

Моделирование устойчивого подрывного роста: интеграция Форсайта, событий-джокеров и анализа слабых сигналов

Рафаэль Поппер

Директор¹, Rafael.Popper@futuresdiamond.com; директор по международным связям и практикующий профессор², Rafael.Popper@salle.url.edu; директор³, Rafael.Popper@technologypartners.pl; адъюнкт-профессор⁴, Rafael.Popper@pw.edu.pl; приглашенный профессор⁵, Rafael.Popper@pb.edu.pl; адъюнкт-профессор⁶, Rafael.Popper@utu.fi; Почетный старший преподаватель⁷, Rafael.Popper@manchester.ac.uk

¹ Futures Diamond Ltd, Великобритания, 9 Bold Street, Warrington, WA1 1DN, Manchester, United Kingdom

² Центр инвестиций и инноваций (Centre for Funding and Innovation – CFI-Barcelona), Испания, La Salle – Ramon Llull University, Sant Joan de La Salle, 42 – 08022, Barcelona, Spain

³ Центр Форсайт-исследований и интернационализации (Centre for Foresight and Internationalisation – CFI), Польша, Technology Partners Foundation, Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7A, 02-366 Warsaw, Poland

⁴ Варшавский технологический университет (Warsaw University of Technology), Польша, Plac Politechniki 1, 00-661 Warsaw, Poland

⁵ Белостокский технологический университет (Bialystok University of Technology), Польша, Wiejska 45A, 15-351 Białystok, Poland

⁶ Университет Турку (University of Turku), Финляндия, Rehtorinpellonkatu 3, 20500, Turku, Finland

⁷ Университет Манчестера (University of Manchester), Великобритания, Oxford Rd, M13 9PL, Manchester, United Kingdom

Юли Вильярроэль

Почетный профессор, yulivilla@yahoo.com

Раймунд У. Поппер

Почетный профессор, rwrpopper@yahoo.com

Центральный университет (Central University), Венесуэла, Ciudad Universitaria, 1051, Caracas, Venezuela

Аннотация

В статье предложены инновационные эпистемологические и методологические подходы к анализу нелинейной динамики систем устойчивости с акцентом на адаптивной устойчивости к воздействиям и топологические модели для более глубокого понимания четырех взаимосвязанных систем локальной стабильности. Представлены инновационные показатели для оценки четырех этапов эволюционных изменений и мер стратегического реагирования для анализа адаптивной устойчивости к воздействиям и стабильности. Подчеркивается важность учета событий-джокеров и анализа слабых сигналов в модели подрывного роста, поскольку эти методы позволяют находить новые ответы на внешние шоки.

Выполненный анализ поможет в формировании условий для сохранения локальной стабильности и функциональности перед лицом подрывных событий. Модель устойчивого подрывного роста нацелена на достижение адаптивной устойчивости к воздействиям и локальной стабильности с учетом существующих ограничений. Отмечен ряд аналитических аспектов, связанных с мониторингом и передачей информации в режиме реального времени, что открывает возможности для использования искусственного интеллекта (ИИ), машинного обучения, объяснимого ИИ (ОИИ) (explainable AI, XAI) и важных для рынков труда показателей связанности, упомянутых в цитируемых во введении работах.

Ключевые слова: методы исследования; перспективное планирование; стратегическое планирование; творческое мышление; снижение размерности; сканирование горизонтов; методы Форсайта; подрывная динамика; устойчивость к воздействиям

Цитирование: Popper R., Villaroel Y., Popper R.W. (2025) Towards a Sustainable Disruptive Growth Model: Integrating Foresight, Wild Cards and Weak Signals Analysis. *Foresight and STI Governance*, 19(1), pp. 32–49. DOI: 10.17323/fstig.2025.24753

Towards a Sustainable Disruptive Growth Model: Integrating Foresight, Wild Cards and Weak Signals Analysis

Rafael Popper

Director¹, Rafael.Popper@futuresdiamond.com; International Director & Professor of Practice², Rafael.Popper@salle.url.edu; Director³, Rafael.Popper@technologypartners.pl; Adjunct Professor⁴, Rafael.Popper@pw.edu.pl; Visiting Professor⁵, Rafael.Popper@pb.edu.pl; Adjunct Professor⁶, Rafael.Popper@utu.fi; Honorary Senior Lecturer⁷, Rafael.Popper@manchester.ac.uk

¹ Futures Diamond Ltd, 9 Bold Street, Warrington, WA1 1DN, Manchester, United Kingdom

² Centre for Funding and Innovation (CFI-Barcelona), La Salle - Ramon Llull University, Sant Joan de La Salle, 42 – 08022, Barcelona, Spain

³ Centre for Foresight and Internationalisation (CFI), Technology Partners Foundation, Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7A, 02-366 Warsaw, Poland

⁴ Warsaw University of Technology, Plac Politechniki 1, 00-661 Warsaw, Poland

⁵ Białystok University of Technology, Wiejska 45A, 15-351 Białystok, Poland

⁶ University of Turku, Rehtorinpellonkatu 3, 20500, Turku, Finland

⁷ University of Manchester, Oxford Rd, M13 9PL, Manchester, United Kingdom

Yuli Villarroel

Professor Emerita, yulivilla@yahoo.com

Raimund W. Popper

Professor Emeritus, rwpopper@yahoo.com

Central University of Venezuela, Ciudad Universitaria, 1051, Caracas, Venezuela

Abstract

This paper introduces epistemological and methodological innovations for analyzing non-linear dynamics in sustainability systems, such as deforestation tipping points, exponential renewable adoption, and protests driving global reform. It focuses on adaptive resilience (e.g., decentralized grids stabilizing renewables) and topological models (e.g., network analysis of deforestation or policy diffusion). The study develops metrics to assess four dimensions of evolutionary change – context, people, process, and impact – supporting adaptive resilience and stability. In environmental systems, this may involve tracking early deforestation signals before tipping points, while in economics, it could mean analyzing how small policy shifts trigger market changes. It highlights Wild Cards and Weak Signals Analysis within the Sustainable Disruptive

Growth Model (SD-Growth Model), enabling the early detection of disruptions – such as AI breakthroughs or geopolitical shifts – so systems can anticipate, reorganize, and adapt effectively to shocks.

The research emphasizes constraints as the key to resilience and stability amid disruptions. It integrates advanced analytical approaches to monitoring and managing simultaneous information flows, ensuring efficient responses to shocks. This model also explores AI, machine learning, and explainable AI (XAI) in labor market dynamics, where predictive algorithms can identify trends and mitigate systemic risks. By combining quantitative metrics with strategic foresight, this framework enables decision-makers to preserve stability, sustain functionality, and adapt dynamically to change.

Keywords: research methods; forward planning; strategic planning; creative thinking; dimension reduction; horizontal scanning; foresight methods; disruptive dynamic; resilience

Citation: Popper R., Villarroel Y., Popper R.W. (2025) Towards a Sustainable Disruptive Growth Model: Integrating Foresight, Wild Cards and Weak Signals Analysis. *Foresight and STI Governance*, 19(1), pp. 32–49. DOI: 10.17323/fstg.2025.24753

В стратегии Европейской сети по сбору информации и наблюдению за окружающей средой (European Environment Information and Observation Network) Европейского агентства по окружающей среде (European Environment Agency) до 2030 г. подчеркивается возрастающая роль методологии Форсайта¹. Предложенная модель устойчивого подрывного роста, объединяющая Форсайт с такими факторами глубокой неопределенности, как события-джокеры и слабые сигналы, углубляет понимание устойчивости через четыре взаимосвязанные подсистемы: окружающую среду, людей, процессы и эффект. Подрывная динамика рассматривается в контексте формирования границ зоны равновесия и совместимости метрик по уровням устойчивости. Анализ изменения границ равновесия при обычном и подрывном развитии влияет на траектории производительности и определяет уровни морфологических изменений.

Исследование (Der Kiureghian, Ditlevsen, 2009) выделяет источники и характеристики неопределенности при моделировании риска и надежности. Факторы неопределенности носят эпистемологический характер, если их число можно снизить через сбор дополнительных данных или корректировку модели. При отсутствии такой возможности они классифицируются как случайные.

С прагматической точки зрения полезно классифицировать факторы неопределенности в модели именно таким образом... Эпистемологические факторы могут выявить связь случайных событий; если характер этих факторов смоделирован неправильно, такая связь может оцениваться неадекватно (Der Kiureghian, Ditlevsen, 2009).

Подобный подход позволяет также определить статистическую связь между эпистемологическими факторами неопределенности систем и динамикой их надежности. При работе с объяснимым искусственным интеллектом (ОИИ) учет этих факторов приобретает ключевое значение (Der Kiureghian, Ditlevsen, 2009). ОИИ становится критически важным для понимания и эффективного применения ИИ нового поколения и формирования доверия к нему (Gunning et al., 2019).

Согласно (Marchau et al., 2019), глубокая неопределенность возникает, когда эксперты не располагают достаточной информацией или не могут достичь консенсуса вокруг моделей взаимодействия системных переменных, распределения вероятностей и желательности потенциальных исходов. Наряду с экономической устойчивостью рассматриваются концепция «экологической устойчивости» и этапы ее восстановления (Bang et al., 2021).

Существуют разные подходы к пониманию неопределенности:

...вероятность или случайность в математике, объективный риск в экономике или алеаторная неопределенность в машинном обучении. <...> Разные отправные точки приводят к различным выводам о будущем, что служит

лучшим доказательством ценности новой информации (Osband, 2023).

Модель подрывного роста включает три структуры управления (обычную, подрывную и переходную) для четырех взаимосвязанных систем, функционирующих в четырех топологических режимах (переходном, фиксации, глубинном переходном и глубинном режиме фиксации) и связанных с четырьмя измерениями менеджмента (контекст, люди, процесс, эффект). Топологические режимы раскрывают фазы развития устойчивых систем и процесс достижения локальной стабильности. Стратификация по ограничениям расширяет концепции параллелизма, трансверсальности и концентрации устойчивых процессов. Дифференциальные системы и стратифицированные оси применяются для оценки морфологических изменений и управления зонами риска, способствуя достижению адаптивной топологической устойчивости и ускорению развития на основе контрастных Форсайт-сценариев и выявления робастных связей между траекториями (Yang et al., 2020).

Сравнительный анализ эволюционных и стабильных моделей подрывной динамики опирается на теоретический подход, в частности концепцию «мифа концептуального каркаса» (*myth of the framework*) Карла Поппера, согласно которой теории выступают основой нейтральных наблюдений, свободных от предвзятости и заблуждений (Popper, 1994). Другая его концепция — порядка из хаоса, — состоит в том, что

...случайность или беспорядок не являются типом порядка, который можно объективно описать; их следует интерпретировать как недостаток наших знаний о существующем порядке (Popper, 1992).

Анализ конкретных ситуаций (кейсов) выявил инновационные практики сканирования горизонтов и Форсайт-процессов в Европе и других регионах. Подчеркивается важность разграничения вариантов будущего с учетом контекстуальных условий, особенно когда сканирование горизонтов фокусируется на новых технологиях и подрывных инновациях. Трансформационные изменения происходят через инкрементальные социально-технологические переходы к более устойчивому будущему (Popper, 2023).

Модель подрывного роста анализирует регулярную и подрывную динамику через четыре типа порядка, соответствующих четырем топологическим режимам. Киберфизическая система, определяющая адаптивные и восстановительные способности (Yang et al., 2020), и эпистемологическая неопределенность исследовались с применением концепции топологической устойчивости (Der Kiureghian, Ditlevsen 2009; Osband, 2023). Модель подрывного роста позволила проанализировать стратифицированную версию этих режимов и выявить значимость кластеризации вокруг поведенческой траектории движения к адаптивной топологической устойчивости в открытой системе через определение границ зоны равновесия и концепцию параллелизма.

¹ <https://eea.europa.eu/en/about/who-we-are/eea-eionet-strategy>, дата обращения 06.12.2024.

Отмеченный подход применялся ко всем четырем измерениям структуры менеджмента: контексту, людям, процессу и эффекту.

Методология Форсайта и технологический Форсайт

Методология Форсайта предполагает интенсивные итеративные циклы осмысления, обсуждения и консультаций для формирования образов будущего и разработки согласованных стратегий (Georghiou, 2008). Пять последовательных стадий процесса — определение сферы охвата, подбор экспертов, генерация идей, действия и возобновление — направлены на снижение уровня сложности (Miles, 2013) и создание общего пространства для осмысления будущего и разработки стратегических подходов (Cassingena Harper, 2003).

Оценка практики, результатов и участников формирования образов будущего проводилась с помощью мультикритериального анализа и протоколов на базе критериев устойчивости инновационных процессов. Такой анализ соответствует этапу управления разработкой дорожных карт, где четыре элемента связаны со снижением размерности, а пятый — нейтральный — с изменением ориентации, оцениваемой *in situ* в зависимости от контекста. Эти элементы включают: импульс, Форсайт, ресурсы и мобилизацию (контекст); способности и отношение (люди); катализаторы и стимулы (процесс); трансформацию и устойчивость (эффект) (Popper et al., 2017; Carayannis, Campbell, 2009, 2010; Miles, 2013; Martin 2012).

Технологический Форсайт обеспечивает структуру для системного и конструктивного осмысления возможных вариантов будущего. Его задача не в предсказании предопределенного будущего, а в выявлении и анализе возможных траекторий развития в зависимости от текущих действий и решений.

Методология Форсайта предусматривает подходы, основанные на фактических данных, опыте, знаниях, взаимодействии и творчестве (Popper, 2008). Среди них — сканирование горизонтов с применением методов SMART (Self-Monitoring Analysis and Reporting Technology — технология самоконтроля, анализа и отчетности) и обучения для систематического анализа слабых сигналов и факторов, определяющих развитие событий (Miles et al., 2016; Georghiou, 2008).

В статье применяются методы ромба Форсайта (Popper, 2008) для стратифицированных пространств, топологические (подрывная динамика, дифференциальные системы, множественные контакты высшего порядка, локальная стабильность для устойчивого роста), статистические методы (многомерный факторный анализ) и методы оценки устойчивости (оценка риска, предиктивные метрики устойчивой практики, поддержка экологического, человеческого и экономиче-

ского здоровья и жизнеспособности) в сопоставлении с лингвистическими (лексическая классификация с учетом близких уровней глубины). Структурный анализ опирается на *два подхода*: сравнительные эволюционные модели и анализ кейсов инновационной практики сканирования горизонтов в рамках Форсайта в Европе и других регионах.

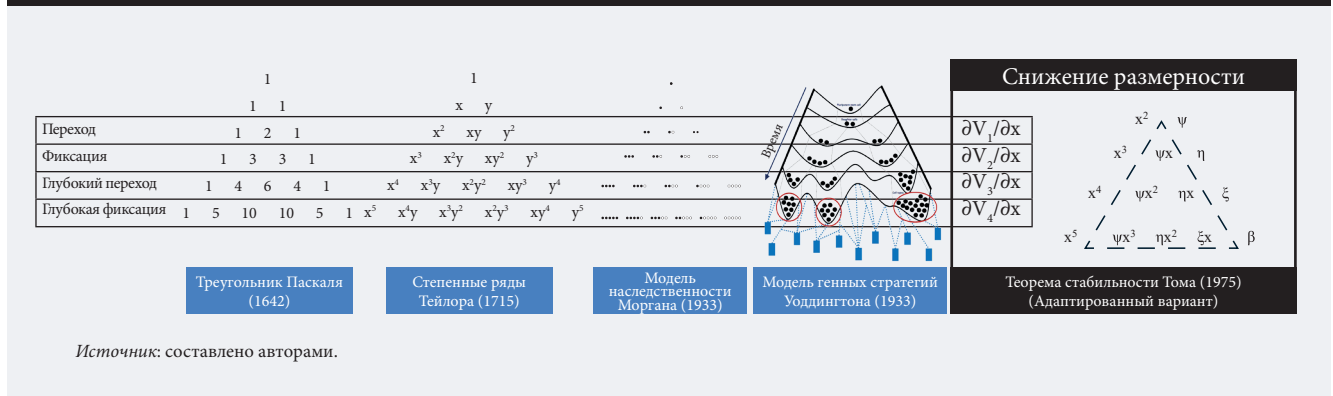
Сравнительные эволюционные модели

Представители различных областей знания проанализировали эволюционные структуры для выявления соответствующих локальных моделей. Среди них: (i) треугольник Паскаля — треугольное расположение чисел, соответствующих коэффициентам n -й степени двучленного выражения; (ii) ряды Тейлора — локальное выражение функций в терминах полиномиального степенного ряда (Bilodeau et al., 2010); (iii) модель наследственности (Morgan, 1935), описывающая роль хромосом; (iv) модель стратегии генов Конрада Уоддингтона (Waddington, 1957), описывающая морфогенетические процессы и динамическое взаимодействие внешней среды с физическими характеристиками организма — эпигенетический ландшафт. Уоддингтон выявил генотипы — эволюционные паттерны поведения, подобные кубическим функциям, меняющие тенденции и ведущие к ассимиляции, и предложил динамическую сеть регулирования активности генов (Gene Regulatory Network, GRN). Теория катастроф дополняет этот ряд эффективными методами снижения размерности для выявления зон равновесия и их границ (Thom, 1975).

Указанные модели структурируют эволюционные изменения на основе бинарного взаимодействия. В треугольнике Паскаля применяются комбинаторные числа в парах (1, 1), в рядах Тейлора — пары (x, y), в модели наследственности Моргана — белые и черные шарики (○, ●). Все пять моделей слева направо представлены на рис. 1. Для удобства сравнительного анализа модели Тома (последнее изображение справа) придан вид, аналогичный четырем предшествующим. Строки отражают скорость изменения функций, определенных первыми четырьмя моделями катастроф (см. Приложение); треугольная зона демонстрирует взаимодействие четырех параметрических факторов — динамику их взаимосвязи в пороговой зоне или зоне риска. Кодиагональное разделение главных компонентов слева отражает снижение размерности; диагональный набор параметрических факторов — независимые оси импульса по главным направлениям. Сравнение моделей выявляет три типа динамики: (i) горизонтальную (характеристики конкурентоспособности); (ii) вертикальную (рост) и (iii) центральную, в которой взаимодействие порождает конкуренцию и риск или гармонию и стабильность (Waddington, 1957; Thom, 1975). Эти модели использовались в ходе недавних исследований².

² Например, количественная структура, основанная на теории оптимального управления и ландшафте Уоддингтона, применялась для комплексного представления биомеханической модели голосового аппарата обезьяны-мармозетки и данных о динамике ее поведения (Teramoto et al., 2017). В работе (Deng, 2016) проанализировано базовое распределение вероятностей (энтропия Дэнна) для его оценки с помощью модели Паскаля и энтропии Шеннона.

Рис. 1. Эволюционные и стабильные модели подрывной динамики



Представленный обзор морфологических моделей и структур управления применяется в статье для изучения устойчивости через анализ событий-джокеров и слабых сигналов.

Анализ кейсов: инновационные практики и топологическая перспектива

В статье рассматривается интеграция в Форсайт топологических и статистических методов и их сочетание с ромбом Форсайта и сканированием горизонтов для определения приоритетов и выявления динамики перемен с учетом существующих ограничений. Акцент сделан на топологическом смысле ограничений и точек разрыва (или «паралича»), а также на выявлении слабых сигналов, указывающих на приближение событий-джокеров на разных этапах процесса в рамках комплексной стратегии управления рисками. Четыре ключевые топологические характеристики и их связь с четырьмя измерениями менеджмента проанализированы по глубине изменений: переходный режим (временное состояние в процессе изменения системы), режимы фиксации (краткие моменты перемен или турбулентности), глубокого перехода (анализ чувствительности к глубинным изменениям) и глубокой фиксации (эффект и сохранение стабильной корреляции между указанными режимами поведения). Переходный режим и его связь с устойчивостью рассматривался в контексте техно-социально-экономической эволюции — иерархии экономических приоритетов, отражающих общественные предпочтения или ценности (Ahamer, 2020). Режим фиксации оценивался через создание стоимости путем адаптации бизнес-модели для достижения устойчивости, начиная со стадии первичного производства, на примере шведской агропродовольственной цепочки поставок (Dehghannejad, 2021).

Структура iKnow для анализа рисков

Структура знаний iKnow³ создана для выявления взаимосвязи знаний (включая исследования и разработки, ИиР), определяющих будущее науки, технологий и инноваций в Европе и мире, но часто остающихся вне

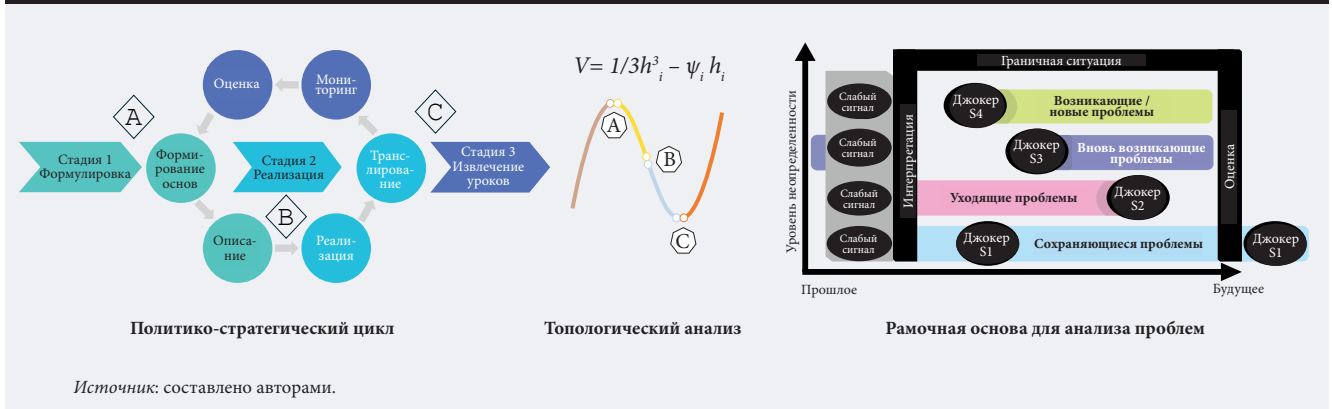
поля зрения политиков. Джокерами называют события, способные радикально изменить будущее, слабыми сигналами — неоднозначные признаки («семена») потенциально важных изменений, включая события-джокеры, новые вызовы и возможности. SMART-Форсайт — системный, партисипативный, ориентированный на разработку политики процесс, который (в сочетании со сканированием горизонтов/среды) нацелен на вовлечение широкого круга стейкхолдеров в совместное исследование, разработку и формирование технологического, экономического, экологического, политического, социального и этического (technological, economic, environmental, political, social and ethical — TEEPSE) будущего. Форсайт встраивается в процесс принятия решений в рамках пяти стадий: определение сферы охвата исследования, мобилизация ресурсов, прогнозирование, подготовка рекомендаций и преобразование. За ними следует цикл разработки политики и стратегий.

На рис. 2 в Форсайт интегрирован анализ джокеров и слабых сигналов с учетом топологической устойчивости (на основе способности к адаптации и восстановлению) (Yang et al., 2020). Три точки — А, В и С — обозначают ключевые моменты Форсайта и точки равновесия, связанные с потенциальной топологической функцией.

Левая часть рис. 2 иллюстрирует политико-стратегический цикл интеграции Форсайта в процесс принятия решений в три этапа: 1) формулировка (разработка и описание политики и стратегии); 2) реализация и распространение политики и стратегии; 3) извлечение уроков. Центральная часть изображает стратифицированную поведенческую функцию с четырьмя типами динамики на примере производственной линии с двумя основными компонентами: процессом производства до максимально возможного объема (А) и началом распределения с минимального значения (С). Две промежуточные траектории связаны с эффективным управлением (переход к функции управления в точке перегиба кривой для получения продукции). Топологическое преимущество метода равновесной декомпозиции состоит в том, что извлечение нерегулярных точек дает четыре функции с собственной (регулярной) динамикой. Процесс управления осуществ-

³ <https://cordis.europa.eu/project/id/225695>, дата обращения 17.07.2024.

Рис. 2. Связь структуры для анализа слабых сигналов с подрывной динамикой



ляется через выявление узлов вблизи контрольных точек установления устойчивой связи. Кривые на рис. 2 получены с помощью удовлетворяющих необходимым условиям стабильных моделей. В правой части представлена аналитическая структура iKnow, позволяющая эффективнее воспринимать слабые сигналы и события-джокеры и реагировать на них (Ravetz et al., 2011; Popper et al., 2011).

Структура iKnow применялась в методологии «Ландшафт угроз кибербезопасности» (Cybersecurity’s Threat Landscape, CTL). На основе трех категорий таких угроз они разделены по глубине на горизонтальные, тематические и секторальные. Такая классификация помогает в принятии стратегических решений и управлении рисками, прежде всего связанными с угрозами новых технологий, включая ИИ (Ntalampiran et al., 2023; Lu et al., 2013).

Структура CASI для устойчивой инновационной деятельности

Общая структура для оценки и управления устойчивой инновационной деятельностью⁴ (Common Framework for Assessment and Management of Sustainable Innovation, CASI) представляет собой прикладную систему создания устойчивых инноваций, применяющуюся в таких проектах, как BOLERO и CfWI, в которых через корреспондентскую сеть участвовали 19 партнеров из 12 стран – членов ЕС. В части «а» рис. 3 представлена схема CASI, в части «б» — схема сетевого анализа планов ИиР и создания устойчивых инноваций. Проанализированы 1852 цели четверной спирали устойчивой инновационной деятельности и 10 программ ИиР (Popper et al., 2017).

Представленная структура насчитывает пять этапов: три этапа оценки и два этапа управления. Она позволяет выявлять ключевые технологии и тенденции методами сканирования горизонтов и ромба Форсайта. Пятый этап включает все четыре измерения менеджмента (контекст, людей, процесс и эффект). Углубленный анализ охватывает кратко-, средне- и долгосрочный периоды (Popper et al., 2020).

В статье сопоставлены четыре фазы трансформации управленческих структур и их ограничения с четырьмя локально стабильными топологическими моделями для выявления сходства с топологическими ограничениями, связанными с равновесием по глубине. Проанализировано влияние на Форсайт в сфере науки, технологий и инноваций с акцентом на тенденциях и непредвиденных событиях. Подчеркивается значимость глубокого осмысления и осторожного подхода к будущим вызовам.

Четыре свойства: структура управления и топологические режимы

1. *Изначально присущее свойство* позволяет оценивать важность и эффект динамики переходного контекста, влияющей на все этапы процесса при смене состояний. Это демонстрируют предупреждения системы iKnow (iKnow Alert), касающиеся безопасности нанотехнологий для человека и экологической устойчивости консервации коралловых рифов (Bang et al., 2021).

2. *Эволюционное свойство* обеспечивает фиксацию топологического режима, когда стабильные аттракторы соединяют два состояния на общей границе. Связано с чувствительностью структуры из морфологических конструкций, чьи комбинаторные свойства определяются внутренним устройством. Пример: предупреждение A39 системы iKnow, касающееся применения нанотехнологий в роботах для ухода за пожилыми людьми и показывающее переход от создания к конкуренции. Контрастные сценарии сопоставляют режимы поведения со смирением, адаптивностью и настойчивостью.

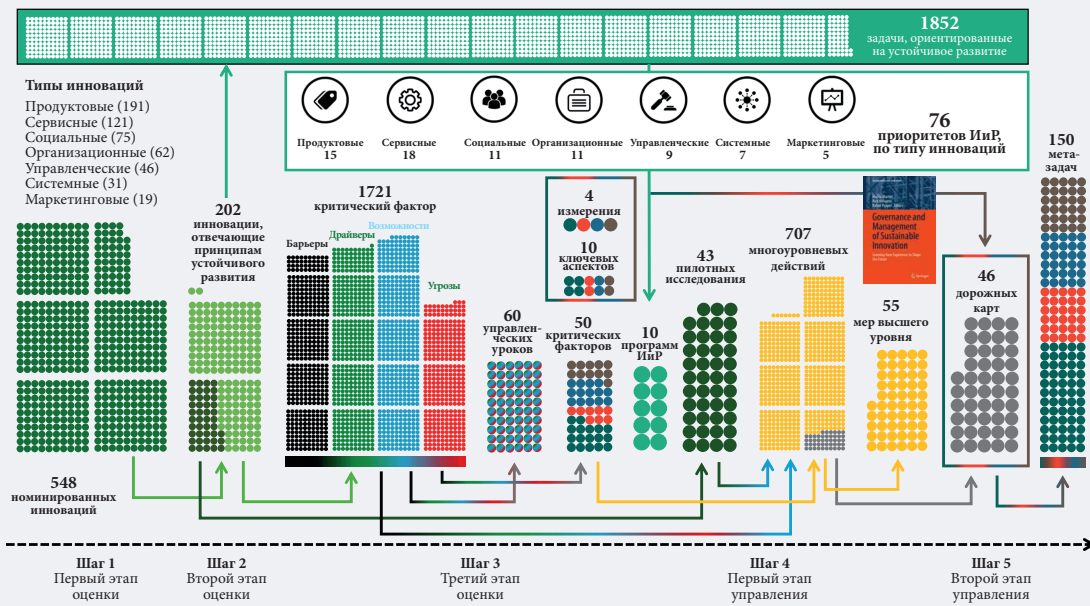
3. *Преобразующее свойство* определяется динамикой глубоких переходных режимов и задает тип воздействия и развития, способный привести к неожиданным эффектам. Пример: предупреждение A06 системы iKnow о безопасности продуктов питания.

4. *Свойство долговременного эффекта* обеспечивает устойчивое воздействие в чувствительные периоды с глубокой динамикой фиксации-выброса. Пример: предупреждение Alert1 системы iKnow о глобальном распространении вируса-убийцы, демонстрирующее

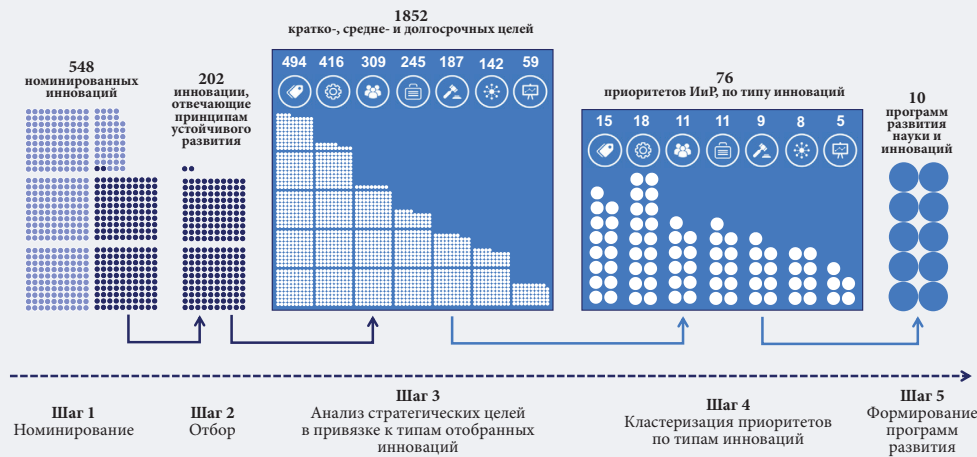
⁴ <https://cordis.europa.eu/project/id/612113/reporting>, дата обращения 21.09.2024.

Рис. 3. Структура CASI-F и сетевой анализ

а) Структура CASI-F для оценки и управления устойчивой инновационной деятельностью



б) Сетевой анализ планов научных исследований и инновационной деятельности в области устойчивого развития



Источник: составлено авторами.

глубинную динамику фиксации во всех экологических системах — сосуществование в характерные для конкретной среды периоды (Hastings, 2004).

Резюме

Анализ специфической динамики эволюционного процесса — важный аспект управления неопределенностью. Интеграция событий-джокеров и анализа слабых сигналов в Форсайт позволяет учитывать источники, характер и особенности динамики неопределенности при моделировании управления рисками и надежностью на основе уточненных категорий неопределенности. Это открывает пути к достижению локально устойчивого подрывного роста.

В разделе описаны четыре уровня роста с соответствующей динамикой топологического режима: пере-

ходный режим, режим фиксации, глубокий переходный режим и режим глубокой фиксации. Представлены три типологии динамики: регулярная, подрывная и граничная. Выявлена пороговая зона, разделяющая уровень роста с подрывной динамикой на макро- и микродинамику в зависимости от локализации перехода — внутри пороговой зоны или вне ее. Граничная динамика основана на данных об изменениях.

Снижение размерности

В статье представлены инновационные эпистемологические и методологические подходы к анализу нелинейной динамики в устойчивых системах, с акцентом на адаптивной устойчивости и применении топологических моделей для углубленного понимания четырех взаимосвязанных систем локальной стабильности.

Предложены инновационные метрики для четырех стадий эволюционных перемен и стратегические подходы к анализу адаптивной устойчивости и стабильности, прежде всего учет событий-джокеров и слабых сигналов в модели устойчивого подрывного роста.

Представленный анализ поможет сформировать условия для сохранения локальной стабильности и функциональности при радикальных переменных на основе модели устойчивого подрывного роста с учетом ограничений адаптивной устойчивости и локальной стабильности. Рассмотрены аналитические подходы, связанные с мониторингом и оперативной передачей информации, которые открывают возможности для использования ИИ, ОИИ и машинного обучения и влияют на рынки труда и показатели связанности, упомянутые в цитируемых во введении статьях как часть обоснования применения модели устойчивого подрывного роста.

Обеспечение точности и сохранение необходимой информации в междисциплинарных сферах приложения

Снижение размерности обеспечивает высокую точность и сохранение важной информации в междисциплинарных сферах приложения модели. Реализация этой концепции позволяет выявить связь между разными интересами и потребностями в различных областях знаний.

В *теории коммуникаций* снижение размерности применяется для управления шумовым эффектом. Норберт Винер рассматривал присущий любому процессу передачи шум как важный аспект, охватывающий все направления (Wiener, 1948). Особое внимание уделялось проблеме энтропии — тенденции систем к деградации, дисперсии и хаосу (Shannon, Weaver, 1949). В исследовании (Deng, 2016) на основе энтропии Шеннона предложены энтропия Дэна и треугольник Паскаля для оценки неопределенности базового распределения вероятностей. Квантовые вычисления открывают возможности для междисциплинарного подхода, объединяющего аспекты компьютерных наук, физики и математики, — нового способа обработки информации на основе законов квантовой физики.

В *статистике* снижение размерности обеспечивает высокую точность обработки многомерных данных при сохранении важной информации за счет объяснимости ее компонентов (например, применение факторного анализа для определения удельной дисперсии) (Pearson, 2022; Spearman, 1904; Johnson, Wichern, 2014).

В *топологии* снижение размерности означает сокращение до минимума числа измерений при анализе сложности. Применение канонических моделей (в общем виде) позволяет выявить основные направления для лучшего понимания целостной картины. В работе (Yang et al., 2020) предложена концепция топологической устойчивости к воздействиям, основанная на способности к адаптации и восстановлению.

При рассмотрении позиций и менталитета стейкхолдеров в полевых исследованиях применяются *критический анализ дискурса* и *экспериментальные исследования* в сочетании с ромбом Форсайта и снижением

размерности. Такой подход позволяет сохранить баланс на всех уровнях благодаря участию заинтересованных сторон в дискуссионных группах для консультирования в ходе Форсайта (Velasco, 2017).

В *лингвистике* снижение размерности служит для классификации по глубине с выделением лексических, семантических, структурно-морфологических и композиционных эффектов (Pinker, 2007; Huang, Pinker, 2010).

Представленные комментарии раскрывают значимость экономического, топологического, статистического и морфологического анализа для понимания сложных эволюционных структур, связанных с изменениями устойчивого поведения.

К модели устойчивого подрывного роста

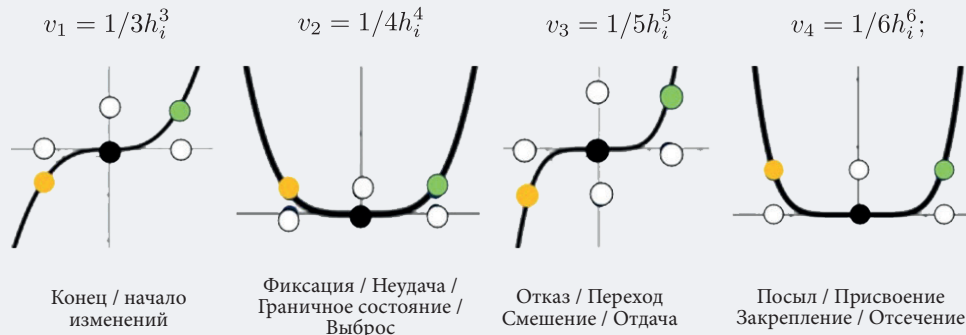
Структура измерений менеджмента на каждом этапе применения системы WI-WE (анализа слабых сигналов и событий-джокеров) включает оценку четырех аспектов: стратифицированной динамики, конвергенции поведения, стабильности равновесия и устойчивого подрывного роста. Топологические режимы основаны на репрезентативных моделях, выявляющих связь между неожиданными событиями (визуализированными как ограничения) и уровнями абстрагирования (отражающими степень чувствительности). Это касается четырех указанных топологических режимов поведения: переходного, фиксации, глубокого переходного и глубокой фиксации, представленных графиками функций со степенями сингулярности, выраженной через скорость изменения.

В статье представлена стратифицированная версия топологических режимов, где послойная визуализация позволяет представить каждый одномерный слой (на графике топологических режимов) как решение одномерной регулярной динамической системы и разложить сингулярную, структурно устойчивую динамическую систему на две регулярные с уникальными и полными решениями в каждой точке. Дифференциальные системы теории коммуникаций помогают проанализировать условия для формирования прочных связей между устойчивыми решениями, стремящимися к общей точке замыкания. Это проявляется в графиках переходных топологических режимов и их канонической среде. Выявлены робастные связи между решениями на основе регулярных систем, стремящихся к общей точке замыкания.

Переходный режим представляет собой форму перехода от одного слоя к другому, где уровни изменения (1-й, 2-й и 3-й) демонстрируют общую тенденцию движения к точке замыкания влево и вправо. Кривая меняет вогнутость, сохраняя скорость, радиус и последовательность изменений. Слева динамику характеризует нисходящая вогнутость, справа (ожидания будущего) — восходящая.

На рис. 4 показано стратифицированное представление топологических режимов через графики аналитического выражения v_k и скорости изменения s_k , где k принимает значения от 1 до 4.

Рис. 4. Графики топологических режимов и динамики в соседних зонах



Источник: составлено авторами.

$$v_1 = 1/3h_i^3, v_2 = 1/4h_i^4, v_3 = 1/5h_i^5, v_4 = 1/6h_i^6;$$

$$s_1 = h_i^2, s_2 = h_i^3, s_3 = h_i^4, s_4 = h_i^5.$$

Эти топологические режимы поведения важны для анализа чувствительности и устойчивости. На кривых одномерных слоев размещены желтые и зеленые точки, показывающие сопряжения между ними и близость к нулевому слою. По этим точкам сопряжения можно оценить изменение динамики поведения при приближении к нулевому слою. На каждом графике для каждого топологического режима отражены две регулярные кривые (одномерные слои) и одна точка (нулевой слой, точка замыкания). Две белые точки (точки сопряжения) около нулевых слоев предоставляют точную информацию о подрывной динамике в верхней части (динамическое поведение вблизи нулевого слоя).

Точки сопряжения важны, поскольку в них можно вычислить i -ю наклонную функцию, определяемую как i -я скорость изменения функции. Совпадение их левых и правых пределов при стремлении к точке замыкания позволяет выявить робастную связь в данной точке. Глубокий переходный режим демонстрирует большую чувствительность, так как скорость изменений в нуле компенсируется до четвертого порядка и только в пятом порядке отлична от нуля.

В Приложении приведена подробная информация о стратифицированной оси ψ_i и оси контекстного измерения.

Контекстное измерение включает такие аспекты, как «импульс», «Форсайт», «ресурсы» и «мобилизация», критические важные для инновационной деятельности и стратегического планирования. Параметрическое семейство $\mathcal{V}_1 \subset h_i \in \mathbb{R}^*$, представлено \mathcal{V}_1 . При положительном значении данного параметра скорость изменения топологического переходного режима сопряжена с конкретной дисперсией. Это сопряжение показывает, что скорость изменения в репрезентативном режиме отражает конкретные вариации — принципиально важный факт для понимания подрывной динамики устойчивых систем. Аналитическое соотношение между удельной дисперсией и переходным топологическим режимом представлено в Приложении.

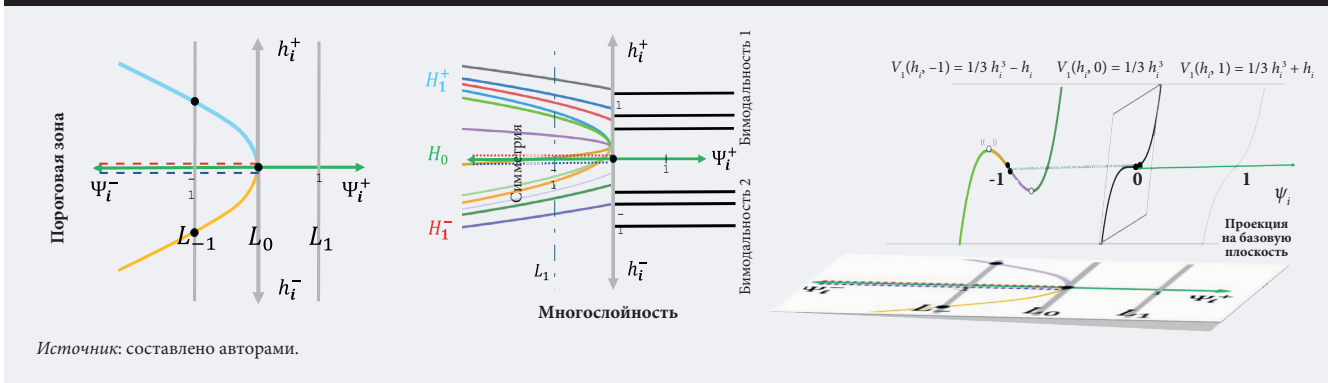
Сингулярное множество (Sv_1), стратифицирующее переходный режим поведения, имеет окрестность, близкую к пороговой зоне, что позволяет ввести концепции параллелизма, трансверсальности и концентрации, включая переходы внутри пороговой зоны. В этой зоне режимы поведения сжимаются и отражаются, тогда как за ее пределами — расширяются и отражаются. Такой дуализм демонстрирует влияние ограничений на стабильность и эволюцию сложных систем, что служит основой для их анализа и управления ими в контексте устойчивого поведения.

Зона риска, ограниченная сингулярными точками, включает область критических изменений поведения. Трансверсальный переход через эту зону обуславливает различные типы поведения, что позволяет выявлять потенциальные риски и типичные виды подрывного поведения внутри системы и управлять ими. На рис. 5 слева показана пороговая зона, описанная двумя графиками $G(\gamma_i^\pm)$ с симметричными кривыми γ_p , которые определяются сингулярной точкой $(0, 0)$ на отрицательной оси ψ_p и ограниченная ими область с точками равновесия и бифуркации (подробнее см. Приложение).

Существуют три типа трансверсальности: регулярная (R), подрывная (D) и граничная (B). Они характеризуются трансверсальными линиями, пересекающими ось ψ_i в трех точках $L_i(R)$, $L_{-i}(D)$, $L0(B)$: регулярная ($\psi = 1$) представлена трансверсальными линиями на положительной оси, подрывная ($\psi_i = -1$) — на отрицательной оси, и граничная ($\psi_i = 0$).

Средняя часть рис. 5 иллюстрирует концепции параллелизма, концентрации и многослойности (подробнее см. Приложение). В правой части рис. 5 показан подъем параллельных линий, пересекающих отрицательную ось ψ_i (подрывная динамика). Свойства точек замыкания поведенческих траекторий описаны тремя характеристиками: максимальное значение или неустойчивый аттрактор (импульс), минимальное значение или стабильный аттрактор (Форсайт) и точка изменения (ресурсы и мобилизация). Это иллюстрируется через углубленный анализ конкретных ситуаций, показывающий, как поведенческие траектории с устойчивыми сопряжениями стремятся к общей точке. Данная

Рис. 5. Переходный режим и стратификация по равновесию



концепция подчеркивает важность координат контактных точек более высокого порядка в обеспечении или отторжении сопряжений между поведенческими динамиками.

Процесс состоит из пяти операций: i) симметрия: вход/выход относительно равновесия; вход/выход относительно параметрической нейтральной оси (ψ), измеряющей поведение, соотношенное с дисперсией (квадрат расстояния до среднего значения, регулируется); ii) расширение и симметрия в направлении от зоны равновесия; iii) сжатие и симметрия в направлении пороговой зоны (трансформация); iv) робастные сопряжения, облегчающие переход; v) устойчивые траектории, привязанные к квадратичной скорости изменения.

Модель устойчивого подрывного роста предполагает формирование эволюционных кластеров, охватывающих траекторию поведения или ее часть, для визуализации потенциальных итоговых сопряжений.

В работе (Laurett et al., 2021) представлены результаты поискового факторного анализа, проведенного для оценки влияния локального контекста Бразилии на восприятие устойчивого развития, выявления переменных и факторов роста органического сельского хозяйства и перспектив достижения устойчивости. Двумя главными препятствиями для устойчивого развития сельского хозяйства выступают отсутствие информации и знаний, а также недостаток планирования и поддержки.

Сферы приложения

Управление контекстом и связью стратифицированного переходного режима

Энергетика. Стратифицированный переходный режим имеет естественное условие, сопряженное с контекстным измерением, особенно в процессе генерации эоловой энергии. Потенциальная функция в исследованиях энергетики описывает среднее изменение энергии с течением времени как ($P = E/t$); масса воздуха в цилиндре с плотностью ρ , проходящая через цилиндр с радиусом R , высотой h , со скоростью ветра v_w и кинетической энергией ветра, проходящего перпендикулярно через вертикальный диск, дает среднюю мощность $P = 1/2 \rho \pi R^2 v_w^3$. В контексте ветровой энергетики эта структура, независимо от физического масштаба изменения, охватывает также интегральные процессы для

изучения диффузии, проводимости и передачи энергии в сетях, что определяет важность уточнения «диаметра эффективности» для крупнейших кластеров генерации в фрагментированных сетях (Aliprantis, 2011).

Среднюю мощность можно определить в терминах переходного режима; например, при рассмотрении локальной (контекст i) переменной состояния, определяемой скоростью относительно плотности массы, обозначенной как $vrel_p$, переходная модель $V_1(vrel_p) = 1/3 v^3 rel_p$ дает среднюю локальную мощность $V_1(vrel_p, \psi_i)$. Для адреса ψ_i определяем функцию в плоскости переменных-факторов без учета сингулярных точек (см. Приложение, табл. A1). Траектории поведения в точке замыкания объединяются условием топологической устойчивости (верифицированной стратифицированной стабильной канонической топологической моделью). Модель учитывает информацию об обычных и рискованных зонах, максимальном значении стратифицированной траектории поведения, ϵ -окрестности для анализа изменений, параллелизме, трансверсальности, концентрации и кластерах.

Определение сферы охвата Форсайта. Форсайт состоит из семи последовательных этапов: определение целей и задач, обоснование и описание исходной ситуации, контекст и предметная сфера охвата, временные горизонты, территориальный охват, методология и план работы, финансирование и продолжительность. Выделяются три критические топологические точки: максимальное значение (A), точка перегиба (B) и минимальное значение (C) (см. рис. 2, события-джокеры). Эти точки представляют различную динамику изменений: (A) — нестабильный аттрактор, (B) — меняющийся тип действия, (C) — стабильный аттрактор. Понимание этих точек способствует эффективному управлению переходами в сложных системах.

Схема коммуникаций. Максимальная траектория поведения обеспечивает идеальный носитель и динамику передачи сигнала от отправителя к получателю (подъем стратифицированной линии L1, рис. 5, правая часть). В терминах системной схемы коммуникаций, определенной в плоскости переменных/факторов без сингулярных точек, модель содержит четыре одномерных слоя: два внешних (источник/получатель, соединитель/отправитель), сопряженных с обменом сообщениями (источник/цель), и два внутренних, сопряженных

с операционными системами. Условие топологической устойчивости к воздействиям функций преобразует левые слои (сингулярные точки) в стабильные каналы связи.

III. Уровни аналитической точности в канонической непрерывной стратифицированной модели подходят для робототехники и ИИ, допуская кластеризацию типов поведения в непрерывном случае. Для дискретного случая определяются соответствующие вероятностные меры, различающие четыре типа поведения: сжатие и растяжение, как в отрицательных, так и в положительных компонентах.

Квантовые вычисления. Переходный режим естественным образом включает в задачи менеджмента параллелизм и одновременное выполнение задач. Параллелизм представляет собой разделение обязанностей на более мелкие подзадачи для повышения эффективности; одновременное выполнение предполагает совместную работу над несколькими задачами. Такой подход продуктивен в случае сложных процессов, например, реализации системы мер по снижению выбросов парниковых газов, когда требуется параллельное выполнение ряда действий в разных контекстах.

Представленный обзор топологических ограничений и переходных режимов отражает их влияние на структуры управления и динамическое поведение сложных систем, которое следует учитывать при корректировке устойчивого поведения.

На микроуровне модель устойчивого подрывного роста изучает возникновение подрывных процессов в пороговых или рискованных зонах, где траектории поведения демонстрируют волнообразную динамику с различными амплитудами в зависимости от своей глубины. На макроуровне поведение вне пороговой зоны остается регулярным. В стратегическом плане модель устойчивого подрывного роста подчеркивает важность определения множеств равновесия и топологических ограничений и служит методологическим руководством по углубленному анализу фаз смены поведения. Узловые моменты поведенческих траекторий, сходящихся в общей точке замыкания, обладают топологической устойчивостью при сохранении взаимосвязи между кривыми изменения характеристик или контактных координат высшего порядка в процессе развития, что обеспечивает сопряжение поведенческой динамики.

Для модели устойчивого подрывного роста важен контекст — локальная среда. Типология таких контекстов обеспечила бы кооперативное сопряжение в рамках категории или проекта на метрической оси, позволяющее выявить связь между морфологическими изменениями и робастными кластерами.

Управление человеческим измерением и режим фиксации

Управление человеческим измерением охватывает такие аспекты, как способности (имеющиеся навыки) в инновационной сфере и отношение к ней (поведение и мотивация). Эти факторы играют важную роль в Форсайте, особенно на этапе мобилизации ресурсов, в том числе переговоры по контрактам и привлечение

участников целевых групп; они способствуют достижению равновесия для стабилизации сотрудничества и сетевого взаимодействия.

Мобилизация представляет собой второй этап Форсайта. Она включает определение ключевых топологических моментов: двух конкурирующих минимальных точек (mP): способностей как mP-аттрактора и отношения как одновременного MP-аттрактора, а также нейтральной точки (NP) на этапе определения сферы охвата для стабилизации сотрудничества и сетевого взаимодействия. Два указанных конкурирующих аттрактора служат центрами равновесия; переход с одного уровня на другой определяет возможное положение этих ключевых моментов, связанных двумя фундаментальными аспектами — финансированием и мобилизацией ресурсов. В результате сотрудничество и сетевое взаимодействие могут достичь равновесия.

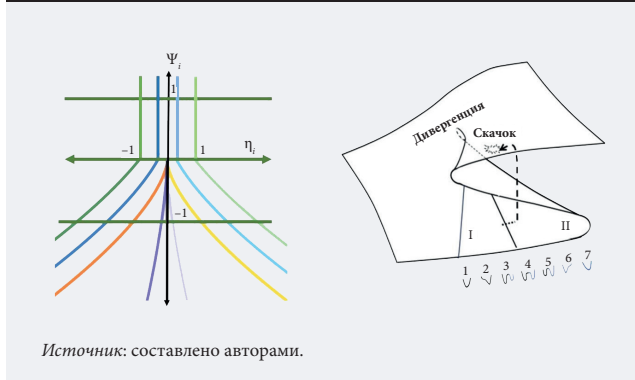
Топологический режим фиксации, представленный на рис. 6 (вторая функция; см. Приложение, табл. А1), относится к параметрическому семейству поведенческих функций и определяется двумя факторами. Правая часть рисунка демонстрирует его сложность и ограничения на основе анализа равновесия. Левая часть разделена на две зоны: неподрывное (линия L_1) и подрывное поведение (линия L_{-1} , пересекающая кривую перегиба); линия L_0 показывает границу между двумя типами поведения.

Анализ равновесия (аналогичный анализу измерения управления контекстом) позволяет определить множество сингулярных точек, расположенных в виде кривой перегиба с точкой бифуркации в нуле. Поперечный фактор η_i вводит новую метрику, показывающую, как траектории поведения могут сохранять гармоничный параллелизм оси ψ , остающейся бимодальной после пересечения оси η_i . Эта бимодальность демонстрирует влияние ограничений (перегиба кривой как границы «пороговой зоны» или зоны риска) на устойчивость и эволюцию сложных систем с возникающим в пороговой зоне параллелизмом.

На рис. 6 справа показан подъем бимодальной плоскости; в нижней части видны семь волн, представляющих стратегический цикл, который позволяет пересекать зону по гибкой траектории и отслеживать слабые сигналы поведенческой функции, как в кейсе 2. В ходе такого цикла два поведенческих аттрактора (1) и (7) постепенно переходят от одного режима к другому. При минимальном значении функции V_2 система достигает стабильности (4); вблизи этой точки скачок в верхний слой (и последующее движение вправо) может благоприятствовать инновационной деятельности. Возможен также катастрофический шок (возвращение влево и начало нового цикла: падение вниз и последующий скачок вверх).

Естественный скачок вверх происходит на седьмом шаге, демонстрируя важность выявления близости к множествам равновесия, анализа параллелизма, концентрации, визуализации траектории с робастными связями и анализа риска. В исследовании (Barunik, Vosvrda, 2009) репрезентативный топологический режим фиксации был адаптирован для объяснения паде-

Рис. 6. Топологический режим фиксации. Стратификация и точки выбросов



Источник: составлено авторами.

ния рыночных индексов на основе данных фондовых рынков США.

Динамика равновесия человеческого измерения связана со стабильными точками-аттракторами и переходами между различными режимами поведения. Архетип «скачок вверх — фиксация» (рис. 6) создает условия для подрывных инноваций, уравнивая способность (знания и научные исследования) и отношение (опыт и традиции). Усиление глубины морфологических изменений стимулируется кластеризацией и сотрудничеством в плоскости «контекст — люди» с параметрическими координатами (ψ, η) (Masini, Vasquez, 2000). Эта группировка согласуется со спектром состояний знания (определенность — риск — неопределенность — неоднозначность) через кооперативное поведение, возникающее в точке бифуркации $(0, 0)$; кооперативный кластер с определенными свойствами и динамикой риска (Vasquez, Ortegyn, 2006).

Измерение процесса и глубокий переходный режим

Измерение процесса включает два ключевых аспекта: «катализаторы», способствующие инициированию создания, дальнейшему совершенствованию и внедрению инноваций, и «стимуляторы», охватывающие факторы последующей консолидации и распространения инноваций. Функция V_3 задает каноническую окрестность глубокого переходного режима, а скорость ее изменения — каноническую окрестность функции наклона $s_3(h_i)$, сопряженной с четвертым статистическим мо-

ментом. Она определяет скорость изменения инновационных процессов (с коэффициентом смещения ξ_i) и содержит параметрическое семейство с тремя осями, что вводит новый параметр ξ_i , стимулирующий рост в зоне равновесия.

На рис. 7 представлено равновесное соотношение между тремя параметрическими осями. В центре расположен криволинейный многоугольник, скользящий вдоль оси ψ_i . Он демонстрирует двойную динамику (два типа поведения): регулярную при ψ_i больше нуля, представленную $\psi_i = 1$, и нерегулярную, представленную $\psi_i = -1$. В последнем случае наблюдается поведение криволинейного треугольника с двумя симметричными острями, которые формируют стратифицированную поверхность, сжимающуюся при приближении к нулевой точке. Левое изображение показывает влияние фактора смещения (ξ_i) на острья, отмечающее изменение поведения.

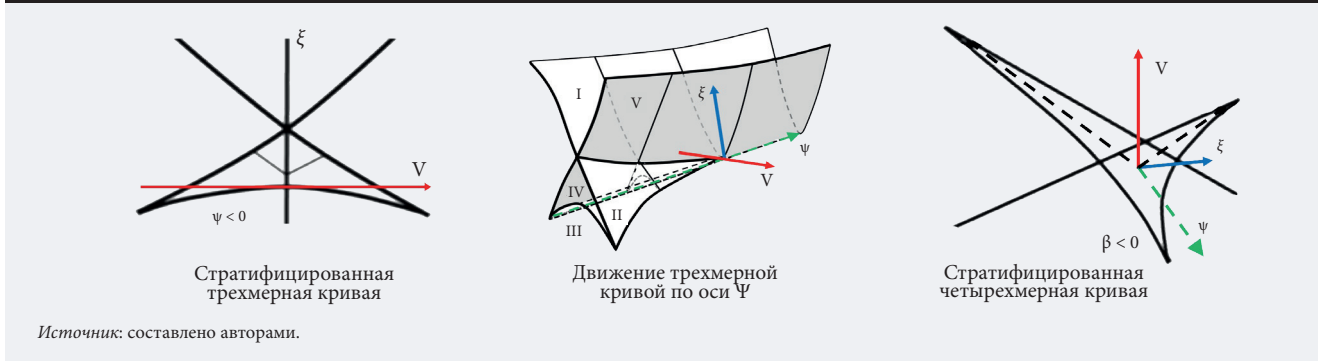
Кейс — популяция тли: этот случай иллюстрирует необходимость мониторинга зон равновесия в динамических системах. В работе (Wu et al., 2014) проанализирована ситуация сосуществования параметров в их зонах равновесия. Пусть h_i представляет плотность популяции тли в конкретном i -том регионе; параметр ψ_i измеряет фактор контроля среды; η_i — состояние урожая (емкость популяции), а фактор хищников измеряется параметром ξ_i . Развернутая функция служит репрезентативным описанием поведения переменной состояния h_i в контролируемых условиях, что влияет на морфологические изменения (Wu et al., 2014).

Режим фиксации и высокоточный мониторинг

В основе измерения эффекта, сопряженного с топологическим режимом глубокого захвата, лежит «трансформация», отражающая позитивные изменения в четверной спирали науки, бизнеса, государства и общества. Она охватывает прогресс в создании знаний в социально-технологических системах. «Устойчивость» в данном контексте означает позитивные экологические, социально-экономические, государственные и инфраструктурные преобразования.

Функция V_4 задает каноническую окрестность режима глубокой фиксации, а скорость ее изменения — каноническую окрестность функции наклона $s_4(h_i)$, сопряженной с пятым статистическим моментом. Она

Рис. 7. Режимы глубокого перехода и фиксации и их динамика



Источник: составлено авторами.

определяет скорость изменения согласованных и воздействующих процессов, включая дополнительную ось с новой степенью свободы — «фактором бабочки» (β_i), и параметрическое семейство с четырьмя осями для обеспечения стабильности в зоне равновесия. Режим глубокой фиксации демонстрирует равновесное множество, связанное со взаимодействием четырех параметров. Максимальная траектория поведения при $\beta_i < 0$, проходящая трансверсально к оси ψ_i , служит границей продвижения ударной волны и в семантической интерпретации известна как карманная организация.

Кейс-анализ рисков и политические рекомендации: в работе (Zhu et al., 2023) топологический режим фиксации теории катастроф применен для анализа движущих механизмов китайской циркониевой промышленности в 2005–2021 гг. Выявлено состояние «раннего предупреждения» в сфере безопасности отрасли, на которое существенно влияют политическая турбулентность и технологическое развитие. Предложен ряд политических рекомендаций по повышению общей устойчивости отрасли (Zhu et al., 2023).

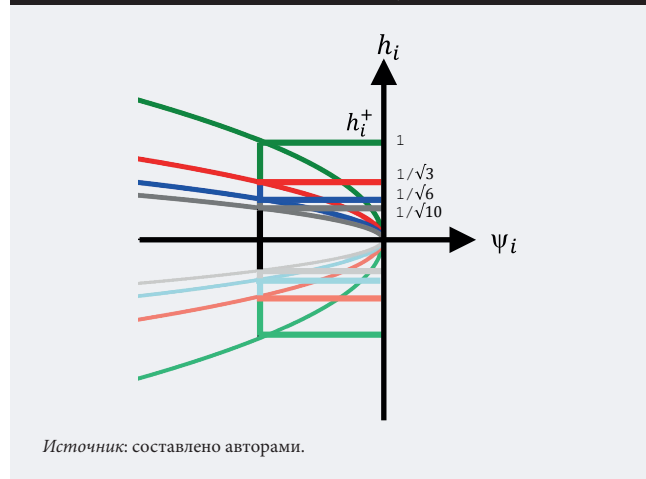
Энергетика — ключевой элемент устойчивого подрывного роста

Модель визуализирует контекст через энергетические уровни и их влияние на локальную среду как потенциальный фактор формирования энергетического кластера. Четыре измерения менеджмента — контекст, люди, процесс и эффект — связаны с четырьмя каноническими топологическими режимами, чья поведенческая динамика изначально соотносится с конкретным контекстом i и переменной плотности, сопряженной с энергией массы этого контекста.

В первом разделе связь рассматривалась на примере ветровой энергетики, как масса воздуха в цилиндре при средней скорости. В работе (Cherp, Jewell, 2014) сформулированы «четыре А энергетической безопасности» — наличие, доступность, доступная стоимость и приемлемость (availability, accessibility, affordability, acceptability) — на базе концепции энергетической безопасности и связи жизненно важных энергетических систем с ключевыми социальными функциями. Под уязвимостью понимается сочетание подверженности риску и устойчивости к воздействиям. В работе (Americo et al., 2023) оцениваются чистые технологии (преимущественно ветровая и солнечная генерация и электромобили), а также вызовы и возможности энергетического перехода для производителей ископаемого топлива, металлов и минералов в кратко- и долгосрочной перспективе.

На рис. 8 показана сильная взаимозависимость четырех измерений менеджмента, позволяющая прогнозировать свойства для формирования специфических связей. Стратификация отражает связь между стабильностью и динамикой при вариативности параметров по глубине, выявляя не только точки равновесия, но и четыре зоны изменения энергии с особыми границами и частично перекрывающимися границами. Плотная кластеризация поведения формирует траекторию развития и разделения труда (параллелизм, кооперация и концентрация). Четыре структурно устойчивые моде-

Рис. 8. Плоскость (h_i, ψ_i) , стратифицированная по глубине изменений



Источник: составлено авторами.

ли поведения (рис. 8) пересекают ось $\psi = -1$ снаружи внутрь, перехватывая множество равновесия контекста измерений, каждая с симметричной точкой прибытия относительно оси ψ_i .

Модель демонстрирует поведение, схожее с ликвидным и устойчивым рынком. Эффективное рыночное функционирование характеризуется оптимальным сочетанием участников с разнообразными коммерческими интересами и надежным механизмом ценообразования (Markets Committee, 2019). Такой результат требует ликвидности и устойчивости. Достаточная ликвидность позволяет участникам своевременно совершать сделки, реагировать на ценовое воздействие и действовать в условиях экономической неопределенности (Logan, Bindseil, 2019).

Измерение корреляции поведения с показателями экономической сложности

Управление средой предвосхищает ее свойства, сопряженные с экстремальными точками основной траектории поведения (импульс-Форсайт). Новое будущее возникает как функция текущего импульса и управленческих переговоров в пороговой зоне между двумя состояниями для реализации образов будущего. Показатель контекста представляет собой расстояние между двумя каноническими поведенческими траекториями типа $(\mathcal{V}_1(h_i, \psi_i) | \psi_i = a)$ и $(\mathcal{V}_1(h_i, \psi_i) | \psi_i = b)$ со скоростью изменения $h_i^2 + \psi_i$, где расстояние равно разнице скоростей изменения $|a - b|$. Эти показатели определяют поведение в каждом слое, задавая специфическое расстояние для контекста, людей, процесса и эффекта.

В исследовании (Hidalgo, Hausmann, 2009) рассмотрена трехсторонняя сеть экономической сложности, связывающая страны с их потенциалом и продукцию с необходимыми для нее возможностями. Модель устойчивого подрывного роста объединяет два триплета: для источника и цели $(\psi_i, \eta_i, \xi_i)_{source}$ и $(\psi_i, \eta_i, \xi_i)_{target}$, демонстрирующие две пары «идеальных» связей. Расстояние между двумя типами поведения равно среднему расстоянию между идеальными связями и способствует кластерному анализу поведения. Среднее значение для

i -й страны в единицах производства отмечено на трех перпендикулярных осях: положительные значения по оси psi_i указывают на рост производства, отрицательные — на противоположную динамику; ось ожиданий и риска (исследование контекста psi_i импульс-Форсайт) отражает возможности страны (eta_p : способности-отношение и/или инновационный скачок) и производственный потенциал (xi_i : фактор смещения к инновациям и/или технологический скачок). Целевые и исходные ожидания идеальной модели требуют дальнейшего анализа.

Ключевые результаты

Снижение размерности и стратегические структуры. Модель устойчивого подрывного роста вводит четыре стратифицированные оси измерения морфологических изменений по глубине согласно топологическому режиму поведения: переходный режим, режим фиксации, глубокий переходный режим и режим глубокой фиксации. Каждая ось выявляет два типа поведения — регулярное и подрывное, а также граничное.

Конвергенция поведения. Модель определяет три характерные точки траекторий, сходящихся к общему фокусу. Углубленный анализ конкретных ситуаций показывает, как траектории с робастными связями, способностью к адаптации и восстановлению стремятся к общей фокальной точке. Эта концепция подчеркивает значимость контактных координат высшего порядка для формирования или отклонения связей поведенческой динамики.

Стратифицированная динамика. Модель анализирует динамику поведенческих траекторий, пересекающих зоны риска, и разделяет их на четыре попарно коррелированных типа: (i) макродинамика — траектории вне пороговой зоны и (ii) микродинамика — траектории внутри пороговой зоны.

Анализ стабильности равновесия. На микроуровне модель устойчивого подрывного роста исследует возникновение подрывной динамики в пределах пороговых или рискованных зон, где траектории демонстрируют волнообразное поведение с различной амплитудой в зависимости от глубины. На макроуровне поведение за пределами пороговой зоны остается регулярным. В стратегическом плане модель подчеркивает важность выявления множеств равновесия и топологических ограничений, предлагая методологическое руководство для углубленного анализа фаз поведенческих изменений. Модель применима в анализе данных, ИИ, астрофизике и других областях.

Устойчивый рост. Через сопряжение управленческих структур, определяемых процессами общественного развития и Форсайта, с морфологическими, статистическими, эпидемиологическими и топологическими структурами, модель устойчивого подрывного роста подчеркивает значимость контекстного измерения. Она предполагает разработку типологий локальных сред, способствующих кооперации и взаимной выгоде на местном и глобальном уровнях. Модель обеспечивает устойчивый рост и локальную стабильность, эффективно соединяя морфологические изменения с потенциально подрывными инновациями.

Перечисленные пять аспектов демонстрируют аналитическую глубину и стратегическое значение представленного в статье подхода к пониманию устойчивых систем, поведенческой динамики и их роли в теории устойчивости и инноваций.

Методологические выводы

Модель устойчивого подрывного роста представляет собой методологическую структуру, интегрирующую глубинный анализ измерений контекста, человеческого фактора, процесса и эффекта. Такой холистический подход позволяет детально понять развитие устойчивости и инноваций во времени и пространстве. Модель разделяет траектории поведения на стратифицированные фазы с особыми этапами изменений, что помогает выявить критические точки трансформации и понять динамику устойчивости сложных систем.

Применяя топологический и статистический анализ, модель обеспечивает структурированный подход к изучению морфологических изменений и их последствий, что усиливает возможности выявления состояний равновесия и подрывной динамики в сфере устойчивости. Модель использует методы снижения размерности для упрощения сложных данных и определения ключевых параметров, влияющих на поведение в контексте устойчивости, концентрируя анализ на критических переменных и их взаимодействии. Модель объединяет подходы к устойчивости из биологических, статистических и эпидемиологических систем. Подобный междисциплинарный подход обогащает анализ устойчивого образа жизни, предлагая новые перспективы, топологическую устойчивость и понимание подрывных инноваций.

Представленные методологические разработки позволяют исследователям глубже понять устойчивый образ жизни благодаря эффективным инструментам анализа и прогнозирования динамического поведения в социально устойчивых системах.

Эпистемологические выводы и ключевой вклад статьи

В основе модели устойчивого подрывного роста лежит многомерный подход к изучению социально-экологических систем на базе рассмотрения контекста, человеческого фактора, процесса и эффекта. Эта холистическая перспектива учитывает взаимосвязь различных факторов, влияющих на модель и ее результаты. Углубленный анализ служит методологическим инструментом исследования сложных систем устойчивости, выходящим за рамки поверхностных наблюдений для выявления базовой динамики и эмерджентных свойств конкретных систем.

Стратификация траекторий поведения позволяет прояснить эволюцию устойчивого поведения через различные фазы, что дает представление о топологической устойчивости, адаптивности и стабильности систем при внешних изменениях. В модель анализа устойчивости интегрированы подходы из биологии, статистики и топологии. Такой междисциплинарный подход обогащает понимание, заимствуя эффективные методологии и концепции изучения сложных адаптивных систем.

Модель исследует возникновение подрывных инноваций в устойчивых системах, связывая морфологические изменения с потенциальными прорывами. Подобная эпистемологическая позиция способствует перспективному взгляду на эволюцию и трансформацию устойчивости. Ее теоретический вклад связан с расширением понимания устойчивости и углублением представления о природе систем, их поведении и механизмах, движущих изменениями и инновациями.

Заключение

Представленные в статье результаты могут помочь в разработке эффективных стратегий с учетом многомерных аспектов устойчивости (контекст, человеческий фактор, процесс, эффект). Это касается развития инновационных экосистем, внедрения устойчивых практик и оптимизации систем. Понимание принципов углубленного анализа и стратифицированной динамики поведения способствует эффективному управлению инновационной деятельностью, предлагая структуру для выявления точек прорыва, рационализации использования ресурсов и создания среды для подрывных изменений.

Интеграция подходов из биологии, статистики и топологии усиливает возможности сетевого анализа и стратегического планирования в устойчивых системах, помогая выявлять ключевых участников, оценивать сетевую динамику и прогнозировать системные изменения. Углубленный анализ и стратификация повышают эффективность управления рисками через идентификацию уязвимостей и определение устойчивости систем, включая мониторинг устойчивых связей, моделирование сбоев и реализацию адаптивных стратегий.

Предложенные идеи способствуют интеграции технологических достижений, включая ИИ, в анализ устойчивости и процесс принятия решений. ИИ применим для анализа сложных данных, моделирования сценариев и оптимизации решений в соответствии с принципами устойчивости. Эти направления демонстрируют практическую ценность представленных теоретических структур и методологий для заинтересованных сторон, стремящихся эффективно использовать динамику устойчивости.

Ограничения

Одними из основных ограничений проведенного исследования выступают доступность и качество данных для углубленного анализа и стратификации поведенческой динамики. Преодолеть их позволят разработка новых методов сбора данных или применение технологий их синтеза и анализа, включая ИИ и машинное обучение. Сложность предлагаемых моделей и методологий за-

трудняет интерпретацию и практическое внедрение результатов. Необходимы упрощенные структуры и инструменты визуализации для облегчения понимания экологической динамики. Применимость и обобщение результатов в разных природных контекстах и регионах также могут быть ограничены. В рамках дальнейших изысканий следует проверить надежность методологий в различных социально-экологических и институциональных условиях.

В этическом и политическом аспектах важно проанализировать последствия применения сложных моделей для принятия решений и разработки политики. Особого внимания требуют вопросы справедливости, прозрачности и непредвиденных эффектов от предиктивной аналитики и алгоритмических моделей в управлении. Активизация исследований в области устойчивости требует решения проблем междисциплинарного взаимодействия, включая расширение контактов между представителями разных дисциплин, интеграцию теоретических подходов и преодоление методологических барьеров.

Направления дальнейших исследований

Предложенные методы углубленного анализа и стратифицированной динамики поведения можно интегрировать в динамический сетевой анализ устойчивости, включая изучение эволюции сетевых структур, выявление новых свойств и анализ влияния взаимодействий узлов на результаты. Необходимо проследить эволюцию поведенческих моделей во времени, устойчивость стратифицированных состояний и их вклад в долгосрочную резистентность и инновационную динамику.

Описанные методологии эффективны применительно к изучению многоуровневых структур управления в области устойчивого развития и анализа влияния управленческой динамики на устойчивость, распространение инноваций и продуктивность политики на местном, национальном и глобальном уровнях. Целесообразно изучить процессы принятия решений, предубеждения при внедрении инноваций и роль социальных норм в формировании устойчивости.

Междисциплинарный характер расширяет возможности применения предложенных структур за пределами сферы устойчивости — в экологии, социологии и политологии. Возможен анализ междисциплинарных подходов к адаптивным системам для выявления универсальных принципов в разных дисциплинах.

Выявленные ограничения и направления дальнейших исследований открывают перспективы развития через эмпирическую валидацию, междисциплинарное сотрудничество и решение практических задач.

Библиография

- Ahamer G. (2020) Global history as a sequence of transient economic foci. *Journal of Globalization Studies*, 11(2), 3–22. <http://dx.doi.org/10.30884/jogs/2020.02.01>
- Aliprantis D. (2011) *Fundamentals of wind energy conversion for electrical engineers*, Ames, IA: Iowa State University.
- Americo A., Johal J., Upper C. (2023) *The energy transition and its macroeconomic effects* (BIS Paper 135), Basel: Bank of International Settlements.
- Bang A., Kuo C., Wen C., Cherh K., Ho M.-J., Cheng N.-Y., Chen Y.-C., Chen C.A. (2021) Quantifying coral reef resilience to climate change and human development: An evaluation of multiple empirical frameworks. *Frontiers in Marine Science*, 7, 610306. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.610306>

- Barunik J., Vosvrda M. (2009) Can a stochastic cusp catastrophe model explain stock market crashes? *Journal of Economic Dynamics and Control*, 33(10), 1824–1836. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2009.04.004>
- Bilodeau G., Thie P., Keough G.E. (2010) *An Introduction to Analysis*, Boston, MA: Jones & Bartlett Publisher.
- Carayannis E.G., Campbell D.F. (2009) 'Mode 3 and Quadruple Helix': Toward a 21st century fractal innovation ecosystem. *International Journal of Technology Management*, 46 (3–4), 201–234. <https://doi.org/10.1504/IJTM.2009.023374>
- Carayannis E.G., Campbell D.F. (2010) Triple helix, quadruple helix and quintuple helix and how do knowledge, innovation and the environment relate to each other?: A proposed framework for a trans-disciplinary analysis of sustainable development and social ecology. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development (IJSESD)*, 1(1), 41–69. <http://dx.doi.org/10.4018/jesed.2010010105>
- Cassingena Harper J. (2003) *Vision Document, eFORESEE Malta ICT and Knowledge Futures Pilot*. (eFORESEE Malta Report), La Valletta: Malta Council for Science and Technology.
- Cherp A., Jewell J. (2014) The concept of energy security: Beyond the four as. *Energy Policy*, 75, 415–421. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.09.005>
- Dehghannejad M. (2021) *Value Capturing through Business Model Adaptations to Sustainability – case studies from the primary production stage of the Swedish agri-food supply chain*, Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences.
- Deng Y. (2016) Deng entropy. *Chaos, Solitons & Fractals*, 91, 549–553. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.07.014>
- Der Kiureghian A., Ditlevsen O. (2009) Aleatory or epistemic? does it matter? *Structural Safety*, 31(2), 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>
- Georghiou L. (2008) *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*, Cheltenham: Edward Elgar Publishing.
- Gunning D., Stefik M., Choi J., Miller T., Stumpf S., Yang G.-Z. (2019) XAI – Explainable artificial intelligence. *Science Robotics*, 4 (37), eaay7120. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aay7120>
- Hastings A. (2004) Transients: The key to long-term ecological understanding? *Trends in Ecology & Evolution*, 19(1), 39–45. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2003.09.007>
- Hidalgo C., Hausmann R. (2009) The building blocks of economic complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(26), 10570–10575. <https://doi.org/10.1073/pnas.0900943106>
- Huang Y., Pinker S. (2010) Lexical semantics and irregular inflection. *Language and Cognitive Processes*, 25, 1411–1461. <https://doi.org/10.1080%2F01690961003589476>
- Johnson R., Wichern D. (2014) *Applied Multivariate Statistical Analysis*, London: Pearson Education Limited.
- Laurett R., Paco A., Mainardes E. (2021) Measuring sustainable development, its antecedents, barriers and consequences in agriculture: An exploratory factor analysis. *Environmental Development*, 37, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100583>
- Logan L., Bindseil U. (2019) *Large central bank balance sheets and market functioning*, Basel: Bank of International Settlements.
- Lu Z., Booth K., Edwards M., Popper R., Boyd A., Jones B., Miles I., Popper M., Velasco G. (2013) *The technology horizon. Preliminary review on technologies impacting the future health and social care workforce*, London: Health Education England.
- Marchau V., Walker W., Bloemen P., Popper S. (2019) *Decision making under deep uncertainty: From theory to practice*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.
- Markets Committee (2019) *Large central bank balance sheets and market functioning* (Markets Committee Paper no 11, October), Baselle: Bank for International Settlements.
- Martin R. (2012) Regional economic resilience, hysteresis and recessionary shocks. *Journal of Economic Geography*, 12(1), 1–32. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbr019>
- Masini E., Vasquez J. (2000) Scenarios as seen from a human and social perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(1), 49–66. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(99\)00127-4](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00127-4)
- Miles I. (2013) *Appraisal of alternative methods and procedures for producing regional foresight*. Paper presented at the European Commission's DG Research funded STRATA – ETAN Expert Group Action Conference, February 2013.
- Miles I., Saritas O., Sokolov A. (2016) *Foresight for science, technology and innovation*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.
- Morgan T. (1935) *The Scientific Basis of Evolution*. (2nd ed.), New York: W.W. Norton, Inc.
- Ntalampiran S., Misuraca G., Rossel P. (2023) *Artificial Intelligence and Cybersecurity Research* (ENISA Research and Innovation Brief), Brussels: European Union Agency for Cybersecurity (ENISA).
- Osband K. (2023) *Why the variance of beliefs matters*, Napoli: Institute for Studies on the Mediterranean (ISMED).
- Pearson K. (2022) *On the General Theory of Skew Correlation and Non-linear Regression*, London: Legare Street Press (first published in 1905 by Dulau and Company).
- Pinker S. (2007) *The stuff of thought: Language as a window into human nature*, New York: Penguin.
- Popper K. (1992) *The Logic of Scientific Discovery*, New York: Routledge.
- Popper K. (1994) *The myth of the framework: In defence of science and rationality*, New York: Psychology Press.
- Popper R. (2008) How are foresight methods selected? *Foresight*, 10(6), 62–89. <http://dx.doi.org/10.1108/14636680810918586>
- Popper R. (2023) The role of horizon scanning in anticipating and monitoring emerging technologies and disruptive innovations. In: *Technology Foresight for Public Funding of Innovation: Methods and Best Practices* (eds. L. Vesnic-Alujevic, J. Farinha, A. Polvora), Brussels: European Commission, pp. 48–58.
- Popper R., Miles I., Ravetz J., Teichler T., Perini I., Cox D., Butler J., Kaivo-Oja J., Sajeva M., Saarinen L., Steinmueller K., Von Saldern S., Ollivere G., Walker A., Fatun M., Klusáček K., Valenta O., Sharan Y., Hauptman A., Lång J., Decanter D., Klusáček J., Vacatko J., Doriňák M. (2011) *iKNOW policy alerts*, Manchester: University of Manchester.
- Popper R., Popper M., Velasco G. (2017) Towards a more responsible sustainable innovation assessment and management culture in Europe. *Engineering Management in Production and Services*, 9(4), 7–20. <http://dx.doi.org/10.1515/emj-2017-0027>
- Popper R., Popper M., Velasco G. (2020) *Governance and Management of Sustainable Innovation: Learning from experience to Shape the Future*, Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.
- Popper R.W. (2000) Compact lie groups acting on pseudomanifolds. *Illinois Journal of Mathematics*, 44(1), 1–19.
- Ravetz J., Popper R., Miles I. (2011) *iKnow ERA Toolkit* (Report of the Blue Sky iKnow Project for the European Commission Directorate-General for Research and Innovation Socio-economic Sciences and Humanities), Manchester: Manchester Institute of Innovation Research.
- Shannon C., Weaver W. (1949) *The mathematical theory of communication*, Urbana, IL: University of Illinois Press.
- Spearman C. (1904) General Intelligence. Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2), 201–293. <https://doi.org/10.2307/1412107>
- Teramoto Y., Takahashi D., Holmes P., Ghazanfar A. (2017) Vocal development in a Waddington Landscape. *Elife*, 6, 760–782. <https://doi.org/10.7554%2FElife.20782>
- Thom R. (1975) *Stabilité structurelle et morphogénèse*, Paris: Dunod.
- Vásquez M., Ortegón E. (2006) *Manual de prospectiva y decisión estratégica: Bases teóricas e instrumentos para América Latina y el Caribe*, Bogotá: CEPAL.
- Velasco G. (2017) *Understanding the generation of research and innovation policy advice with foresight processes* (PhD thesis), Manchester: The University of Manchester.
- Villarreal Y. (1995) On completely integrable systems. *Publicaciones Mathematicae*, 47(3–4), 237–248.
- Waddington C.H. (1957) *The strategy of the genes*, New York: Routledge.
- Wu W., Piyaratne M., Zhao H., Li C., Hu Z., Hu X. (2014) Butterfly catastrophe model for wheat aphid population dynamics: Construction, analysis and application. *Ecological Modelling*, 288, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.05.017>
- Yang Z., Chen Y., Marti J. (2020) Modelling cascading failure of a cps for topological resilience enhancement. *IET Smart Grid*, 3(2), 207–215. <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2019.0169>
- Zhu X., Geng Y., Wu D., Houssini K., Gao Z. (2023) Evaluating the security of China's zirconium industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 199, 107–177. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107277>

Приложение. Топологическая стабильность и нерегулярная динамика

Стратифицированные оси

Стратифицированные оси (например, ψ_i) представляют каждый слой — положительный и отрицательный — как образ действительной прямой через экспоненциальную функцию. Аналогично используется действительная ось потенциальной функции.

$$Axis(h_i) = \{-e^{\lambda h}\} \cup \{(0, 0)\} \cup \{e^{\lambda h}\}$$

Теорема о локальной стабильности

Стратифицированная версия теоремы позволяет разложить поведенческие функции на слои. Аналитическое выражение уравнений демонстрирует связь между статистическими моментами, особенно удельной дисперсией, через уравнения из табл. 1.

Теорема: если процесс, управляемый не более чем четырьмя действительными факторами или параметрами, можно описать путем минимизации или максимизации функции с одной объясняющей переменной, то любые особенности будут подобны возникающим в следующих архетипических моделях, где h_i — переменная плотности в i -той локальности i , а ψ_i, η_i, ξ_i и β_i — действительные параметры (Thom, 1975).

Табл. А1. Ростки функций и их развертывание

Ростки функций	Универсальное развертывание функций
$v_1 = 1/3h_i^3$	$\mathcal{V}_1 = 1/3h_i^3 + \psi_i h_i$
$v_2 = 1/4h_i^4$	$\mathcal{V}_2 = 1/4h_i^4 + 1/2\psi_i h_i^2 + \eta_i h_i$
$v_3 = 1/5h_i^5$	$\mathcal{V}_3 = 1/5h_i^5 + 1/3\psi_i h_i^3 + 1/2\eta_i h_i^2 + \xi_i h_i$
$v_4 = 1/6h_i^6$	$\mathcal{V}_4 = 1/6h_i^6 + 1/4\psi_i h_i^4 + 1/3\eta_i h_i^3 + 1/2\xi_i h_i^2 + \beta_i h_i$

Первая функция представляет собой решение дифференциального уравнения, определяемого удельной дисперсией, поскольку скорость изменения поведенческих функций совпадает с удельной дисперсией. Диаграмма показывает соотношение типов поведения в нулевой среде. На следующей диаграмме показана удельная дисперсия как скорость изменения первой функции, определенной в теореме об устойчивости, для случая положительного параметра.

$$\begin{array}{ccc}
 G(\tilde{v}_1) = \{(h_i, 1/3h_i^3), h_i \in \mathbb{R}^*\} & \xrightarrow{H_\epsilon} & G(\tilde{\mathcal{V}}_1) = \{(h_i, 1/3h_i^3 + \epsilon h_i), h_i \in \mathbb{R}^*\} \\
 \downarrow \frac{\partial}{\partial h_i} & & \downarrow \frac{\partial}{\partial h_i} \\
 G(\tilde{s}_1) = \{(h_i, h_i^2), h_i \in \mathbb{R}^*\} & \xrightarrow{\tau_\epsilon} & G(\tilde{S}_1) = \{(h_i, h_i^2 + \epsilon), h_i \in \mathbb{R}^*\}
 \end{array} \tag{1}$$

Переходная модель и особые точки

Пороговая зона, заданная двумя графиками, и точка бифуркации (0, 0):

$$G(\gamma_i^+) : \gamma_i^+ = (\sqrt{-\psi_i}, \psi_i), \psi_i < 0; \quad G(\gamma_i^-) : \gamma_i^- = (\sqrt{-\psi_i}, \psi_i), \psi_i < 0 \tag{2}$$

Параллелизм в зоне риска: сжатие и расширение

Пороговая зона открывает пространство, подобное речному бассейну, и вводит новые понятия параллелизма и трансверсальности в плоскости переменных и параметров. Новый параллелизм определяется через δ -сжатие для $0 < \delta < 1$, обозначаемое как ϵ_δ , и δ -расширение при δ больше нуля, обозначаемое как ϵ_δ и задаваемое следующим образом:

Табл. А2. Переходный топологический режим: морфологические изменения и их математическое представление

Функция наклона: $s_1 = h_i^2$	Поведение: $v_1 = 1/3h_i^3$	Развертка: $\mathcal{V}_1 = 1/3h_i^3 + \psi_i h_i$	
Особое множество (S_{v_1})	Множество бифуркаций (B_{v_1})	Множество выбросов (O_{v_1})	Кодовые отметки $\{\psi_i\}$
$\frac{\partial v_1}{\partial h_i} = h_i^2 + \psi_i = 0$	$\{\frac{\partial^2 v_1}{\partial h_i^2} = 0\} \cap S_{v_1}$	$\pi_{\psi_i} : p \in S_{v_1} \mapsto \psi_i$	$(-\sqrt{-\psi_i}, \psi_i), \psi_i < 0$
$\{(\pm\sqrt{-\psi_i}, \psi_i)\}$	$\{(0, 0)\}$	$h_{\psi_i} = \pm\sqrt{-\psi_i}$	$(0, \psi_i), (\sqrt{-\psi_i}, \psi_i)$

$$c_\delta \gamma_i(\psi_i) = (\sqrt{-\psi_i \delta}, \psi_i); \quad e_\delta \gamma_i(\psi_i) = (\sqrt{-\psi_i + \delta}, \psi_i). \quad (3)$$

Максимальная стратифицированная траектория поведения и робастная связь

Плоскость (стратифицированная по особым точкам), обозначенная как E_2 , без особых точек поднимается до естественного расширения в 3-пространство $E^3 = E^2 \times \mathbb{R}$. Естественная проекция каждой точки на основание позволяет определить расслоенное многообразие $M = (E^3, \pi_i, E^2)$ и поднятие E^2 с помощью функции ν , то есть сечения η расслоения M , заданного как:

$$c^3 \eta : (h_i, \psi_i) \in E^2 \mapsto (h_i, \psi_i), 1/3h_i^3 + \psi_i h_i, h_i^2 + \psi_i, 2, 0) \in C^{3,1} M). \quad (4)$$

Мы определяем интегрируемую дифференциальную систему третьего порядка через регулярное подмногообразие $W \subset C^{(3,1)} M$ контактного многообразия третьего порядка и размерности 1 расслоения M (Villarreal, 1995). Затем определяется и вводится робастная связь, преобразующая траектории поведения в R -псевдомногообразия, где R — параметрическая группа, определенная максимальным решением дифференциального уравнения. Это понятие связано с G -псевдомногообразием, введенным Раймундом Поппером для случая, когда G является компактной группой Ли, действующей на псевдомногообразиях (Popper, 2000).

Режим фиксации и параллелизм

Аналогично, параллелизм в режиме фиксации, связанный с измерением «люди», определяется через сосуществование двух типов поведения, рассмотренных в разделе о режиме фиксации.

$$\gamma_1^+(\psi_i) = (\psi, \sqrt{-4/27\psi_i^3}), \quad \gamma_1^-(\psi_i) = (\psi_i, -\sqrt{-4/27\psi_i^3}), \quad \psi_i < 0.$$

Режимы глубокого перехода и глубокой фиксации анализируются путем разложения соответствующей плоскости по особенностям. Понятия параллелизма и трансверсальности для этих режимов поведения являются более сложными, поскольку с увеличением глубины возрастает число вовлеченных измерений.