МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, СТАТИСТИЧЕСКИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ЭКОНОМИКЕ

Научная статья / Original article

BY-NC 4.0

УДК 519.6(470.311)

JEL C32 C51 R11

EDN BMPTKE

Портнов А. М.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА

Портнов Алексей Михайлович
кандидат технических наук, доцент
Московский государственный университет геодезии и картографии (г. Москва, Россия), доцент кафедры земельного права и государственной регистрации недвижимости
Portnov@miigaik.ru
https://orcid.org/0000-0001-5036-0184
SPIN 1503-5567

Aleksei M. Portnov
Candidate of Technical Sciences, Associated Professor
Moscow State University of Geodesy and Cartography (Moscow, Russia), Associate Professor of Land Law and State Registration of Real Estate Department
Portnov@miigaik.ru
https://orcid.org/0000-0001-5036-0184
SPIN 1503-5567

В работе представлен анализ устойчивости динамической территориальной социально-экономической системы, описываемой четырьмя ключевыми показателями: численностью населения, вводом жилья на душу населения, средней стоимостью жилья и валовым региональным продуктом. На основе объединённых данных г. Москвы и Московской области за 2014–2023 гг. построена векторная авторегрессионная модель второго порядка VAR(2) и проведён её спектральный анализ с целью определения устойчивости системы. Установлено, что система находится в неустойчивом состоянии, спектральный радиус ρ = 2,256; выявлено усиление внутренних возмущений 2021–2022 годов и сглаживание ситуации в 2023 году. Указаны наиболее волатильные и трудно прогнозируемые показатели, определяющие «узкие места» изучаемой системы. В контексте территориального планирования результаты могут интерпретироваться как сигналы для использования адаптивного управления, ориентированного на сглаживание дисбалансов и повышение системной устойчивости в реализации принципов перераспределения земельных участков под застройку и иных показателей территориального развития. Исследование опирается на современные подходы к дискретному динамическому моделированию и его применению в экономике и при территориальном планировании. Метод спектрального анализа, использующий оценку собственных значений матрицы перехода системы, служит инструментом для диагностики устойчивости развития взаимосвязанных подсистем.

Ключевые слова*: устойчивость системы, спектральный анализ, векторная авторегрессия, спектральный радиус, территориальное планирование, перераспределение земельных ресурсов, динамическое моделирование*

The paper presents the analysis of stability of dynamic territorial socio-economic system, described by four key indicators: population, housing commissioning per capita, average cost of housing and gross regional product. Based on the combined data from Moscow and Moscow region for the period of 2014-2023, vector autoregressive model of the second order VAR(2) was constructed and its spectral analysis was carried out in order to determine the system's stability. It is established that the system is in unstable state, the spectral radius is p = 2.256, increase in internal disturbances in 2021-2022 and smoothing of the situation in 2023 were revealed. The most volatile and difficult-to-predict indicators that determine the "bottlenecks" of the system under study were identified. In the context of territorial planning, the results can be interpreted as signals for the use of adaptive management aimed at smoothing imbalances and increasing systemic sustainability in the implementation of the principles of land redistribution for building and other indicators of territorial development. The research is based on modern approaches to discrete dynamic modeling and its application in economics and territorial planning. The spectral analysis method, which uses estimation of the values of the transition matrix of the system, serves as a tool for diagnosing sustainability of interconnected subsystems development.

Keywords*: system stability, spectral analysis, vector autoregression, spectral radius, territorial planning, redistribution of land resources, dynamic modeling*

Для цитирования: Портнов А. М. Спектральный анализ устойчивости динамической модели социально-экономиче-

For citation: Portnov A.M. Spectral Analysis of Stability of Dynamic Model of Socio-Economic Development of the Territories

© Портнов А. М., 2026

ского развития территорий на примере Московского региона // Экономическая среда. – 2026. – Т. 15, № 1. – С. 21-30. – EDN BMPTKE.

on the Example of Moscow Region. *Economic Environment*, 2026, vol. 15, no. 1, pp. 21-30. (In Russ.). Available from: https://elibrary.ru/BMPTKE.

Введение и постановка задачи

Современный город представляет собой сложную открытую систему, в которой социальные, экономические и пространственные процессы развития тесно переплетены и взаимно обусловливают друг друга. Ключевым вопросом при этом становится не только оценка текущего состояния системы, но и её устойчивости – способности возвращаться в равновесное состояние после внешних возмущений или внутренних флуктуаций, что обеспечивает стабильность развития территорий.

Целью данного исследования является количественная оценка устойчивости системы территориального развития на примере г. Москвы и Московской области (далее – Московский регион) на основе анализа временных рядов четырёх показателей за период 2014–2023 годов (при расчётах использовано ПО Matlab): численности населения (N), ввода жилья на душу населения (H), средней стоимости жилья (P) и валового регионального продукта (G).

Конкретные задачи включали:

1. Построение дискретной динамической модели системы.
2. Определение погрешности построенной модели.
3. Проведение спектрального анализа модели для оценки её устойчивости.
4. Выявление критических точек и трендов в изменении устойчивости системы.
5. Интерпретацию полученных результатов в контексте задач социально-экономического развития территорий на примере Московского региона.

Актуальность работы обусловлена наблюдаемой в последние годы мировой турбулентностью в экономике в целом и рынка недвижимости в частности. Неустойчивая система характеризуется тем, что малые отклонения (например, локальный рост спроса на жилье) не затухают, а усиливаются, приводя к непропорционально большим и часто негативным последствиям (пузыри на рынке, острый дефицит). Традиционные методы планирования, основанные на экстраполяции трендов, оказываются несостоятельными, если базовая система теряет устойчивость. Поэтому диагностика устойчивости систем является предиктором будущих кризисов и позволяет перейти к упреждающему управлению. Данное исследование вносит вклад в современную дискуссию об использовании методов моделирования сложных открытых динамических территориальных систем для целей достижения устойчивости социально-экономического развития, необходимость которого подчёркивается в работах [1–4].

Перспективы применения таких моделей лежат в плоскости и направлении создания инструментария для адаптивного территориального развития и необходимости понимания того, какие связи между показателями ведут к потере устойчивости. Это позволит целенаправленно корректировать экономическую и градостроительную политику, нормы и правила землепользования и застройки как конечные механизмы влияния.

Методы исследования

Для анализа устойчивости динамических систем применяется широкий спектр методов. В рамках данной работы ключевым инструментом стал спектральный анализ на основе собственных значений линеаризованной модели системы. Этот метод часто используется в теории динамических систем и спектральной теории графов, которые изучают свойства сложных структур через анализ собственных значений и векторов связанных с ними матриц (например, матрицы смежности или Лапласа графа) [5; 6].

Данный подход позволяет перейти от анализа структуры системы к анализу её глобальных динамических свойств.

В контексте данной работы территориальная система представляется как многомерный временной ряд показателей её функционирования, где связи между компонентами описываются матрицей коэффициентов. Полученным собственным значениям (спектр) матрицы перехода системы можно дать чёткую динамическую интерпретацию, что, как подчёркивают авторы [7], очень важно для анализа как системы в целом, так и её отдельных составляющих.

Данный подход согласуется с современным направлением анализа дискретных организационно-технологических систем интеллектуальных агентов, где ключевое значение имеет изучение матриц взаимного влияния показателей функционирования систем [8].

В качестве модели была выбрана векторная авторегрессия второго порядка (VAR(2)). Этот выбор обусловлен следующими причинами:

1. Учёт взаимовлияния и динамики: VAR-модель позволяет смоделировать взаимное влияние всех четырёх показателей друг на друга, а использование второго лага VAR(2) позволяет выделять более сложные временные зависимости и эффекты инерции в системе.

2. Статистическое обоснование: Выбор лага p=2 был подтверждён информационными критериями Акаике (AIC = -25,52) и Шварца (BIC = -27,25), которые показали оптимальность второго порядка модели относительно VAR(2) для имеющихся данных (лаг t-3 избыточен для данного временного ряда в связи с ограниченностью периода наблюдений).

3. Критерий устойчивости: Для дискретной системы, представленной в эквивалентной форме VAR(1) с помощью companion-матрицы, существует строгий критерий устойчивости: система асимптотически устойчива тогда и только тогда, когда все собственные значения (λ) матрицы перехода лежат внутри единичного круга на комплексной плоскости (т. е. $|\lambda| < 1$ для всех λ) [9].

Исходными данными для анализа послужили ежегодные значения четырёх ключевых показателей социально-экономического развития Московского региона в период с 2014 по 2023 год. Данные представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные совокупные статистические показатели для Московской области и г. Москвы

Год	численность населения, N (млн чел.)	ввод жилья на душу населения, H (м²/чел)	средняя стоимость жилья, P (тыс. руб./м²)	валовой региональный продукт, G (трлн руб.)
2014	19,429	0,544	133	15,522
2015	19,649	0,564	119	16,702
2016	19,804	0,557	126	19,328
2017	20,009	0,563	141	20,828
2018	20,215	0,597	151	23,422
2019	20,369	0,635	161	24,993
2020	20,363	0,667	179	25,667
2021	21,557	0,712	205	31,076
2022	21,696	0,627	197	35,501
2023	21,800	0,650	229	41,584

Источник: составлено автором на основе официальных данных (https://77.rosstat.gov.ru) и открытых источников

Для устранения тренда и стабилизации дисперсии исходные временные ряды (таблица 1) были преобразованы в годовые темпы роста (логарифмические разности). Полученные темпы роста были стандартизированы для обеспечения сопоставимости показателей и улучшения свойств оценок модели (1):

$$\Delta \ln X(t) = \ln(Xt) - \ln\big(X(t-1)\big) \quad (1)$$

Полученные ряды темпов роста были стандартизированы для каждого показателя путём вычитания среднего и деления на стандартное отклонение.

На основе стандартизированных рядов была оценена VAR(2)-модель, которая достаточно часто и успешно применяется в экономических исследованиях [10, стр. 47]:

$$Z(t) = A^1 Z(t-1) + A^2 Z(t-2) + \varepsilon(t), \quad (2)$$

где A_1, A_2 – матрицы коэффициентов 4x4, для лагов 1 и 2 соответственно;
$\varepsilon(t)$ – вектор случайных ошибок.

Как показано в исследованиях сложных систем, спектральный анализ остаётся мощным инструментом для определения границ устойчивости и классификации динамических режимов [11]. Стоит также отметить, что выбранный подход методологически близок к широко применяемому в градостроительстве методу клеточных автоматов, который представляет собой дискретную динамическую пространственную модель и используется для прогнозного моделирования развития городских территорий и землепользования [12; 13].

Для определения качества модели использовались метрики: коэффициент детерминации (R^2), средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE), средняя абсолютная ошибка (MAE) и среднеквадратичная ошибка (RMSE). Результаты представлены в таблице 2.

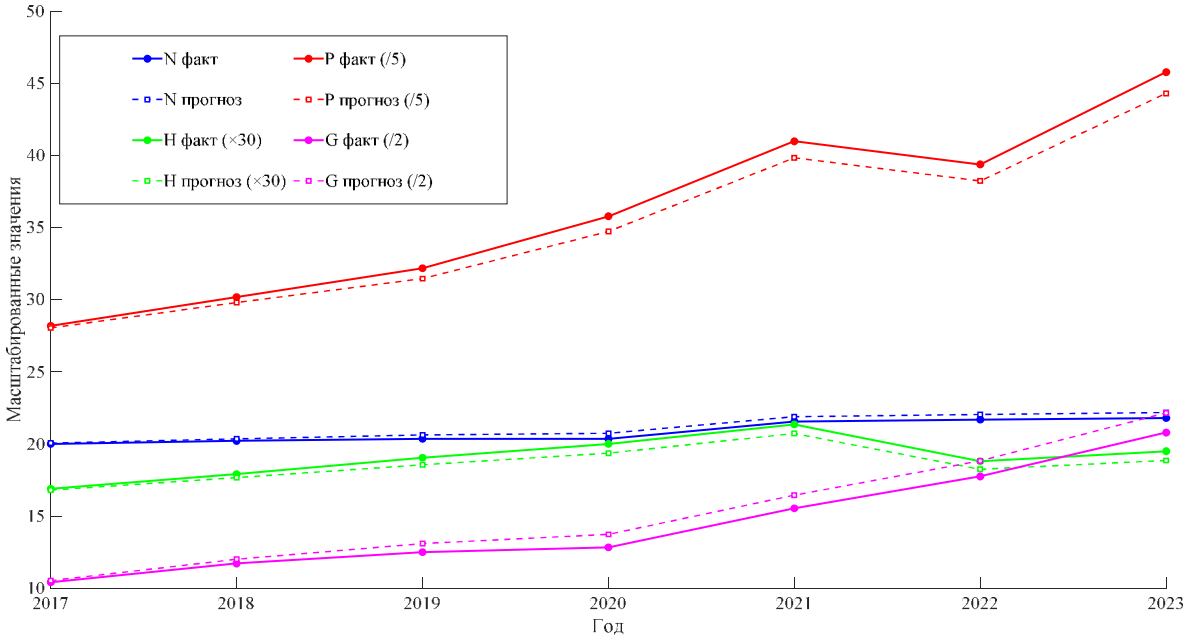
Таблица 2 – Показатели качества модели VAR(2) на исходной шкале данных

Показатель	R^2	RMSE	MAE	MAPE%
N	0,83	0,29	0,27	1,29
H	0,85	0,01	0,01	2,41
P	0,98	4,86	4,34	2,27
G	0,94	1,71	1,50	4,84
Среднее	0,90	1,72	1,53	2,70

Источник: рассчитано автором при оценке качества авторегрессионной модели

Построенная VAR(2)-модель демонстрирует высокое качество описания данных (см. таблицу 2). Средний коэффициент детерминации (R^2) составляет 0.90, а средняя абсолютная процентная ошибка прогноза (MAPE) – 2,70 %. Наиболее точно модель описывает динамику численности населения (N), несколько менее точно – валовой региональный продукт (G).

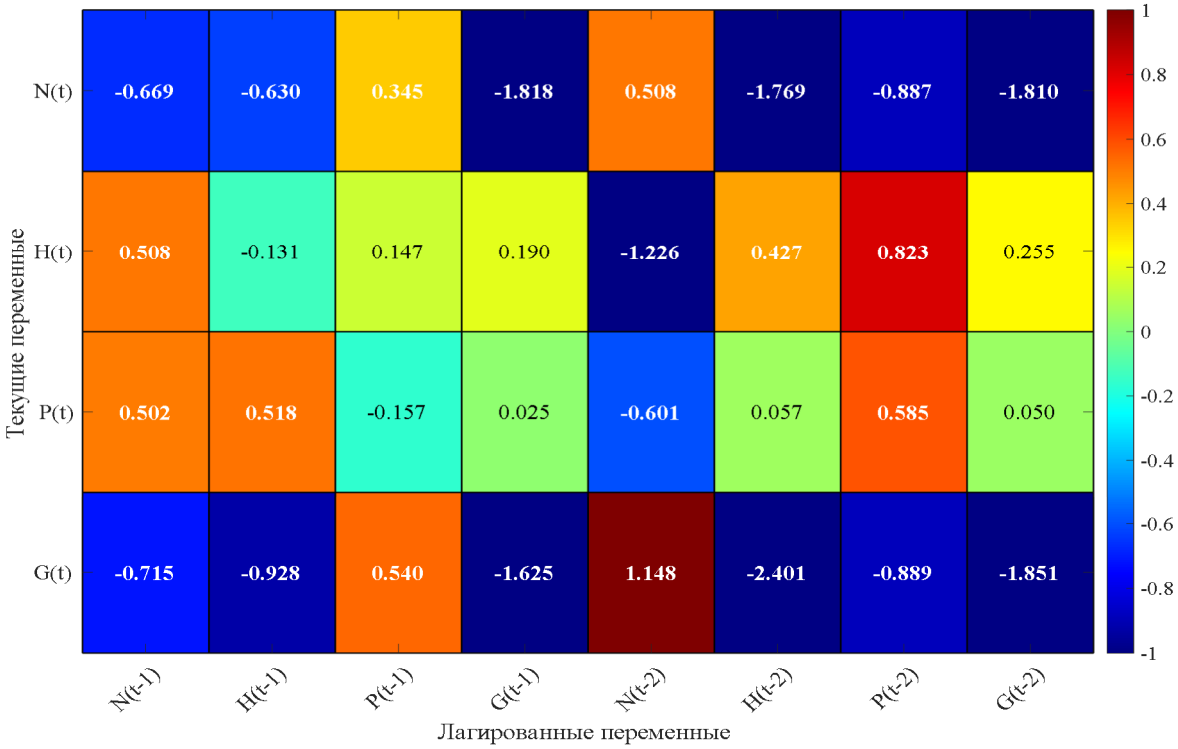
Такое высокое качество описания системы позволяет с уверенностью интерпретировать результаты спектрального анализа как свойство самой моделируемой системы, а не артефакт плохой спецификации модели. Сравнение фактических и смоделированных значений для наиболее волатильных показателей P и G представлено на рисунке 1.



Источник: рассчитано и оформлено автором при оценке качества авторегрессионной модели

Рисунок 1 – Сравнение фактических и расчётных модельных статистических показателей

Для анализа устойчивости система VAR(2) была переписана в эквивалентную форму VAR(1) с помощью companion-матрицы размерностью 8x8 и получены следующее коэффициенты переходной матрицы A (рисунок 2). Число обусловленности cond(A) = 109,09 указывает на приемлемую обусловленность матрицы A.



Источник: рассчитанные автором значения

Рисунок 2 – Тепловая матрица значений коэффициентов матрицы A

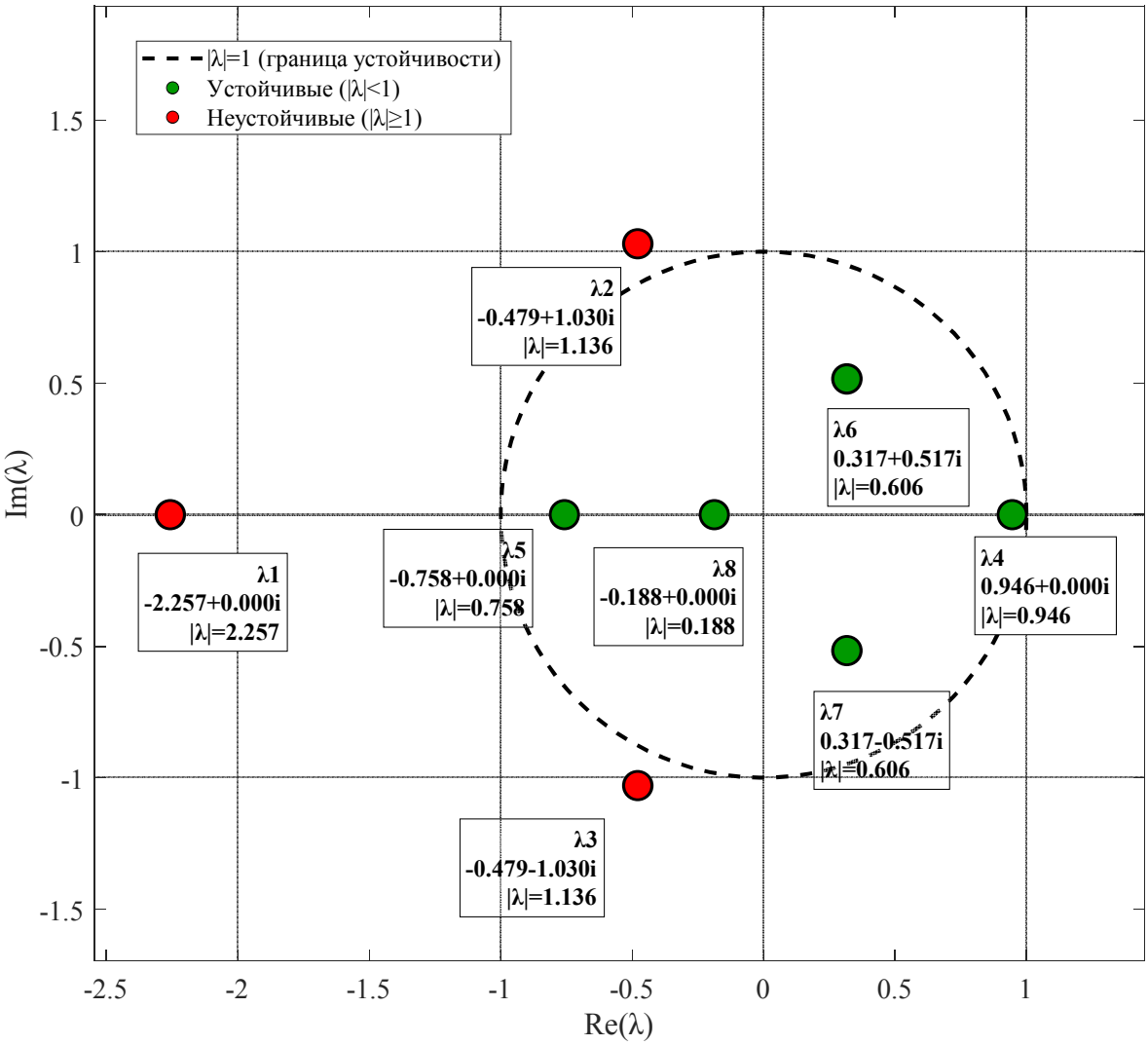
Собственные значения (λ) этой матрицы перехода характеризуют внутренние динамические свойства системы. Спектральный радиус ρ(A), определяемый как максимальный модуль среди всех собственных значений (ρ(A) = max(|λ$_i$|)), является ключевой метрикой устойчивости [9].

Спектральный анализ матрицы перехода системы VAR(2) выявил её принципиальную неустойчивость.

Получен следующий характеристический полином P(λ):

$$P(\lambda) = \det(A - \lambda I) = \lambda^8 + 2{,}580598\cdot\lambda^7 + 1{,}029867\cdot\lambda^6 - 0{,}169576\cdot\lambda^5 - 2{,}263787\cdot\lambda^4 - 0{,}603236\cdot\lambda^3 + 0{,}176621\cdot\lambda^2 - 0{,}725384\cdot\lambda - 0{,}143506 = 0,$$

и его собственные значения (рисунок 3).



Источник: рассчитанные автором значения

Рисунок 3 – Расположение собственных значений (λ) матрицы перехода системы на комплексной плоскости

Окружность обозначает границу устойчивости (|λ|=1), наличие точек за пределами круга (красный цвет) свидетельствует о неустойчивости состояния системы.

Критические моды системы (|λ| ≥ 0,95):

- λ(1) = -2,256627 +0,000000i, |λ| = 2,256627, растущая мода (неустойчивость)
- λ(2) = -0,478774 +1,029821i, |λ| = 1,135674, растущая мода (неустойчивость)
- λ(3) = -0,478774 -1,029821i, |λ| = 1,135674, растущая мода (неустойчивость)

Каждое λ(i) соответствует определённому «режиму» поведения системы:

λ(1) = -2,256627 +0,000000i, |λ| = 2,256627: Экспоненциальный рост с чередованием знака (отрицательное вещественное число)

λ(2) = -0,478774 +1,029821i, |λ| = 1,135674: Растущие колебания с периодом ~3 шага

λ(3) = -0,478774 -1,029821i, |λ| = 1,135674: Растущие колебания с периодом ~3 шага

λ(4) = 0,945577 +0,000000i, |λ| = 0,945577: Медленное затухание

λ(5) = -0,757549 +0,000000i, |λ| = 0,757549: Затухание

λ(6) = 0,316553 +0,516521i, |λ| = 0,605805: Затухающие колебания

λ(7) = 0,316553 -0,516521i, |λ| = 0,605805: Затухающие колебания

λ(8) = -0,187555 +0,000000i, |λ| = 0,187555: Быстрое затухание

Критические моды важны, потому что определяют долгосрочное поведение системы. Если есть собственные значения с |λ| > 1, то система неустойчива.

В данном случае все три критические моды имеют |λ| > 1, поэтому система неустойчива. Спектральный радиус ρ(A) составляет 2,256, что существенно превышает критическое значение, равное 1 (рсунок 3).

Это означает, что внутренние возмущения в системе не будут затухать, а экспоненциально усиливаться со временем, препятствуя возвращению системы в равновесное состояние. Показатель Ляпунова (для дискретной системы):

$$\mu = \ln(\rho) = \ln(2{,}256) = 0{,}813$$

Положительный показатель Ляпунова – система неустойчива. Оценка устойчивости по Лапласу:

- 3 моды с |λ| > 1 → система неустойчива;
- 5 мод с |λ| < 1 → частично затухающие компоненты.

Для понимания источников нестабильности был рассчитан годовой индекс как среднее арифметическое абсолютных процентных изменений всех показателей (таблица 3). Пик индекса приходится на 2021 год (12,05).

Таблица 3 – Среднегодовое абсолютное изменение показателей (%)

Год	N (млн чел.)	H (м²/чел)	P (тыс. руб./м²)	G (трлн руб.)
2015	1,13	3,68	-10,53	7,60
2016	0,79	-1,24	5,88	15,72
2017	1,04	1,08	11,90	7,76
2018	1,03	6,04	7,09	12,45
2019	0,76	6,37	6,62	6,71
2020	-0,03	5,04	11,18	2,70
2021	5,68	6,75	14,53	21,07
2022	0,64	-11,94	-3,90	14,24
2023	0,48	3,67	16,24	17,13
|Среднее| за период	1,31	5,09	9,76	11,71

Источник: рассчитанные автором значения по данным таблицы 1

Результаты моделирования показывают, что показатель G (валовой региональный продукт) является не только наиболее волатильным, но и одним из наименее прогнозируемых в рамках линейной модели (MAPE = 4,84 %), что подчёркивает его роль как ключевого источника неопределённости и дестабилизации для всей системы. Показатель P (стоимость жилья) также демонстрирует высокую волатильность, но слабую связь с другими показателями (коэффициент при G(t-1) = 0,025, G(t-2) = 0,050), при этом сильно зависит от динамики населения и собственного лага P(t-2).

Обсуждение

Полученные результаты, особенно вывод о структурной неустойчивости системы, имеют прямое отношение к практике территориального планирования и экономического регулирования. Для трансформации этих выводов в механизмы управления необходимо учитывать два ключевых фактора: инерционность системы и ограниченность рычагов прямого административного воздействия на преимущественно частные рынки недвижимости через систему девелопмента. В этих условиях основными публичными инструментами остаются стратегическое планирование (генплан, ПЗЗ) и институт выдачи разрешений на строительство.

Выявленная неустойчивость системы означает, что традиционный подход, при котором изменения в управлении следуют за сложившейся рыночной конъюнктурой, становится серьёзной проблемой. Он может усиливать положительные обратные связи и вести к формированию «пузырей».

Таким образом, инструменты планирования должны использовать упреждающее воздействие для повышения системной устойчивости. Результаты моделирования указывают на возможные «узкие места» для такого воздействия.

Прежде всего, механизмы выдачи разрешений и корректировки ПЗЗ должны быть направлены на формирование территориальной структуры со смешанной застройкой. Закрепление квот на объекты социальной инфраструктуры и малого бизнеса создаст внутренние «запасы прочности», снижая зависимость территории от глобальных экономических колебаний (G), смягчая волатильность рынка жилья (P) и способствуя формированию устойчивой городской среды. Перевод земель под застройку должен быть неразрывно увязан в документах планирования с опережающим развитием транспортной, социальной и инженерной инфраструктуры.

Высокая инерционность строительного и инвестиционного циклов делает проведённый структурный анализ особо ценным. Заключение о текущей неустойчивости – это сигнал для принятия превентивных мер сейчас, чтобы смягчить потенциальные кризисные явления в будущем. Мониторинг устойчивости с помощью представленных в статье методов построения динамических моделей следует рассматривать как регулярную практику при актуализации документов территориального планирования. В этой связи выводы о фундаментальной неустойчивости территориальной социально-экономической системы Московского региона обращают внимание на аспекты возможного расширения подходов к управлению территориями.

Ключевая проблема управления, на наш взгляд, заключается ещё и в том, что Москва и Московская область, являясь разными субъектами управления, образуют единое экономическое пространство, что и обусловило объединение их показателей социально-экономического развития (см. таблицу 1). Объединённая модель, построенная на совокупных данных, способна выявить глобальные системные риски. Для выработки превентивных управленческих решений для каждого из субъектов управления можно провести декомпозицию полученной модели:

- по отдельным направлениям: расширить перечень показателей и провести углублённый анализ парных связей (например, «стоимость жилья – ввод жилья») для точечного регулирования;

- по территориальной принадлежности: выделение вклада каждого субъекта в общую волатильность ключевых показателей (например, G, P).

Заключение

Проведённый спектральный анализ устойчивости территориальной социально-экономической системы Московского региона на основе модели VAR(2) позволил сделать следующие выводы:

1. Система характеризуется структурной неустойчивостью (спектральный радиус $\rho = 2{,}256 > 1$), что указывает на экспоненциальное усиление внутренних возмущений. Это не временное состояние, а свойство системы в рассматриваемый период.

2. Ключевыми дестабилизирующими факторами системы является высокая независимая волатильность валового регионального продукта (G) и цен на жилье (P). Влияние валового регионального продукта (G) на цену жилья (P) в краткосрочном периоде является слабо положительным (коэффициенты 0,025 для лага 1 и 0,050 для лага 2), что указывает на незначительный стимулирующий эффект со стороны экономического роста на стоимость жилья в Московском регионе.

3. Для градостроительной практики полученные результаты подчёркивают необходимость смены парадигмы управления от реактивной к упреждающей. Основные публичные инструменты – территориальное планирование: генплан, правила землепользования и застройки (ПЗЗ) и разрешительная система – должны быть нацелены на стратегическое повышение устойчивости, а не на фиксацию рыночной конъюнктуры.

Практические рекомендации, вытекающие из исследования, заключаются в необходимости:

- внедрения системы мониторинга устойчивости на основе динамических моделей как обязательного этапа при обновлении документов территориального планирования;

- разработки адаптивных градостроительных регламентов, которые автоматически ужесточают требования к смешанности застройки, социальным и инфраструктурным квотам при росте индексов системной нестабильности;

- смещения фокуса при перераспределении земель в сторону создания полицентричной, инфраструктурно-обеспеченной городской среды, что напрямую повышает «вершинную целостность» [15] и устойчивость территориальной системы к экономическим шокам, что соответствует принципам моделирования пространственного развития территорий [13; 16];

- усиления прогнозно-аналитической составляющей в работе органов, ответственных за выдачу разрешений на строительство и корректировку ПЗЗ, с учётом выявленных долгосрочных рисков.

Таким образом, математический анализ предоставляет не только карту рисков, но и конкретные ориентиры для трансформации управленческих механизмов. Учёт прогнозных сигналов и инерционности системы позволяет использовать инструменты планирования и регулирования как превентивную меру для формирования более устойчивой динамики территориального развития.

Список источников:

1. Ускова, Т. В. Управление устойчивым развитием региона / Т. В. Ускова. – Вологда : Вологодский научный центр Российской академии наук, 2009. – 355 с. – ISBN 978-5-93299-150-3. – EDN QDFWAD.

2. Новосельцева, Г. Б. Устойчивость территориальных систем в контексте экономических показателей / Г. Б. Новосельцева, И. В. Палаткин, Н. В. Рассказова // МИР (Модернизация. Инновации. Развитие). – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 467-483. – DOI 10.18184/2079-4665.2023.14.3.467-483. – EDN ANYKSI.

3. Yakovenko, I. V. Economic-mathematical Models for Analyzing the Potential for Self-Development of Territorial Systems / I. V. Yakovenko, E. D. Streltsova, V. D. Komissarov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : 2020 International Science and Technology Conference on Earth Science, ISTCEarthScience 2020, Vladivostok, 06–09.10.2020. – IOP Publishing Ltd: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 062073. – DOI 10.1088/1755-1315/666/6/062073. – EDN DDMOZR.

4. Evaluating the dynamic sustainability and resilience of a hybrid urban system: case of Chengdu, China / Yu. Mou, Yu. Luo, Z. Su [et al.] // Journal of Cleaner Production. – 2021. – Vol. 291. – P. 125719. – DOI 10.1016/j.jclepro.2020.125719. – EDN KENJAL.

5. Sheikholeslami, R. Network complexity and stability in environmental systems: a graph theoretic perspective / R. Sheikholeslami, A. Kaveh // International journal of optimization in civil engineering. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 131-140.

6. Dragicevic, A. Z. Achieving sustainability through reform propagation in weighted socio-ecological multiplex systems / A. Z. Dragicevic, Ja. F. Shogren // Environment Systems & Decisions. – 2025. – Vol. 45, No. 1. – P. 3. – DOI 10.1007/s10669-024-09993-8. – EDN LVDIGM.

7. Караева, В. А. Устойчивость развития региональных систем в условиях перехода к экономике знаний / В. А. Караева, С. В. Бычкова, В. Ю. Штык // Новые технологии. – 2020. – Т. 16, № 6. – С. 99-105. – DOI 10.47370/2072-0920-2020-16-6-99-105. – EDN ENMFGN.

8. Магергут, В. З. Формализация и анализ дискретных организационно-технологических систем со структурированными агентами на индикаторных сетях / В. З. Магергут, В. Г. Рубанов, А. В. Чуев. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – 149 с. – ISBN 978-5-361-00445-4. – EDN ZAHTDP.

9. Kilian, L. New introduction to multiple time series analysis, by Helmut Lutkepohl, Springer, 2005 / L. Kilian // Econometric Theory. – 2006. – Vol. 22, No. 5. – P. 961-967. – DOI 10.1017/S0266466606000442. – EDN HWFRML.

10. Болячин, Ю. В. Оценка неоднородности динамики инвестиций в отраслевом разрезе / Ю. В. Болячин, С. В. Солодовников // XIII Экономические чтения: Глобальные вызовы и векторы регионального социально-экономического развития : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 23–25 ноября 2023 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2023. – С. 45-50. – EDN KIKTOP.

11. Verma, P. Stability and dynamics of a spectral graph model of brain oscillations / P. Verma, S. Nagarajan, A. Raj // Network Neuroscience. – 2023. – Vol. 7, No. 1. – P. 48-72. – DOI 10.1162/netn_a_00263. – EDN PGWZCR.

12. Yeh, A. G.O. Urban simulation using neural networks and cellular automata for land use planning / A. G.O. Yeh, X. Li // Richardson, D.E., van Oosterom, P. (eds) Advances in Spatial Data Handling. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. – DOI: 10.1007/978-3-642-56094-1_33.

13. Yeh, A.G.O. Cellular Automata Modeling for Urban and Regional / A.G.O. Yeh, X. Li, C. Xia // Shi, W., Goodchild, M.F., Batty, M., Kwan, MP., Zhang, A. (eds) Urban Informatics. The Urban Book Series. – Springer, Singapore, 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-8983-6_45.

14. Планирование устойчивой городской мобильности : Учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-44 01 01 «Организация перевозок и управление на автомобильном и городском транспорте», 1-44 01 02 «Организация дорожного движения», 1-44 01 06 «Эксплуатация интеллектуальных транспортных систем на автомобильном и городском транспорте» / А. О. Лобашов, С. С. Семченков, Е. Н. Кот [и др.]. – Минск : Белорусский национальный технический университет, 2022. – 175 с. – ISBN 978-985-583-870-9. – EDN IZRTRK.

15. Быкова, В. В. Программные средства анализа отказоустойчивости технических систем на основе вершинной целостности графа / В. В. Быкова, Ю. И. Кириллов // Программные продукты и системы. – 2015. – № 3. – С. 161-165. – EDN UIBPPP.

16. Иджитканлар, Т. Устойчивость искусственного интеллекта: взгляд урбаниста сквозь призму концепции умного и устойчивого города / Т. Иджитканлар, Ф. Кугурульо // Городские исследования и практики. – 2022. – Т. 7, № 1. – С. 35-64. – DOI 10.17323/usp71202235-64. – EDN UKPEBS.

Статья поступила в редакцию / Received: 12.01.2026
Доработана после рецензирования / Revised: 02.02.2026
Принята к публикации / Accepted: 02.03.2026