

Методы теории детерминированного хаоса в адаптивном управлении инновационным процессом

Methods of deterministic chaos theory in adaptive management of the innovation process



И. Л. Туккель,
д. т. н., профессор
✉ tukkel@mail.ru

I. L. Tukkel,
grand PhD in engineering, professor



А. В. Сурина,
к. т. н., доцент
✉ surina_av@spbstu.ru

A. V. Surina,
candidate of technical sciences,
associate professor



А. В. Григорьева,
студент магистратуры/менеджер проектов,
Глобал вижн холдинг
✉ a.v.g.63@yandex.ru

A. V. Grigoreva,
master's student/project manager,
Global vision holding

Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Higher school of projecting and industrial innovation, Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

В условиях нестабильной экономической ситуации и стремительного развития технологий управление инновациями становится крайне сложной задачей, которая требует гибкости, способности быстро адаптироваться и действовать в условиях неопределенности и сложности происходящих изменений. Инновационный процесс трактуется как нелинейная, чувствительная к начальному состоянию система, в которой слабые сигналы и микро-возмущения способны вызывать системные изменения. Возникает потребность в использовании новых инструментов, способных учитывать отмеченные особенности нелинейных систем. Именно таким потенциалом обладает теория детерминированного хаоса. Ключевым элементом подхода выступает «эффект бабочки», интерпретируемый как инструмент обнаружения слабых сигналов и прогнозирования фазовых переходов в инновационной динамике. Обоснована необходимость замены традиционных линейных стратегий на гибридные архитектуры управления. Представлены аналитические инструменты, способствующие количественной диагностике хаотических инновационных систем. Предложена классификация форм реализации «эффекта бабочки» в управленческой практике и интегративная концептуальная модель адаптивного управления, ориентированная на упреждение, гибкость и обучение. Практическая значимость заключается в применимости подхода в бизнес-аналитике, цифровой трансформации, управлении инновациями и стратегическом планировании.

In an unstable economic situation and the rapid development of technology, innovation management is becoming an extremely difficult task that requires flexibility, the ability to quickly adapt and act in the face of uncertainty and complexity of the changes taking place. The innovation process is interpreted as a nonlinear, initial-state-sensitive system in which weak signals and micro-disturbances can cause systemic changes. There is a need to use new tools capable of considering the noted features of nonlinear systems. The theory of deterministic chaos has exactly this potential. The key element of the approach is the «butterfly effect», interpreted as a tool for detecting weak signals and predicting phase transitions in innovation dynamics. The necessity of replacing traditional linear strategies with hybrid control architectures is substantiated. Analytical tools that facilitate the quantitative diagnosis of chaotic innovation systems are presented. A classification of the forms of implementation of the «butterfly effect» in management practice and an integrative conceptual model of adaptive management focused on anticipation, flexibility and learning are proposed. The practical significance lies in the applicability of the approach in business analytics, digital transformation, innovation management and strategic planning.

Ключевые слова: инновационная система, адаптивное управление, теория детерминированного хаоса, «эффект бабочки», VUCA-мир.
Keywords: innovative system, adaptive management, theory of deterministic chaos, «butterfly effect», VUCA-world.

Введение

В последние годы социально-экономическая среда, в которой существуют компании, все более четко демонстрирует признаки высокой нестабильности, сложности из-за большого количества взаимосвязей процессов и ускоряющегося технологического роста. Компании сталкиваются с необходимостью принимать решения в условиях высокой неопределенности, быстро меняющихся условий и плохо предсказуемых последствий. В таких условиях традиционные подходы к планированию и управлению становятся неэффективными.

Для описания такой среды в научной и практической литературе все чаще применяется модель VUCA-мира, возникшая в военной сфере, но сегодня

широко используемая для анализа изменений в экономике [1-3]. Именно в контексте VUCA-мира становится очевидной необходимость гибких, адаптивных и чувствительных к изменениям подходов к управлению инновациями [4-6].

Объектом исследования является инновационный процесс как сложная, нелинейная и чувствительная к начальному состоянию система. Такой объект характеризуется: высокой динамичностью, наличием обратных связей, большим количеством участников и внешних факторов, влияющих на процессы. Предмет исследования — возможность применения методов теории детерминированного хаоса, в частности «эффекта бабочки», для адаптивного и превентивного управления инновациями.

В классических моделях инновационный процесс представлен как линейный, от идеи до ее внедрения. Однако, современные исследования и эмпирическая практика показывают, что даже незначительные внешние и внутренние воздействия могут существенно изменить траекторию развития. Данная характеристика указывает на наличие хаотической составляющей, характерной для нелинейных динамических систем [7, 8].

В таких условиях возникает потребность в использовании инструментов, способных учитывать скрытые связи, чувствительность к начальному состоянию и возможность внезапных фазовых переходов. Именно таким потенциалом обладает теория детерминированного хаоса (ДХ) — область нелинейной динамики, изучающая поведение систем, в которых детерминированные правила порождают непредсказуемое поведение [9].

Одним из ключевых понятий в рамках ДХ является «эффект бабочки», описывающий способность минимальных изменений вызывать значительные последствия. Для инновационного управления данный эффект используется с целью проведения диагностики слабых сигналов, которые могут вызывать системные сдвиги, и разработки сценариев адаптации [10-12]. Такой подход позволяет не просто реагировать на происходящее, но и прогнозировать точки бифуркации, управляя инновациями с учетом микроизменений в системе [13, 14].

Цель работы — провести анализ применения методов теории детерминированного хаоса, в частности «эффекта бабочки», в управлении инновациями.

Для достижения цели сформулированы следующие задачи исследования:

- провести анализ существующих методов управления инновациями и выявить их ограничения;
- обосновать применимость теории детерминированного хаоса к инновационным процессам;
- проанализировать «эффект бабочки» как аналитический инструмент для прогнозирования точек бифуркации и слабых сигналов;
- разработать предложения по включению хаотического анализа в управленческую практику.

Методы исследования включает анализ детерминированного хаоса для инновационных процессов и исследования литературы по теории хаоса.

1. Обзор литературы

Современные исследования подтверждают возрастающий интерес к использованию методов теории детерминированного хаоса в экономике и инновационном менеджменте. Классические модели, ориентированные на линейное прогнозирование и сценарный анализ, все чаще критикуются за неспособность учесть высокую динамичность и множественность взаимосвязей в VUCA-мире [1]. Одновременно с этим расширяются и границы применения теории хаоса, так в работе [7] систематизируют подходы к анализу фрактальных структур в финансовых и инновационных системах,

подчеркивая значение бифуркаций и нелинейных взаимодействий [7], а в работе [8] демонстрируют, что «микровозмущения» в потоках ресурсов могут служить ранними индикаторами макроэкономических изменений [8]. Особую роль в управленческой практике играет «эффект бабочки». Существует также ряд работ, направленных на адаптацию и применение именно этого эффекта в реальных условиях. Например, в [10] адаптируют его для распределенных R&D-экосистем, показывая, как слабые сигналы на периферии могут трансформироваться в прорывные инновации или, напротив, в серьезные риски [10], а в [12, 13] разрабатывают методики карт влияний и «сценарных сетей» для визуализации точек бифуркации и поддержки адаптивных стратегий [12, 13]. В источнике [15] дополнительно вводят понятие «открытых инноваций» в контексте «эффекта бабочки», показывая, что коллаборации с внешними партнерами усиливают каскадные эффекты малых сигналов, а в дополнение в [16] подчеркивается значение открытых инноваций как среды, где внешние коллаборации усиливают каскадные эффекты и делают систему более чувствительной к микроизменениям [15, 16]. Также есть работы, критикующие данный инструмент, в основном из-за риска «переуправления» шумовыми данными, что подчеркивает необходимость надежных фильтров при работе с микросигналами [11]. Помимо этого, в работах [15, 17] указывают на важность интеграции экспертных панелей, Delphi-анализов и Big Data-подходов для повышения точности выявления значимых возмущений [15, 17]. По данным обзорной статьи [7], число публикаций по теории хаоса в экономике выросло более чем в три раза за последнее десятилетие, что свидетельствует об устойчивом расширении научного интереса и практической значимости темы [7]. Также в ходе анализа научной литературы по ключевым запросам «Теория хаоса в экономике» и «Chaos theory in economics» в Google Scholar был составлен график выхода научных статей, который представлен на рис. 1.

Из данных рис. 1 видно, что за последние полвека наблюдается устойчивый рост числа публикаций по теории хаоса в экономике. При этом англоязычные статьи преобладают. При этом в 2011-2020 гг. достигнут пик интереса в обеих группах.

2. Инновационная деятельность в условиях нестабильной внешней среды

В современных социально-экономических условиях инновационная деятельность характеризуется высокой степенью нестабильности, неоднородности и сложности. Компании, вовлеченные в разработку и внедрение новых решений, вынуждены функционировать в среде, подверженной резким колебаниям внешних факторов: технологическим прорывам, изменяющимся потребительским предпочтениям, глобальным кризисам. Эти характеристики порождают переход от предсказуемой среды к такой, в которой долгосрочное планирование теряет свою эффективность, а оценки, полученные традиционными моделями не только, не соответствуют реальности, но и

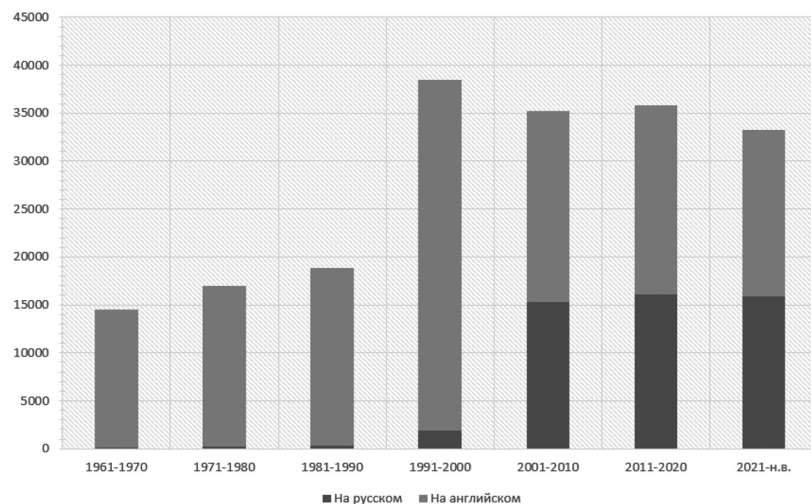


Рис. 1. Количество публикаций по темам «теория хаоса в экономике» и «chaos theory in economics» в Google Scholar

вводят в заблуждение сотрудников и ухудшают и так нестабильную ситуацию.

Для описания подобных условий в научной литературе применяется модель VUCA, где:

- Volatility (волатильность) — отражает нестабильность технологической и рыночной среды, делающую невозможным использование жестких стратегических ориентиров.
- Uncertainty (неопределенность) — характеризует низкую предсказуемость последствий даже при наличии полной информации.
- Complexity (сложность) — указывает на множественность взаимосвязанных факторов, затрудняющих управление.
- Ambiguity (неоднозначность) — проявляется в неясности целей, недостаточности аналогов и отсутствии устоявшихся сценариев.

В условиях, описываемых моделью VUCA, традиционные методы управления инновациями демонстрируют ограниченную эффективность. Методы, базирующиеся на линейных представлениях об инновационном цикле такие как последовательное планирование, сценарный анализ и SWOT-моделирование предполагают стабильность структуры и фиксированность параметров. Однако, динамика инновационных процессов в реальности часто нарушает эти предположения.

Исследования показывают, что применение классических инструментов управления в условиях высокой волатильности приводит к задержкам в реакции на изменения, потере релевантности решений и увеличению стратегических рисков [1, 17]. Особенно это актуально для распределенных инновационных экосистем, в которых взаимодействие между участниками непрерывно перестраивается.

В таких условиях возникает необходимость в использовании управленческих подходов, способных:

- учитывать нелинейность процессов;
- выявлять ранние признаки системных изменений;
- обеспечивать адаптивность и гибкость в стратегическом мышлении.

Одним из направлений, обладающих соответствующим потенциалом, как упоминалось выше, является

теория детерминированного хаоса. Она позволяет рассматривать инновационный процесс не как линейную последовательность, а как сложную динамическую систему с высокой чувствительностью к начальному состоянию.

3. Теория детерминированного хаоса как основа анализа инновационной динамики

Теория детерминированного хаоса представляет собой научное направление, изучающее поведение нелинейных динамических систем, в которых даже минимальные изменения начальных условий могут приводить к качественно различным сценариям эволюции. Несмотря на то, что такие системы подчиняются детерминированным законам, они демонстрируют высокую чувствительность, что делает их поведение непредсказуемым в долгосрочной перспективе [9].

Первоначально теория хаоса получила развитие в физике и метеорологии, однако в последние два десятилетия активно осваивается и в экономике, где сложные системы с обратными связями и множеством факторов оказываются аналогичными по структуре [7, 8]. Особую значимость она приобретает в инновационном управлении, где процессы протекают нелинейно, со множеством участников, обратными связями, и часто включают элементы самоорганизации [15].

Система, обладающая свойствами детерминированного хаоса, может внешне казаться случайной, однако в ее основе лежат строгие математические закономерности. К числу ключевых характеристик таких систем относятся:

- чувствительность к начальным условиям. Незначительное отклонение на входе может вызвать принципиально иную траекторию развития;
- нелинейность, выход системы непропорционален входу;
- бифуркации, состояния, при которых система переходит в качественно иное поведение;
- скрытая структура, упорядоченность в кажущемся беспорядке, выявляемая через реконструкцию фазового пространства [7, 9].

Применительно к инновационному управлению, эти свойства особенно актуальны в условиях высокой волатильности, множественности участников и отсутствия однозначных сценариев развития [3, 14]. В работе [10] хаотическая динамика рассматривается как ключевой контекст распределенных инноваций, где слабые отклонения в одной части системы могут вызвать каскадные последствия в других.

Для описания таких процессов теория хаоса предлагает математический инструментарий, адаптируемый под задачи инновационного анализа. Наиболее значимыми из них являются:

1. Реконструкция фазового пространства. Позволяет восстановить структуру скрытой динамики системы на основе временного ряда. Используется, чтобы выявить наличие аттракторов и траекторий. Применяется через метод τ -встраивания, который представлен в формуле:

$$y_k = \{x_k, x_{k+\tau}, x_{k+2\tau}, \dots, x_{k+(m-1)\tau}\},$$

где τ — шаг задержки; m — размерность встраивания; x_k — это скалярные наблюдаемые значения исходного временного ряда; y_k — это вектор, построенный на основе значений временного ряда x_k с учетом заданного шага задержки τ и размерности встраивания m . Этот вектор представляет собой точку во вновь реконструированном фазовом пространстве, которая содержит информацию о состоянии системы в момент времени k , учитывая ее динамическую историю.

Этот метод позволяет визуализировать системное поведение, например, в данных о R&D-активности или технологических сбоях.

2. Экспонента Ляпунова. Измеряет скорость расхождения траекторий системы. Положительное значение означает наличие хаотического режима:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \frac{d(t)}{d(0)},$$

где $d(0)$ — начальное расстояние между двумя траекториями системы, а $d(t)$ — расстояние между траекториями в момент времени t . В инновационном процессе может применяться к оценке устойчивости решений в условиях слабых возмущений [8, 18-22].

3. Корреляционная размерность. Оценивает степень сложности системы, рассчитывается по следующей формуле:

$$D_2 = \lim_{\epsilon \rightarrow \infty} \frac{\log C(\epsilon)}{\log \epsilon},$$

где $C(\epsilon)$ — вероятность, что расстояния между двумя точками меньше ϵ . Высокие значения указывают на

высокоорганизованную, но хаотичную структуру [18, 23-28].

4. Перестановочная энтропия. Метод оценки хаотичности временных рядов, вычисляется по формуле:

$$H(m) = \sum_{\pi} p(\pi) \ln p(\pi),$$

где $p(\pi)$ — вероятность перестановки длины m . Значения, близкие к максимуму $\ln(m!)$, указывают на высокий уровень хаоса [11, 29].

Данные инструменты позволяют количественно описывать динамику инновационной системы, обнаруживать скрытые паттерны и формировать обоснованные сценарии развития, включая выявление бифуркационных точек [7, 10].

В табл. 1 представлены ключевые параметры анализа и их интерпретация применительно к инновационным процессам.

После сопоставления характеристик и возможностей перечисленных инструментов становится очевидным, что каждый из них фокусируется на своей стороне нелинейной динамики инновационного процесса: реконструкция фазового пространства выявляет скрытые структурные паттерны активности R&D, экспонента Ляпунова позволяет оценить степень чувствительности инновационных решений к микровозмущениям, корреляционная размерность фиксирует сложность системных взаимодействий, а перестановочная энтропия служит индикатором уровня хаотичности временных рядов [7-11, 18, 23-29]. Вместе они формируют комплексный аналитический аппарат, необходимый для выявления точек бифуркации и ранней диагностики структурных изменений в инновационной экосистеме. Однако для практического применения этих методов требуется механизм, позволяющий не просто описывать и прогнозировать динамику, но и переводить обнаруженные микросигналы в управленческие решения. «Эффект бабочки» представляет собой механизм, который обеспечивает взаимодействие между математическим анализом и стратегическим менеджментом, позволяя преобразовывать даже незначительные «флуктуации» в стратегические точки приложения управленческого воздействия. В дальнейшем будет рассмотрена роль «эффекта бабочки» как ключевого инструмента адаптивного управления инновациями в условиях неопределенности, сложности, неоднозначности и быстротечности (VUCA-мира).

Таблица 1

Инструменты теории хаоса в инновационном управлении

Инструмент	Назначение	Возможности применения в инновациях
Реконструкция фазового пространства	Визуализация скрытой динамики	Выявление скрытых циклов в активности R&D
Экспонента Ляпунова	Диагностика чувствительности системы	Анализ устойчивости инновационных решений к возмущениям
Корреляционная размерность	Оценка сложности	Диагностика фазовых переходов при внедрении технологий
Перестановочная энтропия	Оценка уровня хаотичности	Обнаружение нелинейных трендов в пользовательском поведении

Сравнение традиционных моделей и «эффекта бабочки»

Подход	Цель	Инструменты	Преимущества	Ограничения	Источник
Сценарный анализ	Моделирование альтернатив развития	Экспертные оценки, сценарные модели	Гибкость, проработка возможных сценариев	Субъективность оценок, ограниченная применимость	[1]
Мониторинг слабых сигналов	Раннее выявление будущих изменений	СМИ, соцсети, клиентская обратная связь	Быстрая реакция, опережающее поведение	Трудности интерпретации, «шум»	[3, 32]
Системный анализ и карты влияний	Поиск точек бифуркации и причинных связей	Диаграммы, карты взаимосвязей	Визуализация сложных взаимосвязей, целостность	Сложность реализации, требует междисциплинарности	[4, 10]
Паттерн-аналитика	Обнаружение трендов	Big Data, алгоритмы машинного обучения	Автоматизация, высокая точность при наличии инфраструктуры	Высокие затраты на внедрение и сопровождение	[15]
Концепция «эффект бабочки»	Адаптивное управление на основе микроизменений	Интеграция сигналов, сценариев, микроаналитика	Учет слабых влияний, адаптивность, реактивность и предиктивность	Требует зрелой культуры, цифровых систем, командного подхода	[1, 3, 10, 11]

4. «Эффект бабочки» как инструмент адаптивного управления инновациями

«Эффект бабочки» впервые описан Эдвардом Лоренцем в 1963 г. как демонстрация крайней чувствительности нелинейных систем к начальному состоянию. В работе [30] приводится система Лоренца, иллюстрирующая этот эффект:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(y-x) \\ \dot{y} = x(\rho - z) - y \\ \dot{z} = xy - \beta z, \end{cases}$$

где параметры σ , ρ , β задают режим динамики. В инновационном контексте аналогичную роль часто играет логистическое отображение, используемое для моделирования чувствительности распределения ресурсов R&D:

$$x_{n+1} = r x_n (1 - x_n),$$

где x_n — доля усилий, направленных на новую технологию на итерации n , а параметр r отражает «реактивность» инновационной экосистемы [15, 30].

Далее приводится сравнение «эффекта бабочки» с традиционными моделями в табл. 2.

Табл. 2 показывает, что существующие подходы к управлению инновациями в условиях VUCA частично эффективны, но имеют серьезные ограничения. Основные проблемы — это фрагментарность методов, слабая чувствительность к микроизменениям, линейное мышление и недостаточная адаптивность. Только концепция «эффект бабочки» учитывает нелинейность, слабые сигналы и необходимость постоянной коррекции стратегии. Таким образом, «эффект

бабочки» вкладывает в инновационный менеджмент возможность «улавливать» и интерпретировать самые слабые сигналы, трансформируя их в управленческие решения, способные опережать и формировать будущее. Его выбор обусловлен логически и эмпирически исходя из задачи управления системой, обладающей высокой нелинейностью, сложностью и зависимостью от слабых сигналов.

Перед рассмотрением конкретных форм реализации «эффекта бабочки» в реальных системах, целесообразно в явном виде описать его ключевую роль в прогнозировании и адаптивном управлении. В традиционных подходах слабые сигналы часто теряются в информационном потоке, а сценарный анализ базируется на заранее известных параметрах. В противоположность этому, «эффект бабочки» выводит на первый план именно микровозмущения, которые способны через каскадные механизмы породить качественно новые траектории развития инновационного процесса [10].

Предлагаемая классификация форм применения «эффекта бабочки» отражает три стадии управленческого цикла. От начальной диагностики через моделирование до оперативных микроинтервенций. Формы реализации рассматриваемого «эффекта бабочки» представлены в табл. 3.

После диагностического этапа, на котором фиксируются «слабые» аномалии в показателях или поведении пользователей, переходим к прогностическому, где происходит углубленный анализ с помощью методов реконструкции фазового пространства и сетевого анализа, что позволяет смоделировать возможные точки бифуркации и выстроить альтернативные сценарии развития [10]. Адаптивная фаза включает оперативную проверку гипотез. По результатам этих экспериментов

Таблица 3

Формы реализации «эффекта бабочки»

Уровень применения	Инструменты	Цель	Пример возможного применения
Диагностический	Big Data-аналитика, мониторинг СМИ	Фиксация слабых сигналов	Выявление новых трендов по редким упоминаниям в соцсетях
Прогностический	Реконструкция фазового пространства, сетевой анализ	Моделирование бифуркаций и сценариев	Оценка устойчивости дорожной карты продукта
Адаптивный	MVP, A/B-тесты, микроинтервенции	Коррекция стратегии в режиме реального времени	Моментальная корректировка маркетинговой кампании на основе тестов

удается не просто реагировать, но и заранее корректировать стратегию, минимизируя риски и усиливая положительные эффекты.

Подводя итог можно сказать, что современные инструменты не обеспечивают системного прогнозирования и не успевают за динамикой окружающей среды. Необходима новая интегративная концептуальная модель, объединяющая лучшие практики и использующая слабые сигналы в качестве ресурса для устойчивых инноваций [3, 15, 31]. Основная идея заключается в том, чтобы использовать чувствительность системы к незначительным воздействиям в качестве стратегического рычага для раннего прогнозирования и минимизации рисков в инновациях.

Ключевые положения концептуальной модели:

1. Инновации развиваются нелинейно, поэтому управление должно быть адаптивным и чувствительным к изменениям.
2. Слабые сигналы — ранние признаки будущих сдвигов превращаются в инструмент предсказания рисков через мониторинг, сценарный анализ и междисциплинарную интерпретацию.
3. Точки бифуркации (кризисы, смена модели, новые технологии) рассматриваются как возможности, где малое вмешательство влияет на развитие.
4. Архитектура управления строится на предиктивности, гибкости и самообучении. Концепция «эффект бабочки» позволяет создать систему, основанную не на жестком планировании, а на реагировании на слабые воздействия и использовании их как источника роста.

Чтобы упростить восприятие логики концептуальной модели, на рис. 2 представлена схема ее ключевых компонентов.

Схема иллюстрирует последовательный процесс или «цепочку» принятия управленческих решений в контексте высокой изменчивости и неопределенности внешней среды. При этом «эффект бабочки» служит концептуальной метафорой и аналитическим инструментом, указывая, как незначительные, на первый взгляд, сигналы или изменения (малые «возмущения») могут приводить к крупным последствиям для всей системы.

Процесс начинается с обнаружения слабых сигналов — ранних признаков изменений посредством постоянного мониторинга и распознавания аномалий, что дает временное преимущество. Затем выявляются отклонения от ключевых показателей и потенциальные точки сдвига, что позволяет предвидеть критические сдвиги. Далее следует сценарное прогнозирование, предполагающее построение альтернативных путей развития на основе потенциальных рисков и возможностей. В процессе реализации организация адаптирует свою структуру, процессы и компетенции в режиме реального времени, опираясь на постоянную обратную связь. Результатом такого подхода является адаптивная стратегия, основанная на прогнозировании, гибкости и организационном обучении, что обеспечивает устойчивость и непрерывные инновации в мире VUCA.

Заключение

Современная инновационная деятельность протекает в условиях нестабильности, многовариантности и ускоряющихся изменений, что существенно снижает эффективность традиционных инструментов управления, основанных на линейной причинно-следственной логике. В данной статье обобщено применение методов теории детерминированного хаоса, в частности «эффекта бабочки», как концептуальной и инструментальной основы адаптивного управления инновационными системами.

Инновационный процесс рассмотрен как чувствительная, нелинейная система, в которой слабые сигналы и малозаметные отклонения способны инициировать масштабные изменения. «эффект бабочки» в таком контексте интерпретируется не как метафора, а как инструмент, позволяющий обнаруживать скрытые риски, прогнозировать фазовые переходы и усиливать адаптивный потенциал организации.

Научная новизна работы заключается в применении теории хаоса и теории управления инновациями, а также в трансформации «эффекта бабочки» в элемент управленческого инструментария. Практическая значимость выражается в возможности применения



Рис. 2. Схема концептуальной модели в управлении инновациями

концептуальной модели в стратегическом планировании, бизнес-аналитике и цифровой трансформации. Предлагаемая концептуальная модель демонстрирует высокий потенциал адаптивного управления на основе принципов детерминированного хаоса, однако ее практическая реализация сопряжена с рядом значимых ограничений. Во-первых, для корректного функционирования необходима современная цифровая инфраструктура. Во-вторых, успешное развертывание требует квалифицированных ИТ-специалистов и аналитиков. В-третьих, организационные барьеры — жесткие иерархические структуры, недостаток межфункционального взаимодействия и сопротивление

изменению устоявшихся бизнес-процессов могут существенно замедлить или частично заблокировать внедрение. Поэтому для данной концептуальной модели необходима последовательная верификация в рамках пилотных проектов с ограниченным масштабом, постепенная модулярная интеграция отдельных компонентов и разработка системных мер по управлению изменениями. Перспективами дальнейших исследований являются формализация метрик чувствительности инновационных систем, автоматизация диагностики нестабильностей и расширение кейсов практического применения концептуальной модели в различных секторах экономики.

Список использованных источников

1. C. C. J. M. Millar, O. Groth, J. F. Mahon. Management innovation in a VUCA world: Challenges and recommendations//California management review. 2018. Vol. 61. P. 5-14.
2. T. Mc Causland. Innovating in a VUCA world//Research-Technology Management. 2022. Vol. 65. №. 6. P. 57-58.
3. H. Eld, E. Johansson Innovation Strategies in a VUCA World. 2024.
4. В. В. Филатов, О. А. Моисеева, О. А. Полянская, Х. З. Ксенофонтова. Стратегии достижения конкурентных преимуществ на основе инновационных технологий в VUCA-мире современной бизнес-реальности//Инновационная экономика: информация, аналитика, прогнозы. № 2. 2024. С. 59-73.
5. M. Araújo, L. Reis, I. Morais. Innovation strategies for adaptation of organizations in a VUCA world//Proceedings of the 16th European Conference on Innovation and Entrepreneurship (ECIE). 2021. Vol. 2. P. 1245-1253.
6. R. Dhillon, Q. C. Nguyen. Strategies to respond to a VUCA world. 2021.
7. Ю. Г. Лаврикова, О. Н. Бучинская, Ю. Г. Мыслякова. Теория хаоса: расширение границ экономических исследований//AlterEconomics. 2023. 20 (1), 79-109.
8. М. А. Омелик, А. С. Азизов, О. В. Косникова. Применение теории хаоса в экономическом моделировании//Прикладные экономические исследования. 2023. №. S1. С. 18-25.
9. G. Chen. Chaos theory and applications: a new trend//Chaos Theory and Applications. 2021. Vol. 3. №. 1. P. 1-2.
10. E. G. Anderson Jr, N. R. Joglekar. The innovation butterfly: Managing emergent opportunities and risks during distributed innovation. Springer, 2012.
11. Р. Ахимова. Эффект бабочки//Актуальные вопросы физико-математического образования. Материалы межрегиональной студенческой научно-практической конференции. Грозный 21 апреля 2022 г. 2022. С. 90-98.
12. E. V. A. Monestier. Butterfly effect. The impacts of emerging digital technologies and their power to shape our collective future. 2020.
13. О. Н. Воронкова. Новые «черные лебеди» мировой экономики и политика риск-менеджмента//Международный журнал научных публикаций «Colloquium-journal» (Варшава, Польша). 2020. № 9 (61). С. 5.
14. O. Mack, A. Khare. Perspectives on a VUCA World//Managing in a VUCA World. 2016. С. 3-19.
15. J. G. Fichte. The Butterfly Effect//Next Industrial Revolution, The: A New Age For Innovation In Industry. Vol. 289. 2023.
16. А. М. Чуйкин. Концепция открытых инноваций и исследование стратегического потенциала организаций//Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: «Гуманитарные и общественные науки». 2012. №. 3. С. 32-41.
17. И. Никитинс. Инновационный взгляд на современные способы оценки степени неопределенности деловой среды и инструменты ее снижения//Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12. №. 1. С. 223-236.
18. Г. Г. Малинецкий. Хаос. Структуры. Вычислительный эксперимент. 3-е изд. Москва: Либроком, 2009. 320 с.
19. В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко, А. В. Волков. Необратимость, хаос и время Ляпунова в теории долгосрочного прогнозирования состояния сложных систем//Региональная информатика (РИ-2020). XVII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2020)». Санкт-Петербург, 28-30 октября 2020 г.: Материалы конференции. Ч. 1. СПб.: СПОИСУ, 2020. 393 с.
20. Z. Kunkera, O. Tihomir, N. Hadzic, N. Tosanovic. Using digital twin in a shipbuilding project//Applied Sciences. 2022. Vol. 12. №. 24. P. 12721.
21. R. Iwańkiewicz, R. Rutkowski. Digital twin of shipbuilding process in shipyard 4.0//Sustainability. 2023. Vol. 15. №. 12. P. 9733.
22. S. Mehdizadeh. A robust method to estimate the largest lyapunov exponent of noisy signals: a revision to the rosenstein's algorithm//Journal of biomechanics. 2019. Vol. 85. P. 84-91.
23. Е. Г. Воробьева. Аттракторы в теории хаоса//Научному прогрессу — творчество молодых. 2020. №. 1. С. 19-21.
24. X. Wang, N. V. Kuznetsov, G. Chen (ed.). Chaotic systems with multistability and hidden attractors. Vol. 40. Cham: Springer, 2021. P. 149-150.
25. Р. Х. Рахимов. Фракталы и устройство Вселенной//Computational nanotechnology. 2024. Vol. 11. №. 4. P. 190-208.
26. M. Akhmet, M. O. Fen, E. M. Alejaily. Dynamics with chaos and fractals. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
27. Ю. Г. Лаврикова, О. Н. Бучинская, Ю. Г. Мыслякова. Теория хаоса: расширение границ экономических исследований//Журнал экономической теории. 2023. Т. 20. №. 1. С. 79-109.
28. A. Fernández-Díaz. Overview and perspectives of chaos theory and its applications in economics//Mathematics. 2023. Vol. 12. №. 1. P. 92.
29. В. А. Новиков. Вклад Э. Н. Лоренца в математическую «теорию хаоса». «Эффект бабочки»//Стратегические направления развития науки, образования, технологий. Сб. научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции. В 3-х ч. Ч. 1. Белгород 31 июля 2017 г. 2017. С. 16-17.
30. Л. А. Паутова, А. К. Гуц. Использование теории хаоса и странных аттракторов в исследованиях индивидуального и социального сознания//МСИМ. 2004. № 1 (13).
31. Е. В. Сидорова, А. А. Пахомова, Ш. Халас. Инновации в менеджменте//Инновации. №. 3. С. 34-40.

References

1. C. C. J. M. Millar, O. Groth, J. F. Mahon. Management innovation in a VUCA world: Challenges and recommendations//California management review. 2018. Vol. 61. P. 5-14.
2. T. Mc Causland. Innovating in a VUCA world//Research-Technology Management. 2022. Vol. 65. №. 6. P. 57-58.
3. H. Eld, E. Johansson Innovation Strategies in a VUCA World. 2024.
4. V. V. Filatov, O. A. Moiseeva, O. A. Polyanskaya, Kh. Z. Ksenofontova. Strategies for achieving competitive advantages based on innovative technologies in VUCA—the world of modern business reality//Innovative economy: information, analytics, forecasts. № 2. 2024. P. 59-73.
5. M. Araújo, L. Reis, I. Morais. Innovation strategies for adaptation of organizations in a VUCA world//Proceedings of the 16th European Conference on Innovation and Entrepreneurship (ECIE). 2021. Vol. 2. P. 1245-1253.
6. R. Dhillon, Q. C. Nguyen. Strategies to respond to a VUCA world. 2021.
7. Yu. G. Lavrikova, O. N. Buchinskaya, Yu. G. Myslyakova. Chaos theory: Expanding the boundaries of economic research//AlterEconomics. 2023. 20 (1), 79-109.
8. M. A. Omelik, A. S. Azizov, O. V. Kosnikova. Application of chaos theory in economic modeling//Applied economic research. 2023. № S1. P. 18-25.
9. G. Chen. Chaos theory and applications: a new trend//Chaos Theory and Applications. 2021. Vol. 3. №. 1. P. 1-2.
10. E. G. Anderson Jr, N. R. Joglekar. The innovation butterfly: Managing emergent opportunities and risks during distributed innovation. Springer, 2012.
11. R. Akhigova. The butterfly effect//Current issues in physics and mathematics education. Proceedings of the interregional student scientific and practical conference. Grozny, April 21, 2022. 2022. P. 90-98.
12. E. V. A. Monestier. Butterfly effect. The impacts of emerging digital technologies and their power to shape our collective future. 2020.
13. O. N. Voronkova. New «black swans» of the global economy and risk management policy//International Journal of Scientific Publications «Colloquium-journal» (Warsaw, Poland). 2020. № 9 (61). P. 5.

14. O. Mack, A. Khare. Perspectives on a VUCA World//Managing in a VUCA World. 2016. С. 3-19.
15. J. G. Fichte. The Butterfly Effect//Next Industrial Revolution, The: A New Age For Innovation In Industry. Vol. 289. 2023.
16. A. M. Chuikin. The concept of open innovation and the study of the strategic potential of organizations//Bulletin of the Baltic Federal University n. a. I. Kant. Series: «Humanities and Social Sciences». 2012. № 3. P. 32-41.
17. I. Nikitins. An innovative look at modern ways to assess the degree of uncertainty in the business environment and tools to reduce it//Issues of innovative economics. 2022. Vol. 12. № 1. P. 223-236.
18. G. G. Malinetsky. Chaos. Structures. Computational Experiment. 3rd ed. Moscow: Librocom, 2009. 320 p.
19. V. A. Ostreikovsky, E. N. Shevchenko, A. V. Volkov. Irreversibility, chaos and Lyapunov time in the theory of long-term forecasting of the state of complex systems//Regional Informatics (RI-2020). XVII St. Petersburg International Conference «Regional Informatics (RI-2020)». Saint Petersburg, October 28-30, 2020. Conference proceedings. Part 1. St. Petersburg: SPOISU, 2020. 393 p.
20. Z. Kunkera, O. Tihomir, N. Hadzic, N. Tosanovic. Using digital twin in a shipbuilding project//Applied Sciences. 2022. Vol. 12. № 24. P. 12721.
21. R. Iwańkiewicz, R. Rutkowski. Digital twin of shipbuilding process in shipyard 4.0//Sustainability. 2023. Vol. 15. № 12. P. 9733.
22. S. Mehdizadeh. A robust method to estimate the largest lyapunov exponent of noisy signals: a revision to the rosenstein's algorithm//Journal of biomechanics. 2019. Vol. 85. P. 84-91.
23. E. G. Vorobyeva. Attractors in chaos theory//The scientific progress is the creativity of the young. 2020. № 1. P. 19-21.
24. X. Wang, N. V. Kuznetsov, G. Chen (ed.). Chaotic systems with multistability and hidden attractors. Vol. 40. Cham: Springer, 2021. P. 149-150.
25. R. H. Rakhimov. Fractals and the structure of the Universe//Computational nanotechnology. 2024. Vol. 11. № 4. P. 190-208.
26. M. Akhmet, M. O. Fen, E. M. Alejaily. Dynamics with chaos and fractals. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
27. Yu. G. Lavrikova, O. N. Buchinskaya, Yu. G. Myslyakova. Theory of haos: expanding the boundaries of economic research//Journal of Economic Theory. 2023. Vol. 20. № 1. P. 79-109.
28. A. Fernández-Díaz. Overview and perspectives of chaos theory and its applications in economics//Mathematics. 2023. Vol. 12. № 1. P. 92.
29. V. A. Novikov. The contribution of En Lorenz to the mathematical «theory of chaos». «The butterfly effects»//Strategic directions for the development of science, education, and technology. Collection of scientific papers based on the materials of the International scientific and practical conference. In 3 parts. Part 1. Belgorod, July 31, 2017. 2017. P. 16-17.
30. L. A. Pautova, A. K. Gutz. The use of chaos theory and strange attractors in the research of individual and social consciousness//MSiM. 2004. № 1 (13).
31. E. V. Sidorova, A. A. Pakhomova, S. Khalas. Innovations in management//Innovations. № 3. P. 34-40.