenny Puankare [An underrated Poincare]. *Uspekhi matematicheskikh nauk [Successes of Mathematical Sciences]*, 61 (1), 3–24. <https://doi.org/10.4213/rm1714> (In Russ.)

Arnol'd, V. I., Kozlov, V. V. & Neishtadt, A. I. (1985). Matematicheskie aspekty klassicheskoy i nebesnoy mekhaniki [Mathematical aspects of classical and celestial mechanics]. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya «Sovremennye problemy matematiki. Fundamental'nye napravleniya» [Results of science and technology. The series "Modern problems of mathematics. Fundamental Directions"]*, 3, 5–290. (In Russ.)

Askar, S. S. (2013). On complex dynamics of monopoly market. *Economic Modelling*, 31, 586–589. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2012.12.025>

Askar, S. S. (2022). On the Dynamics of Cournot Duopoly Game with Governmental Taxes. *Complexity*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5195337>

Bahrami, H., Abdechiri, M. & Meybodi, M. R. (2012). Imperialist competitive algorithm with adaptive colonies movement. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 4(2), 49–57. <https://doi.org/10.5815/ijisa.2012.02.06>

Bak, P. & Chen, K. (1991). Self-organized criticality. *Scientific American*, 264(1), 46–53.

Bak, P., Tang, C. & Wiesenfeld, K. (1988). Self-organized criticality. *Physical review A*, 38(1), 364. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.364>

Barnett, W. A., Bella, G., Ghosh, T., Mattana, P. & Venturi, B. (2022). Shilnikovchaos, low interest rates, and New Keynesian macroeconomics. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 134(C). <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2021.104291>

Baumol, W. J. & Benhabib, J. (1989). Chaos: significance, mechanism, and economic applications. *Journal of economic perspectives*, 3(1), 77–105. <https://doi.org/10.1257/jep.3.1.77>

Benhabib, J. & Day, R. H. (1981). Rational choice and erratic behavior. *The Review of Economic Studies*, 48(3), 459–471. <https://doi.org/10.2307/2297158>

Bildirici, M. E. & Sonustun, F. O. (2019). Chaotic characteristic of inflation-unemployment relation in Turkey. *AIP Conference Proceedings*, 2178(1). <https://doi.org/10.1063/1.5135468>

Boldrin, M. & Montrucchio, L. (1985). The emergence of dynamic complexities in models of optimal growth: The role of impatience. *Rochester Center for Economic Research, Working Paper*, 7, 1–50.

Bufalo, M., Liseo, B. & Orlando, G. (2022). Forecasting portfolio returns with skew-geometric Brownian motions. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 38(4), 620–650. <https://doi.org/10.1002/asmb.2678>

Butler, A. (1990). A methodological approach to chaos: Are economists missing the point? *Economic Research Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 72(2), 36–48. <https://doi.org/10.20955/r.72.36-48>.

Chen, J., Yang, S., Zhang, D. & Nanekaran, Y. A. (2021). A turning point prediction method of stock price based on RVFL-GMDH and chaotic time series analysis. *Knowledge and information systems*, 63(10), 2693–2718. <https://doi.org/10.1007/s10115-021-01602-3>

Chen, L. & Chen, G. (2007). Controlling chaos in an economic model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 374(1), 349–358. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2006.07.022>

Chen, P. (1996). A Random walk or color chaos on the stock market? Time-frequency analysis of S&P indexes. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 1(2), 87–103. <https://doi.org/10.2202/1558-3708.1014>

Chen, P. (2008). Equilibrium illusion, economic complexity and evolutionary foundation in economic analysis. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 5(1), 81–127. <https://doi.org/10.14441/eier.5.81>

Chiarella, C. (1990). The Cobweb Model; Its Instability and the Onset of Chaos. *The Elements of a Nonlinear Theory of Economic Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 86–99. https://doi.org/10.1007/978-3-642-46707-3_6

Chiarella, C., Dieci, R. & Gardini, L. (2002). Speculative behaviour and complex asset price dynamics: a global analysis. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 49(2), 173–197. [https://doi.org/10.1016/S0167-2681\(02\)00066-5](https://doi.org/10.1016/S0167-2681(02)00066-5)

- Day, R. H. & Lin, T. Y. (1991). A Keynesian business cycle. *Nicholas Kaldor and mainstream economics*. London: Palgrave Macmillan, 281–305. https://doi.org/10.1007/978-1-349-10947-0_16
- Day, R. H. & Pavlov, O. V. (2004). Computing economic chaos. *Computational Economics*, 23(4), 289–301. <https://doi.org/10.1023/B:CSEM.0000026787.81469.1f>
- Day, R. H. (1983). The emergence of chaos from classical economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 98(2), 201–215. <https://doi.org/10.2307/1885621>
- DeCoster, G. P., Labys, W. C. & Mitchell, D. W. (1992). Evidence of chaos in commodity futures prices. *The Journal of Futures Markets*, 12(3), 291–305. <https://doi.org/10.1002/fut.3990120305>
- Deryabina, M. A. (2018). Samoorganizatsiya: teoreticheskie i metodologicheskie osnovaniya v optike sinergeticheskoy paradigmy [Self-organization: theoretical and methodological foundations in the optics of the synergetic paradigm]. *Obshchestvennye nauki i sovremennost' [Social Sciences and Contemporary World]*, 6, 149–161. <https://doi.org/10.31857/S086904990002757-4> (In Russ.)
- Dieci, R., Mignot, S. & Westerhoff, F. (2022). Production delays, technology choice and cyclical cobweb dynamics. *Chaos, Solitons & Fractals*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111796>
- Ekaterinchuk, E., Jungeilges, J., Ryazanova, T. & Sushko, I. (2018). Dynamics of a minimal consumer network with bi-directional influence. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 58, 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2017.04.007>
- Evstigneeva, L. P. & Evstigneev, R. N. (2010b). *Ekonomika kak sinergeticheskaya sistema [Economy as a synergetic system]*. Moscow, Russia: LENAND, 272. (In Russ.)
- Evstigneeva, L. P. & Evstigneev, R. N. (2010a). Ekonomicheskaya integratsiya kak sinergeticheskiy fenomen [Economic integration as a synergetic phenomenon]. *Mir peremen [The World of Transformations]*, 4, 99–114. (In Russ.)
- Evstigneeva, L. P. & Evstigneev, R. N. (2012). Stanovlenie ekonomicheskoy sinergetiki [Formation of economic synergy]. *Obshchestvennye nauki i sovremennost' [Social Sciences and Contemporary World]*, 1, 122–133. (In Russ.)
- Faggini, M. & Parziale, A. (2012). The failure of economic theory. Lessons from chaos theory. *Modern Economy*, 3(1). <https://doi.org/10.4236/me.2012.31001>
- Fan, X., Wang, L. & Li, S. (2016). Predicting chaotic coal prices using a multi-layer perceptron network model. *Resources Policy*, 50, 86–92. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.08.009>
- Fanti, L. & Manfredi, P. (2007). Neoclassical labour market dynamics, chaos and the real wage Phillips curve. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 62(3), 470–483. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2005.01.007>.
- Fatás-Villafranca, F., Saura, D. & Vazquez, F. J. (2009). Diversity, persistence and chaos in consumption patterns. *Journal of bioeconomics*, 11(1), 43–63. <https://doi.org/10.1007/s10818-009-9059-8>
- Fernández-Herrería, A. & Martínez-Rodríguez, F. M. (2019). The earth charter as a new worldview in a post-neoliberal world: chaos theory and morphic fields as explanatory contexts. *World Futures*, 75(8), 591–608. <https://doi.org/10.1080/02604027.2019.1634417>
- Ferri, P., Greenberg, E. & Day, R. H. (2001). The Phillips curve, regime switching, and the NAIRU. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 46(1), 23–37. [https://doi.org/10.1016/s0167-2681\(01\)00185-8](https://doi.org/10.1016/s0167-2681(01)00185-8)
- Gaertner, W. & Jungeilges, J. (1988). A non-linear model of interdependent consumer behaviour. *Economics Letters*, 27(2), 145–150. [https://doi.org/10.1016/0165-1765\(88\)90087-0](https://doi.org/10.1016/0165-1765(88)90087-0)
- Gallas, J. A. C. & Nusse, H. E. (1996). Periodicity versus chaos in the dynamics of cobweb models. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 29(3), 447–464. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(95\)00082-8](https://doi.org/10.1016/0167-2681(95)00082-8)
- Guo, F., Liu, C. & Shi, Q. (2019). Smart or stupid depends on who is your counterpart: a cobweb model with heterogeneous expectations. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 23(5), 20170082. <https://doi.org/10.1515/snde-2017-0082>
- Haken, H. (1977). Synergetics. *Physics Bulletin*, 28(9), 412–414.
- Haken, H. (1978). *Synergetics: An Introduction Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology*. New York, the USA: Springer, 376.

Hallegatte, S., Ghil, M., Dumas, P. & Hourcade, J. C. (2008). Business cycles, bifurcations and chaos in a neo-classical model with investment dynamics. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 67(1), 57–77. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2007.05.001>

Hanias, M., Tsakonas, S., Magafas, L., Thalassinou, E. I. & Zachilas, L. (2020). Deterministic chaos and forecasting in Amazon's share prices. *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, 15(2), 253–273. <https://doi.org/10.24136/eq.2020.012>

Ishiyama, K. & Saiki, Y. (2005). Unstable periodic orbits embedded in a chaotic economic dynamics model. *Applied Economics Letters*, 12(12), 749–753. <https://doi.org/10.1080/13504850500120318>

Ivanchenko, I. S., Boeva, K. Y., Temirkanova, A. V. & Jiang, H. (2021). Controlled Chaos as a Tool of Modern Globalization. *Strategies and Trends in Organizational and Project Management. DITEM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 214–218. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94245-8_29

Jakimowicz, A. (2010). Catastrophes and Chaos in Business Cycle Theory. *ActaPhysica Polonica, A*, 117(4), 640–646.

Jungeilges, J., Pavletsov, M. & Perevalova, T. (2022). Noise-induced behavioral change driven by transient chaos. *Chaos, Solitons & Fractals*, 158, 112069. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112069>

Kakhovska, O., Popova, D., Skyba, E. & Tyshchenkova, I. (2020). Demythologization of the “controlled chaos” as a tool for geopolitical war: economic and sociocultural markers. *Economic Annals-XXI*, 184(7–8), 94–106. <https://doi.org/10.21003/ea.V184-09>

Kelsey, D. (1988). The economics of chaos or the chaos of economics. *Oxford economic papers*, 40(1), 1–31. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.oep.a041839>.

Kirdina-Chandler, S. G. (2017). Evolyutsiya sotsial'no-ekonomicheskikh sistem na mezourovne: predely mnogoobraziya [The evolution of socio-economic systems at the meso-level: the limits of diversity.]. *Ocherki po ekonomicheskoy sinergetike [Essays on Economic Synergetics]*. Moscow, Russia: Institute of Economics, Russian Academy of Sciences, 47–68. (In Russ.)

Kirilyuk, I. L. (2020). Matematicheskiy apparat dlya issledovaniya ierarkhicheskikh sistem v ekonomike [Mathematical apparatus for the study of hierarchical systems in economics]. *Evolyutsiya ierarkhicheskikh struktur v ekonomike i ekonomicheskii rost [Evolution of Hierarchical Economic Structures and Economic Growth]*, 116–126. (In Russ.)

Kolmogorov, A. N. (1954). O sokhraneniі uslovno-periodicheskikh dvizheniy pri malom izmenenii funktsii Gamil'tona [On the invariance of quasi-periodic motions under small perturbations of the Hamiltonian]. *Doklady akademii nauk SSSR [Reports of the Academy of Sciences USSR]*, 98(4), 527. (In Russ.)

Korybko, A. & Haddad, H. (2016). Chaos theory, global systemic change, and Hybrid Wars. *Comparative Politics Russia*, 7(4(25)), 25–35. [https://doi.org/10.18611/2221-3279-2016-7-4\(25\)-25-35](https://doi.org/10.18611/2221-3279-2016-7-4(25)-25-35)

Kuruc, A. (2003). The relevance of Chaos Theory to operations. *Australian Defence Force Journal*, 162, 4–18.

Kuznetsov, B. L. (2004). Ekonomicheskaya sinergetika kak metodologiya ekonomicheskogo razvitiya [Economic synergetics as a methodology of economic development]. *Ekonomicheskoe vrozhdzenie Rossii [The Economic Revival of Russia]*, 2, 34–36. (In Russ.)

Lahmiri, S. & Bekiros, S. (2019). Cryptocurrency forecasting with deep learning chaotic neural networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, 118, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.11.014>

Li, Y. & Wang, L. (2019). Chaos in a duopoly model of technological innovation with bounded rationality based on constant conjectural variation. *Chaos, Solitons & Fractals*, 120, 116–126. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2018.11.038>

Liubarskaya, M. A., Chekalin, V. S. & Kim, O. L. (2021). Issledovanie energoperekhoda 4.0 s pozitivnoy ekonomicheskoy sinergetiki [Research of energy transition 4.0 from the position of economic synergetics]. *Ekonomicheskii vektor [Economic vector]*, 4(27), 144–148. <https://doi.org/10.36807/2411-7269-2021-4-27-144-148> (In Russ.)

- Lux, T. (1998). The socio-economic dynamics of speculative markets: interacting agents, chaos, and the fat tails of return distributions. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 33(2), 143–165. [https://doi.org/10.1016/S0167-2681\(97\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0167-2681(97)00088-7)
- Mandelbrot, B. (1960). The Pareto-Levy law and the distribution of income. *International economic review*, 1(2), 79–106. <https://doi.org/10.2307/2525289>
- Mandelbrot, B. (1961). Stable Paretian random functions and the multiplicative variation of income. *Econometrica*, 29(4), 517–543. <https://doi.org/10.2307/1911802>
- Mandelbrot, B. (1962). Paretian distributions and income maximization. *The Quarterly Journal of Economics*, 76(1), 57–85. <https://doi.org/10.2307/1891131>.
- Mandelbrot, B. (1963). New methods in statistical economics. *The Journal of political economy*, 71(5), 421–440. <https://doi.org/10.1086/258792>.
- Mandelbrot, B. (2002). *Fraktal'naya geometriya prirody [The Fractal Geometry of Nature]*. Moscow, Izhevsk, Russia: Institute for Computer Science Publ., 656. (In Russ.)
- Mandelbrot, B. B. (1971). When can price be arbitrated efficiently? A limit to the validity of the random walk and martingale models. *The Review of Economics and Statistics*, 53(3), 225–236. <https://doi.org/10.2307/1937966>
- Mann, S. R. (1992). Chaos Theory and Strategic Thought. *Parameters*, 22(3), 54–68.
- Matsumoto, A. & Nonaka, Y. (2006). Statistical dynamics in a chaotic Cournot model with complementary goods. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 61(4), 769–783. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2004.07.008>
- Matsumoto, A. & Szidarovszky, F. (2022). The chaotic monopolist revisited with bounded rationality and delay dynamics. *Chaos, Solitons & Fractals*, 159, 112142. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112142>
- McCullen, N. J., Ivanchenko, M. V., Shalfeev, V. D. & Gale, W. F. (2011). A dynamical model of decision-making behavior in a network of consumers with applications to energy choices. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21(09), 2467–2480. <https://doi.org/10.1142/S0218127411030076>
- Mendes, D. A. & Mendes, V. (2005). Control of chaotic dynamics in an OLG economic model. *Journal of Physics: Conference Series*, 23, 158–181. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/23/1/019>
- Molchanov, A. V. & Smirnov, F. A. (2012). Nastuplenie ery finansovogo khaosa kak krizis tsivilizatsii Zapada [Beginning of Financial Turmoil Age as a Crisis for the Western Civilization]. *Novyy universitet. Seriya «Ekonomika i pravo» [New university. The series “Economics and Law”]*, 3(13), 4–13. (In Russ.)
- Möser, J. (1962). On invariant curves of area-preserving mappings of an annulus. *Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, II*, 1–20.
- Moshiri, S. & Foroutan, F. (2006). Forecasting nonlinear crude oil futures prices. *The energy journal*, 27(4), 81–96. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol27-No4-4>
- Moşteanu, N. R. (2019). Intelligent tool to prevent Economic Crisis–Fractals. A possible solution to assess the Management of Financial Risk. *Calitatea*, 20(172), 13–17.
- Mukhin, R. R. (2014). Dinamicheskiy khaos: trudnyy put' otkrytiya [Dynamical chaos: the difficult path of discovering]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika [Izvestiya VUZ. Applied nonlinear dynamics]*, 22(4), 43–54. (In Russ.)
- Naimzada, A. K. & Ricchiuti, G. (2008). Complex dynamics in a monopoly with a rule of thumb. *Applied Mathematics and Computation*, 203(2), 921–925. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.04.020>
- Nie, P., Abd-Rabo, M. A., Sun, Y. & Ren, J. (2019). A consumption behavior model with advertising and word-of-mouth effect. *Journal of Nonlinear Modeling and Analysis*, 1, 461–489. <http://dx.doi.org/10.12150/jnma.2019.461>
- Nishimura, K. & Sorger, G. (1996). Optimal cycles and chaos: A survey. *Studies in Nonlinear Dynamics & Econometrics*, 1(1), 11–28. <https://doi.org/10.2202/1558-3708.1009>
- Onozaki, T. (2018). One-dimensional nonlinear cobweb model. *Nonlinearity, Bounded Rationality, and Heterogeneity*, 25–77. https://doi.org/10.1007/978-4-431-54971-0_8

Onozaki, T., Esashi, K., Saiki, Y. & Sato, Y. (2015). Chaotic Itinerancy in Regional Business Cycle Synchronization. *立正大学経済学会ディスカッション・ペーパー [Rissho University Economic Society Discussion Paper]*, 1, 1–17.

Poincaré, H. (1892). *Les méthodesnouvelles de la mécaniqueceleste. Tome I. Solutions périodiques. Non-existence des intégralesuniformes. Solutions asymptotiques*. Paris: Gauthier-Villars et fils, imprimeurs-libraires, 385. (In French)

Poincaré, H. (1893). *Les méthodesnouvelles de la mécaniqueceleste. Tome II. Méthodes de MM. Newcomb, Gylden, Lindstedt et Bohlin*. Paris: Gauthier-Villars et fils, imprimeurs-libraires, 479. (In French)

Poincaré, H. (1899). *Les méthodesnouvelles de la mécaniqueceleste. Tome III. Invariants intégraux. Solutions périodiques du deuxième genre. Solutions doublementasymptotiques*. Paris: Gauthier-Villars et fils, imprimeurs-libraires, 414. (In French)

Prigogine, I. & Stengers, I. (1984). *Order out of Chaos: man's new dialogue with nature*. Toronto; New York, N.Y.: Bantam Books, 349.

Prigogine, I. & Stengers, I. (1997). *The end of certainty: time, chaos, and the new laws of nature*. New York: Free Press, 228.

Puu, T. (1991). Chaos in duopoly pricing. *Chaos, Solitons & Fractals*, 1(6), 573–581. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(91\)90045-B](https://doi.org/10.1016/0960-0779(91)90045-B)

Puu, T. (1995). The chaotic monopolist. *Chaos, Solitons & Fractals*, 5(1), 35–44. [https://doi.org/10.1016/0960-0779\(94\)00206-6](https://doi.org/10.1016/0960-0779(94)00206-6)

Pyragas, K. (1992). Continuous control of chaos by self-controlling feedback. *Physics letters A*, 170(6), 421–428. [https://doi.org/10.1016/0375-9601\(92\)90745-8](https://doi.org/10.1016/0375-9601(92)90745-8)

Richards, D. (1990). Is strategic decision making chaotic? *Behavioral Science*, 35(3), 219–232. <https://doi.org/10.1002/bs.3830350305>

Sarveswararao, V. & Ravi, V. (2020). Chaos, Machine Learning and Deep Learning based Hybrid to forecast Consumer Price Index Inflation in India. *2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 2551–2557. <https://doi.org/10.1109/ssci47803.2020.9308309>

Simionescu, M. & Śmiechowski, M. (2016). Forecasting economic growth using chaos theory. *Czech Journal of Social Sciences, Business and Economics*, 5(3), 37–42.

Slavyanov, A. S. (2015). Problemy protivodeystviya tekhnologiyam upravlyаемого khaosa v razvivayushchikhsya ekonomicheskikh sistemakh [Issues of Counteracting the Controlled Chaos Technologies in Emerging Economies]. *Nacional'nye interesy: priority i bezopasnost' [National interests: priorities and security]*, 22(307), 2–12. (In Russ.)

Smith, A. (2002). Three scenarios for applying chaos theory in consumer research. *Journal of Marketing Management*, 18(5–6), 517–531. <https://doi.org/10.1362/0267257022683640>

Sonnemans, J., Hommes, C., Tuinstra, J. & van de Velden, H. (2004). The instability of a heterogeneous cobweb economy: a strategy experiment on expectation formation. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 54(4), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2003.02.004>

Spelta, A., Pecora, N. & Pagnottoni, P. (2022). Chaos based portfolio selection: A nonlinear dynamics approach. *Expert Systems with Applications*, 188, 116055. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116055>

Stepin, V. S. (2013). Tipy nauchnoy ratsional'nosti i sinergeticheskaya paradigma [Types of scientific rationality and synergetic paradigm]. *Slozhnost'. Razum. Postneklassika [Complexity. Mind. Postnonclassics]*, 4, 45–59. (In Russ.)

Sterman, J. D. (1989). Deterministic chaos in an experimental economic system. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 12(1), 1–28. [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(89\)90074-7](https://doi.org/10.1016/0167-2681(89)90074-7)

Stoop, R. (2021). Stable periodic economic cycles from controlling. *Nonlinearities in Economics. Dynamic Modeling and Econometrics in Economics and Finance*, 29, 209–244. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70982-2_15

Suleymanova, L. (2017). The influence of the “Controlled Chaos” technology on the geopolitical situation in the Greater Middle East. *The Open Journal of Political Science*, 7(2), 189–196. <https://doi.org/10.4236/ojps.2017.72015>

Tian, Y., Ma, J., Xie, L., Koivumäki, T. & Seppänen, V. (2020). Coordination and control of multi-channel supply chain driven by consumers' channel preference and sales effort. *Chaos, Solitons & Fractals*, 132. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109576>

Verkhovzin, A. N. (2012). Anri Puankare (k 100-letiyu so dnya smerti) [Henri Poincare (100 years since his death)]. *Vestnik Pskovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i fiziko-matematicheskie nauki [Bulletin of Pskov State University. Series: Natural and Physical-Mathematical Sciences]*, 1, 197–202. (In Russ.)

Veseth, M. (1998). *Selling globalization: the myth of the global economy*. Boulder, the USA: Lynne Rienner Publishers, 215.

Wang, F., Wu, C. H., Tsai, S. B. & Jiang, Y. Z. (2020). An Empirical Study of a Mathematical Model for Influence of Government Tax on the Price Behavior and the Stability of Market Price. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8097402>

Wu, W., Chen, Z. & Ip, W. H. (2010). Complex nonlinear dynamics and controlling chaos in a Cournot duopoly economic model. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 11 (5), 4363–4377. <https://doi.org/10.1016/j.nonrwa.2010.05.022>

Xu, L. & Serletis, A. (2019). Communication frictions, sentiments, and nonlinear business cycles. *International Journal of Economic Theory*, 15 (2), 137–152. <https://doi.org/10.1111/ijet.12163>

Yoshida, H. & Asada, T. (2007). Dynamic analysis of policy lag in a Keynes–Goodwin model: stability, instability, cycles and chaos. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 62 (3), 441–469. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2004.10.014>

Zhang, J., Da, Q. & Wang, Y. (2009). The dynamics of Bertrand model with bounded rationality. *Chaos, Solitons & Fractals*, 39 (5), 2048–2055. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2007.06.056>

Zhang, Q. & Mu, Y. (2022). Economic Forecasting Model Based on Chaos Simulated Annealing Neural Network. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/9005833>

Zhang, W.-B. (2006). *Discrete dynamical systems, bifurcations and chaos in economics*. Oxford: Elsevier, 460.

Zhang, W.-B. (2021). Mao Zedong and the Preconditions for the Butterfly Effect. *The Butterfly Effect in China's Economic Growth*. Singapore: Palgrave Macmillan, 1–27. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9889-0_1

Zhou, W. & Chu, T. (2019). Complex Dynamical Behavior of a Bounded Rational Duopoly Game with Consumer Surplus. *Research Advances in Chaos Theory*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87200>

Zhou, W. & Wang, X. X. (2019). On the stability and multistability in a duopoly game with R&D spillover and price competition. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2019, 1–21. <https://doi.org/10.1155/2019/2369898>

Информация об авторах

Лаврикова Юлия Георгиевна — доктор экономических наук, доцент, директор Института экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0002-6419-2561> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29; e-mail: lavrikova.ug@uiec.ru).

Бучинская Ольга Николаевна — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник Сектора территориальной конкуренции Центра экономической теории, Институт экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0002-5421-2522> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, e-mail: buchinskaia.on@uiec.ru).

Мыслякова Юлия Геннадьевна — кандидат экономических наук, заведующая Лабораторией экономической генетики регионов, Институт экономики УрО РАН; <https://orcid.org/0000-0001-7635-3601> (Российская Федерация, 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29 e-mail: mysliakova.ug@uiec.ru).

About the authors

Yulia G. Lavrikova — Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Director, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0002-6419-2561> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: lavrikova.ug@uiec.ru).

Olga N. Buchinskaia — Cand. Sci. (Econ.), Senior Research Associate of the Sector of Territorial Competition, Center for Economic Theory, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0002-5421-2522> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: buchinskaia.on@uiec.ru).

Yuliya G. Myslyakova — Cand. Sci. (Econ.), Head of the Laboratory of Economic Genetics of the Regions, Institute of Economics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0001-7635-3601> (29, Moskovskaya St., Ekaterinburg, 620014, Russian Federation; e-mail: myslyakova.ug@uiec.ru).

Дата поступления рукописи: 18.12.2022.

Прошла рецензирование: 09.01.2023.

Принято решение о публикации: 15.02.2023.

Received: 18 Dec 2022.

Reviewed: 09 Jan 2023.

Accepted: 15 Feb 2023.