Оригинальная статья
УДК 325.111:338

Стратегирование развития городских урбосистем на основе мультифрактальной динамики

С. М. Никоноров[1], А. И. Кривичев[2], А. Н. Насонов[3], И. В. Цветков[4]

[1,2]Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

[3]Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

[4]Тверской государственный университет, Тверь, Россия

[1]nico.73@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8205-2140

[2]krivichev@live.ru; https://orcid.org/0000-0002-4971-5264

[3]adn22@yandex.ru

[4]mancu@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5284-880X

Аннотация: В данной работе был рассмотрен алгоритм анализа территориальной организации урбосистем, который заключается в направленном зонировании территории и выделении зон сбалансированности и диспропорций. Анализ проводился через сравнение полученных решений территориально-коммуникационной модели с фрактальным эталоном как показателем наиболее эффективной организации городской территории с точки зрения коммуникативной связности базовых инфраструктур жизнеобеспечения. В результате выявили территориальные диспропорции городской среды, т. е. рисковые зоны, нарушающие устойчивость городской урбосистемы в целом и требующие внешнего управления.

Ключевые слова: самоорганизация, неравновесные системы, управление, городские урбосистемы, стратегия развития, устойчивость системы, мультифрактальная динамика

Цитирование: Стратегирование развития городских урбосистем на основе мультифрактальной динамики / С. М. Никоноров [и др.] // Стратегирование: теория и практика. 2022. Т. 2. № 3. С. 360–376. https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

Поступила в редакцию 10.09.2022. Прошла рецензирование 16.09.2022. Принята к печати 17.09.2022.

© 2022. The Author(s). This article is distributed under the terms of the CC BY 4.0 International License

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

СТРАТЕГИРОВАНИЕ:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
2022. Том 2. № 3

original article

Development Strategizing of Urban Systems Based on Multifractal Dynamics

Sergey M. Nikonorov[1], Alexander I. Krivichev[2], Andrey N. Nasonov[3], Ilya V. Tsvetkov[4]
[1,2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[3]Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
[4]Tver State University, Tver, Russia
[1]nico.73@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8205-2140
[2]krivichev@live.ru; https://orcid.org/0000-0002-4971-5264
[3]adn22@yandex.ru
[4]mancu@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5284-880X

Abstract: This article introduces a new analysis algorithm that can be applied to territorial organization of urban systems. After directed zoning, the zones are divided into those of balance and those of disproportions. The obtained solutions of the territorial-communication model are compared with a fractal standard, which serves as an indicator of the most effective urban organization in terms of the basic life support infrastructures and their communications. The algorithm makes it possible to reveal territorial disproportions of the urban environment, i.e., risk areas that violate the stability of the urban system as a whole and require external management.

Keywords: self-organization, non-equilibrium systems, management, urban systems, development strategy, system stability, multifractal dynamics

Citation: Nikonorov SM, Krivichev AI, Nasonov AN, Tsvetkov IV. Development Strategizing of Urban Systems Based on Multifractal Dynamics. Strategizing: Theory and Practice. 2022;2(3):360–376. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

Received 10 September 2022. Reviewed 16 September 2022. Accepted 17 September 2022.

基于多重分形动力学的城市城镇体系（urban system）发展战略及其稳定性评估

尼科诺罗夫·谢·米[1]，克里维切夫·阿·伊[2]， 纳索诺夫·阿·尼[3]，茨维特科夫·伊·瓦[4]
[1,2]莫斯科罗蒙诺索夫国立大学，俄罗斯莫斯科
[3]莫斯科国立大地测量和制图大学，俄罗斯莫斯科
[4]特维尔国立大学，俄罗斯特维尔
[1]nico.73@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8205-2140
[2]krivichev@live.ru; https://orcid.org/0000-0002-4971-5264
[3]adn22@yandex.ru
[4]mancu@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5284-880X

摘要：本文提出了一种分析城镇体系地域组织的算法，其中包括地域的定向划区以及判断均衡和非均衡地带。分析是通过比较所获得的地域互联互通模型解决方案与分形标准来进行的，分形标准是基本生活保障基础设施互联互通方面有效组织城市地域的指标。研究结果显示了城市环境的地域不均衡性，即存在破坏整个城市系统稳定性并需要外部管理的风险地带。

关键词：自组织、非均衡系统、管理、城市的城镇体系、发展战略、系统稳定性、多重分形动力学

编辑部收到稿件的日期：2022年9月10日 评审日期：2022年9月16日 接受发表的日期：2022年9月17日

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

Таблица 1. Обзор фрактального описания урбанизированных территорий как активных самоорганизующихся систем

Table 1. Fractal description of urban areas as active self-organizing systems

Цели и задачи устойчивого развития	Возможности территориально-коммуникационной модели урбосистем на основе мультифрактальной динамики
ЦУР 8 – Содействие устойчивому экономическому росту, обеспечение производительной занятости населения и выбора рабочих мест	Выбор поселенческих структур со сходными фрактальными показателями (морфологией), территориальная агломерация которых целесообразна и сможет привести к повышению экономической устойчивости и созданию новых предприятий и рабочих мест (мест приложения труда населения и его обслуживания).
ЦУР 9 – Развитие устойчивой инфраструктуры, включая региональную и транспортную, для поддержки экономического развития и благополучия людей	Оценка устойчивости инфраструктур жизнеобеспечения урбанизированных территорий на основе уклонения фрактальной меры соотношения насыщенность – связность от оптимума, при котором развитость инфраструктуры урбосистемы и объем выбора населением объектов жизнеобеспечения максимальны.
ЦУР 11 – Обеспечение безопасности, жизнестойкости и экологической устойчивости городов и населенных пунктов	Учет сбалансированности градообразующих и природоохранных форм землепользования, позволяющий сформировать комфортную и экологически безопасную среду жизнедеятельности.

ВВЕДЕНИЕ

При разработке стратегии развития территорий необходимо уделять особое внимание вопросам сохранения среды жизнедеятельности и возможностей ее хозяйственно-экономического развития. Актуальным становится поиск новых подходов к пониманию территории как активной, функционально целостной урбосистемы, воспроизводящей себя на различных уровнях организации и сохраняющей стабильность развития в изменяющихся условиях внешней среды.

Возможность управления развитием сложноорганизованных урбосистем связана с решением задач формализации каркасно-тканевой модели А. Э. Гутнова применительно к современным экономическим условиям[1]. Разработка стратегии территориального развития может совмещать как классическую теорию стратегирования В. Л. Квинта, так и новые подходы к стратегированию с использованием ESG-трансформации территорий (регионов и городов)[2,3].

В настоящей работе предлагается использовать новый математический инструмент описания территориально-коммуникационной модели урбосистемы на основе фрактала – самоподобной структуры, имитирующей развитие урбосистемы как устойчивой функциональной целостности базовых инфраструктур жизнеобеспечения. Это позволяет решить целый ряд актуальных задач устойчивого развития территорий (табл. 1)[4].

М. Бэтти предлагал рассматривать пространственную морфологию при изучении самоорганизации урбосистем[5]. Он обосновал, что

[1] Баевский О. А. Территориальное планирование и проектирование на основе исследования пространственной структуры города: курс лекций. Высшая школа урбанистики имени А. А. Высоковского, 2016.

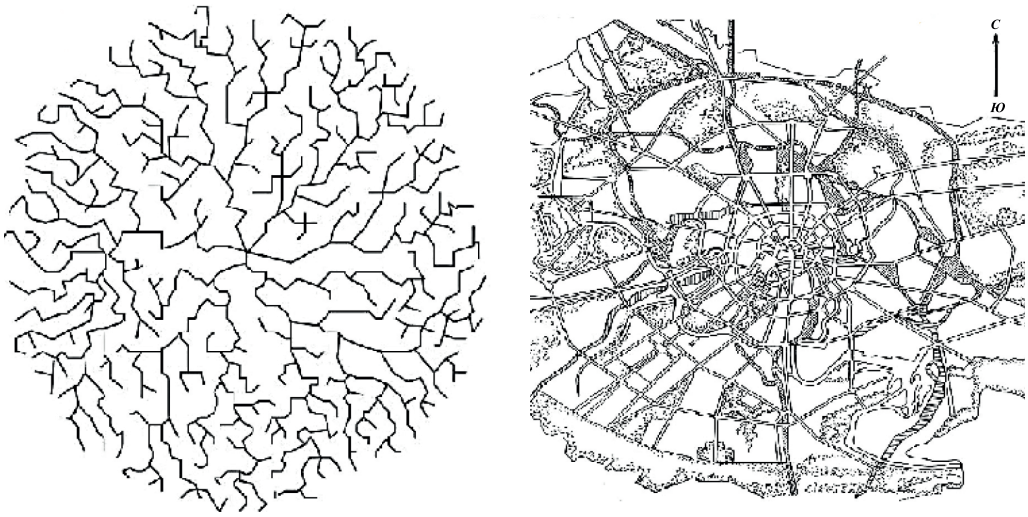
[2] Квинт В. Л., Новикова И. В., Алимурадов М. К. Согласованность глобальных и национальных интересов с региональными стратегическими приоритетами // Экономика и управление. 2021. Т. 27. № 11. С. 900–909. https://doi.org/10.35854/1998-1627-2021-11-900-909

[3] Никоноров С. М., Папенов К. В., Талавринов В. А. Инновационные подходы перехода бизнеса к ESG-стратегиям (российский и зарубежный опыт) // Стратегирование: теория и практика. 2022. Т. 2. № 1. С. 49–56. https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-1-49-56

[4] Никоноров С. М. От стратегии социально-экономического развития к стратегии устойчивого развития регионов России // Менеджмент и бизнес-администрирование. 2016. № 4. С. 28–35.

[5] Batty M. Building a science of cities // Cities. 2012. Vol. 29. P. S9–S16. https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.008

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376



a b

Рис. 1. Сходство фрактального кластера Виттена-Сандера (DLA) (a) и городской инфраструктуры (b)

Fig. 1. Witten-Sander (DLA) fractal cluster (a) vs. urban infrastructure (b)

самоорганизация городских пространственных структур может происходить в том случае, если они самоподобны, т. е. воспроизводят (репродуцируют) себя на разных уровнях организации. Иерархии, порождаемые этими структурами, описываются математическим фракталом.

Важным обстоятельством является тот факт, что только в нелинейной урбосистеме возможна самоорганизация: чем выше ее нелинейность, тем сложнее сохранить функциональную целостность (коммуникативную связность) урбосистемы как единого развивающегося объекта. Другими словами, урбосистема имеет пределы своего усложнения, при достижении которых происходит стагнация и последующее упрощение – вырождение урбосистемы и снижение эффективности использования территории.

Город в своем естественном развитии заполняет геопространство тем же образом, каким фрактал заполняет евклидово пространство в целочисленных измерениях[6]. Наглядным примером этого является модель Виттена-Сандера (Diffusion-limited aggregation, DLA), основу которой составляет понятие масштабно-инвариантного множества с самоподобной структурой.

Модель DLA формально описывает сборку фрактальных кластеров – физических объектов, плотность которых увеличивается по мере их роста. Динамика роста фрактальных кластеров имеет процессуальное сходство с формированием городской инфраструктуры, обеспечивающей ее жизнеспособность: последняя максимально плотно заполняет геопространство без утраты функциональной целостности (коммуникативной связности) градообразующих компонентов. Тот же механизм заложен в процедуре сборки математического фрактала (рис. 1)[7].

Главной особенностью модели Виттена-Сандера является то, что по мере усложнения структуры фрактального кластера скорость его роста снижается до момента, когда плот-

[6] Структурная эволюция морфологии городской среды в историческом аспекте на примере Нижнего Новгорода / Е. В. Копосов [и др.] // Приволжский научный журнал. 2012. Т. 24. № 4. С. 138–144.

[7] Бабич В. Н., Колясников В. А. Фрактальные структуры в планировке и застройке города // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2009. № 2. С. 43–45.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

Таблица 2 Различие системных описаний объектов исследования

Table 2. System descriptions of research objects: comparative analysis

Атрибуты системного описания	Сложные (активные)	Простые (пассивные)
Вид обобщенных уравнений системного описания	$Y \sim X^{1-D}$ (степенная функция)	$Y \sim \int_{-\infty}^{+\infty} F(X)dX$ (интегральная функция)
Схема и предмет исследования	Морфология процессов самоорганизации (тип динамики) сложной системы и причин нарушения ее устойчивого развития по схеме «белого» ящика.	Множество решений, удовлетворяющих заданному критерию качества (целевой функции) по схеме «черного» ящика.
Характер решений	Оценка рисков уклонения развития сложной системы от оптимума и типа динамики, формирующейся в условиях действующих факторов.	Нахождение множества значений переменных, удовлетворяющих заданному критерию качества (целевой функции).

ность пространственного заполнения становится максимально возможной.

Применительно к задачам градостроительства фрактальный кластер является агрегированной совокупностью объектов городской инфраструктуры, выполняющих определенные функции жизнеобеспечения (социальные, транспортные, культурные, производственные, экономические)[8].

Агрегированный рост фрактального кластера ограничен значением $D = 1{,}71$. Это определяет максимальную плотность заполнения фракталом пространства, при которой сохраняется функциональная целостность (единство) среды жизнеобеспечения урбосистемы.

Таким образом, описание процессов и свойств самоорганизации урбосистем и сохранения жизнеспособности (устойчивости) территории требует смены концепции системного исследования, которая в качестве обобщенных уравнений оперирует не интегральной, а степенной функцией системного описания (табл. 2)[9].

Сложную урбосистему необходимо рассматривать как открытую диссипативную систему с проходящими через нее потоками вещества и энергии, которые отвечают за ее жизнеспособность.

Динамика развития определяется как чередование экстенсивных (имеющих внешнюю, экзогенную природу) и диссипативных (имеющих внутреннюю, эндогенную природу) факторов, влияющих друг на друга и составляющих суть процессов самоорганизации урбосистем[10,11].

В теоретическом плане динамика урбосистемы может описываться фрактальной мерой самоподобия составляющих инфраструктур, которая измеряется в интервале параметров $1 < D < 2$ и вычисляется на основе соотношения:

$$N(\delta) = (\mu\delta)^{1-D} \quad (1)$$

[8] Павлов Ю. В. Фракталы как инструмент территориального планирования агломерационных систем // Фундаментальные исследования. 2013. № 10–10. С. 2242–2248.

[9] Гостев М. В. Об эвристической природе моделей эволюционного городского развития // Городские исследования и практики. 2018. Т. 3. № 1. С. 7–22. https://doi.org/10.17323/usp3120187-22

[10] Иудин Д. И., Копосов Е. В. Фракталы: от простого к сложному. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2012. 183 с.

[11] Подлазов А. В. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности // Будущее прикладной математики. Лекции для молодых исследователей / под ред. Г. Г. Малинецкого. М.: Эдиториал УРСС, 2005. С. 404–426.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

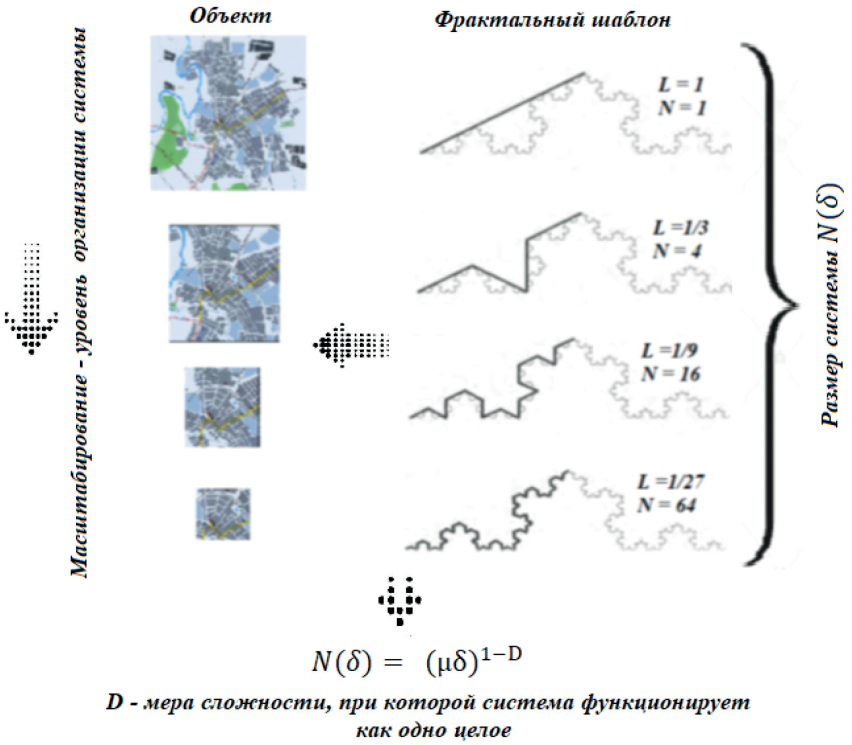


Рис. 2. Графическая иллюстрация фрактального описания урбосистемы

Fig. 2. Fractal description of the urban system: graphic illustration

где $N(\delta)$ – размер урбосистемы; $\mu\delta$ – шаг масштабирования; $D \in (1; 2)$ – фрактальная мера самоподобия урбосистемы.

Физический смысл фрактального описания сложной урбосистемы представлен на рисунке 2.

Основой описания служит базовое свойство фрактала – масштабная инвариантность или самоподобие целого и составных частей, которое имитируется фрактальным шаблоном при его декомпозиции. Фрактальное описание объекта – это нахождение статистического сходства (различия) между фрактальным шаблоном и реальным объектом. Поскольку каждый шаг итерации построения фрактальной кривой соответствует ранговой масштабируемости (иерархии) реального объекта, то оценка фрактальности урбосистемы сводится к ее воспроизводству через фрактальный шаблон, масштабированные копии которого в пределе исчерпывают геометрию объекта и сводятся к числу фрактальной размерности $D \in (1; 2)$.

$$D = \lim_{\delta \to 0} \frac{\log N(\delta)}{-\log(\delta)} \qquad (2)$$

где $N(\delta)$ – размер урбосистемы.

Этим числом на фрактальной шкале оценивается самоподобие составных частей и целого – это совокупность вложенных друг в друга по типу «матрешки» масштабированных копий урбосистемы, которые несут в себе признаки целой урбосистемы. На фрактальной шкале параметром D оценивается, насколько признаки целого объекта отображаются в декомпозированных составных частях. Это и определяет системную целостность городского пространства.

Сборка урбосистемы начинается «снизу», постепенно заполняя геопространство инфраструктурами жизнеобеспечения. Это сопро-

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

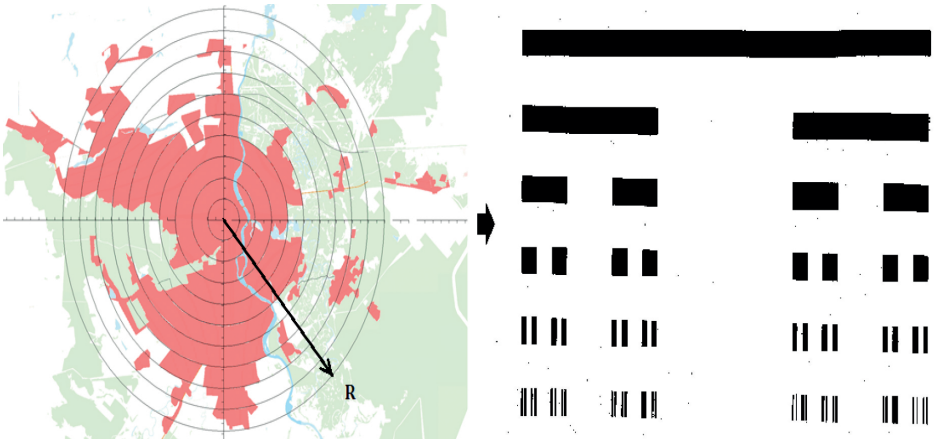


Рис. 3. Развертка городской урбосистемы в множество Кантора

Fig. 3. Urban system as the Kantor set

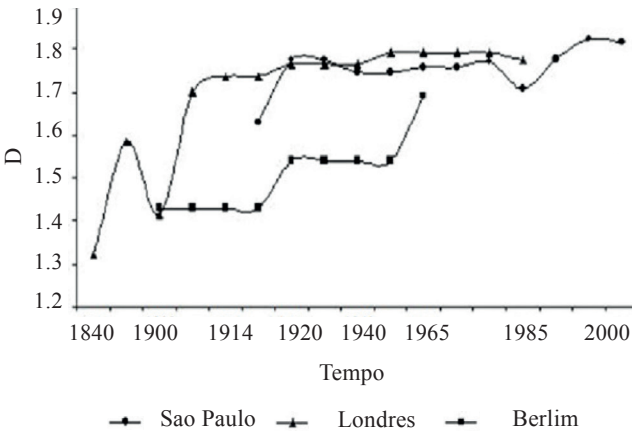


Рис. 4. Фрактальная динамика городских урбосистем

Fig. 4. Fractal dynamics of urban systems

вождается ростом населения, предпочитающего более комфортные условия проживания. Далее наступает оптимум, в котором все компоненты урбосистемы равномерно распределены по территории. Это состояние максимально развитой и коммуникативно связанной инфраструктуры города в пределах его административных границ.

Дальнейший рост плотности инфраструктур и населения может приводить к системному дисбалансу, в котором урбосистема стагнирует, если не происходит расширения ее пространственных границ и перераспределения в них структур жизнеобеспечения.

Такие перераспределения и есть процессы самоорганизации, направленные на оптимизацию структуры урбосистемы. Стагнация урбосистемы является признаком ее неустойчивости, когда утрачивается обратная связь со средой существования и урбосистема «вымирает» за короткое время.

Приведем пример оценки сбалансированности градостроительного пространства, реализованного на основе канторовского метода[12]. В этом случае фрактальность городского урболандшафта определяется через его развертку в канторовское множество, устанавливающее логарифмическую зависимость числа пересечений элементов анализируемой инфраструктуры с окружностями заданного радиуса (рис. 3).

Модель (1) преобразуется в нелинейную регрессию вида

$$M(R) = kR^h;\ \mathrm{h} = 2(D-1) \qquad (3)$$

где h – размерность блуждания; $M(R)$ – размер урбосистемы; (R) – радиус покрывающей объект окружности.

В случае работы с картографическим изображением минимальный и максимальный радиус окружности может выбираться исходя из уровней обслуживания населения: от 100 до

[12] Малков С. Ю. Социальная самоорганизация и исторический процесс: возможности математического моделирования. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

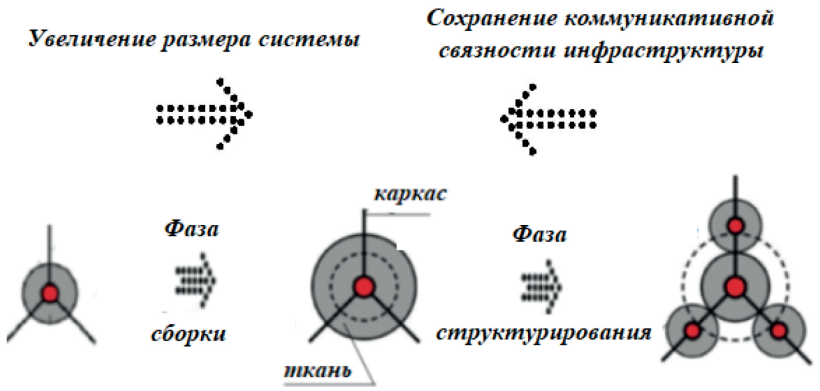


Рис. 5. Каркасно-тканевая модель городской урбосистемы А. Э. Гутнова

Fig. 5. A.E. Gutnov's frame-fabric model of the urban system

500 м – уровень микрорайона, 500–2000 м – уровень района, свыше 2000 м – общегородской уровень[13].

В этом случае возможные решения имеют следующую интерпретацию:

1. Если урбосистема характеризуется параметрами $h = 1; M(R) = R; D \to 1{,}5$, то такая ситуация наиболее безопасна и стабильна во времени и пространстве, занимаемого урбосистемой;
2. Если урбосистема характеризуется параметрами $0 < h < 2; 1 < M(R) < R^2; 1 < D < 2$, то для такой ситуации характерна самоорганизация возникающих экологических рисков, которыми можно управлять за счет различных мероприятий: градостроительных, экономических, технологических, организационных и пр.;
3. Если объект характеризуется параметрами $h = 2; M(R) = R^2; D \to 2$ или $h = 0; M(R) = 1; D \to 1$, то такая ситуация оказывается неустойчивой и нежизнеспособной. Это указывает на отсутствие в урбосистеме ресурсов развития.

Этот вывод подтверждается исследованиями эволюционной динамики современных мегаполисов, в которых плотность застройки городского пространства ограничена фрактальными параметрами $1{,}2 \pm 0{,}1 < D < 1{,}7 \pm 0{,}1$ (рис. 4[14])[15].

Представленные примеры демонстрируют способность фрактала описывать все множество ситуаций, характерных для градостроительного освоения геопространства. Главным условием сохранения жизнеспособности градостроительного пространства является недопустимость дифференциации составляющих инфраструктур, когда нарушается их коммуникативная связность. Это наглядно следует из рисунка 4, в котором рост различных городов не превышает порога инфраструктурного насыщения $D \to 1{,}7 \pm 0{,}1$, за которым следует нарушение их коммуникативной связности и невозможность управления социально-экономическими процессами развития.

Любая урбосистема представляет собой мультифрактал, характеризующийся не одной, а целым спектром фрактальных размерностей – каждая составляющая инфраструктуры вносит свой индивидуальный вклад в нелинейное увеличение системной сложности городской среды. Поэтому о сходстве реальной урбосистемы и моделирующего фрактала можно говорить лишь в статистическом смысле, т. е. мультифрактальный показатель может

[13] Балханов В. К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления. Улан-Удэ: Бурятский государственный университет, 2013. 224 с.

[14] Marques M. L., Ferreira M. C. Occupation density analysis for urban agglomeration growth of São Paulo metropolitan through fractal dimensions estimate // Geografia. 2006. Vol. 31. № 2. P. 293–316.

[15] Гущина Е. С., Смогунов В. В. Фрактальная размерность в оценке планировочной структуры крупного города // Современные научные исследования и инновации. 2016. Т. 58. № 2. С. 110–116.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

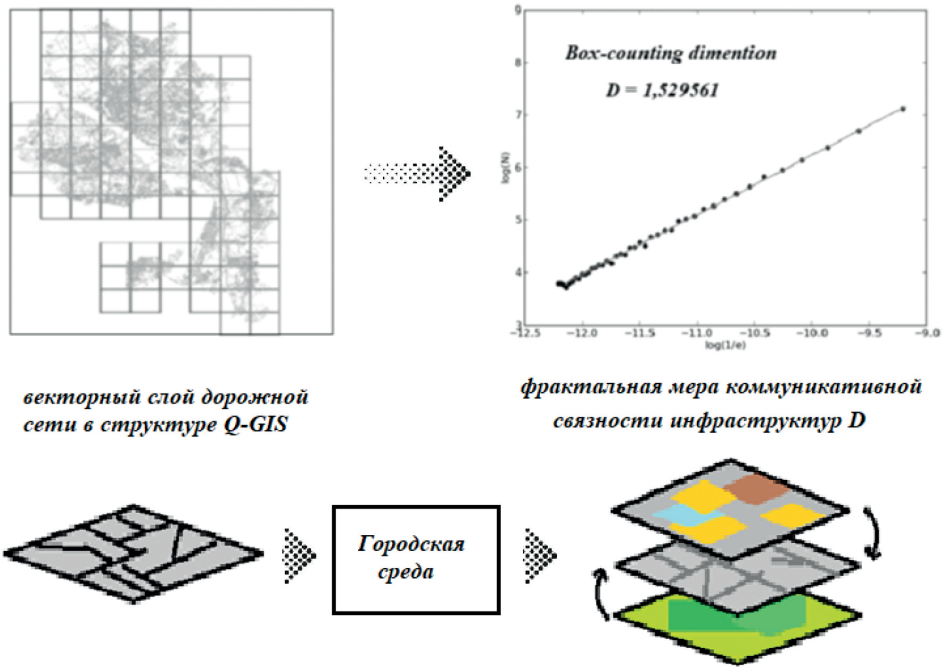


Рис. 6. Иллюстрация оценки фрактальности дорожной сети города методом box-counting dimension в структуре геоинформационной системы Q-GIS

Fig. 6. Fractality assessment of the city road network using the box-counting dimension method in the structure of the Q-GIS geographic information system

являться индикатором устойчивости городской урбосистемы в условиях действующих факторов.

Территориально-коммуникационная модель основана на том, что динамическое состояние городской урбосистемы проявляется в соотношении каркаса и ткани. Их соразмерность определяет различные фазы развития урбосистемы: увеличение мощности каркаса всегда сопровождается сохранением функциональной целостности урбосистемы[16].

С математической точки зрения урбосистема является сложной активной системой диссипативного типа, жизнеспособность которой обеспечивается сохранением социально-экономического цикла развития – чередованием фаз повышения мощности (насыщенности) каркаса (фазы сборки) и его пространственного рассредоточения (фазы структурирования или сохранения связности) (рис. 5).

Приведем пример оценки соразмерности насыщенность – связность для инфраструктуры дорожной сети города в структуре Q-GIS методом box-counting dimension[17].

Как отмечалось выше, динамика городской урбосистемы индицируется фрактальной мерой самоподобия, которая отображает соразмерность ее территориальной насыщенности и связности с другими инфраструктурами.

В структуре Q-GIS встроен плагин box-counting dimension, построенный на реализации соотношения

$$LogN(\varepsilon) = -DLog(\varepsilon) \qquad (4)$$

где D – фрактальная мера соотношения насыщенность – связность; $N(\varepsilon)$ – число квадратов,

[16] Marques M. L., Ferreira M. C. Occupation density analysis…
[17] Гостев М. В. Об эвристической природе моделей…

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

Таблица 3. Характеристические фрактальные показатели соотношения факторов насыщенность – связность

Table 3. Saturation vs. connectivity: fractal indicators of the ratio

Характеристические фрактальные показатели	Физическая интерпретация предельных состояний урбосистемы
$D = 1{,}5 \pm 0{,}1$ Эталон сбалансированности урбосистемы	Баланс соотношения насыщенность – связность, соответствующий максимально развитой инфраструктуре урбосистемы, при которой объем выбора населением объектов жизнеобеспечения максимален.
$D = 1{,}2 \pm 0{,}1$ Истощение ресурса и утрата обратной связи с внешней средой	Нижний предел дисбаланса соотношения насыщенность – связность, отвечающий утрате коммуникативной связности территорий урбосистемы. Такое состояние урбосистемы отвечает минимально возможному объему выбора населением инфраструктур жизнеобеспечения и является нежизнеспособным.
$D = 1{,}7 \pm 0{,}1$ Стагнация развития с последующей бифуркацией урбосистемы	Верхний предел дисбаланса соотношения насыщенность – связность, отвечающий предельной плотности (сжатию) урбосистемы, при котором она становится бистабильной (неустойчивой). Отсутствие свободных территорий делает невозможным дальнейшее развитие, а объем выбора населением инфраструктур жизнеобеспечения резко сокращается, что делает урбосистему нежизнеспособной

покрывающих выделенный слой; (ε) – варьируемый масштаб решетки покрытия.

Наклон графика $LogN(\varepsilon)$ от $Log(\varepsilon)$ дает фрактальную меру D – область масштабов (скейлинга), в которой обеспечивается самоподобие (соразмерность) соотношения насыщенность – связность.

Для дорожной сети это показатель меры территориальной плотности дорог, при которой сохраняется коммуникативная связность других инфраструктур жизнеобеспечения города (рис. 6).

Все множество состояний урбосистемы отображается в фазовом пространстве и определяется конкурентным взаимодействием базовых факторов (F1; F2). F2 – фактор, направленный на городские территории и отвечающий за рост ее насыщенности населением или объектами инфраструктур. F1 – фактор структурирования, направленный на периферийную зону и отвечающий за сохранение коммуникативной связности территории с населением и местами приложения его труда и обслуживания[18].

Переход к факторным переменным задает следующую систему ограничений территориально-коммуникационной модели на фрактальной шкале $1 < D < 2$ (табл. 3).

Как следует из таблицы 3, урбосистема обладает двумя пределами устойчивости, при достижении которых она переходит в режим бистабильности. Это наиболее опасное состояние урбосистемы, поскольку в нем она становится наиболее чувствительной к действию случайных факторов, инициирующих катастрофу (разрушение естественного цикла развития). Естественным выходом из такой ситуации является пространственное структурирование – встраивание в структуру города периферийных территорий, которые будут составлять с ним единую агломерационную целостность.

Здесь фрактальный подход к урбосистеме позволяет оценить возможность создания новой

[18] Гутнов А. Э. Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития // Системные исследования. Методологические проблемы / под ред. Д. М. Гвишиани. М.: Наука, 1986. С. 211–232.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

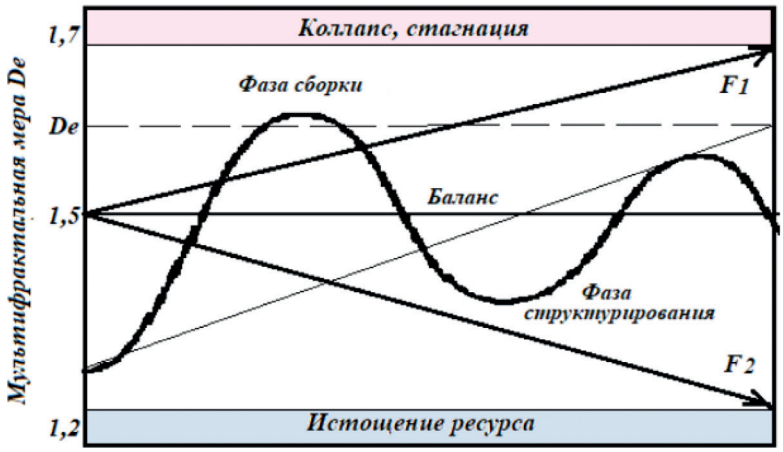


Рис. 7. Графическое представление территориально-коммуникационной модели урбосистемы на основе мультифрактальной динамики

Fig. 7. Territorial-communication urban system model based on multi-fractal dynamics

агломерационной целостности: эффективней всего интегрировать между собой те территории, которые имеют сходную структуру и морфологию, т. е. обладают изоморфизмом. Для сохранения устойчивости новой агломеративной целостности необходимо обеспечить соразмерность базовых факторов, которая достигается в интервале фрактальных параметров урбосистемы $1{,}2 < D < 1{,}7$.

Такая инфраструктура способствует улучшению связности территорий существующей застройки – «сшиванию» городской ткани в единую урбосистему в пределах ее административных границ[19]. Чем ближе значение расчетного индикатора к предельным значениям, тем хуже условия «сшивания» городской ткани в единую урбосистему и тем более выражена ее бистабильность (неустойчивость)[20,21].

Таким образом, территориально-коммуникационную модель урбосистемы на основе мультифрактальной динамики можно представить соотношениями

$$D_e = \sum_{j=1} aijFj(D^+; D^-); 1{,}2 \le D_e \le 1{,}7 \quad (5)$$

$$I_f = |1{,}5 - D_e| \quad (6)$$

где D_e – мультифрактальный показатель урбосистемы; I_f – индекс устойчивости урбосистемы или мера дисбаланса соотношения насыщенность – связность; $Fj(D^+; D^-)$ – локальные фрактальные показатели процессов, обусловленные действующими факторами; a_{ij} – весовые коэффициенты действующих факторов.

Соотношения (5)-(6) интерпретируются следующим образом: жизнеспособность урбосистемы определяется уклонением ее мультифрактального показателя от оптимума ($D_e = 1{,}5$): чем выше это уклонение, тем сильнее конкретные факторы угнетают жизнеспособность урбосистемы и тем сильнее выражена диспропорция соотношения насыщенность – связность. Сохранение социально-экономического цикла развития урбосистемы обеспечивается максимальным ($D_e = 1{,}7$) и минимальным ($D_e = 1{,}2$) значениями уклонений, являющимися предельно-допустимыми значениями экологической нагрузки (ПДЭН): $D_e \to (1{,}2 \vee 1{,}7)$.

Уравнения (5)-(6) определяют самоорганизацию процессов урбосистемы как чередование конкурирующих фаз повышения насыщенности (сборки) и обеспечения связности (структурирования) (рис. 7).

[19] Фрактальный подход к оценке управляемости геоэкологическими рисками / В. В. Кульнев [и др.] // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2019. Т. 13. № 4. С. 101–111.

[20] Marques M. L., Ferreira M. C. Occupation density analysis…

[21] Гутнов А. Э. Системный подход в изучении города…

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

Таблица 4. Классы процессов и риски развития урбосистем

Table 4. Classes of processes and development risks in urban systems

Классы процессов	Антропогенные риски
Детерминированные (случайные)	Низкий
Самоорганизованные (фрактальные)	Приемлемый
Бистабильные (неустойчивые)	Высокий
Хаотичные (катастрофные)	Предельно высокий

Фаза сборки урбосистемы $1{,}2 \leq D < 1{,}5$ (количественный рост ткани урбосистемы). На этом этапе динамическое поведение урбосистемы определяется положительными обратными связями, за счет чего воспроизводится ткань. Воспроизводство ткани в процессе территориального роста эффективно до тех пор, пока структурно-функциональный потенциал системы, обеспеченный каркасом, позволяет эффективно функционировать всей урбосистеме.

Когда ресурсы роста урбосистемы исчерпываются, то проявляются нарушения в функционировании инфраструктур жизнеобеспечения, т. е. возникает дисбаланс соотношения насыщенность – связность. Например, с увеличением размеров системы транспортная нагрузка начинает создавать препятствия в осуществлении ежедневных потребностей горожан. В итоге темпы роста замедляются: урбосистема переходит в то состояние, когда дальнейшее развитие невозможно без структурирования.

Фаза структурирования урбосистемы $1{,}5 \leq D < 1{,}7$ (компенсация возникших диспропорций соотношения насыщенность – связность). Поведение системы в этой фазе обеспечивается отрицательными обратными связями. Наиболее простой и эффективной формой компенсации диспропорций между мощностью каркаса и размером системы является пространственное рассредоточение каркаса. В результате в урбосистеме сохраняется потенциал, необходимый для последующего развития – повторения цикла.

Описание морфологии урбосистемы становится возможным при переходе исчислений на фрактальную шкалу, в которой оценивается самоподобие конкурирующих процессов, обеспечивающих функциональную целостность городской урбосистемы.

Классификация процессов социально-экономического развития урбосистемы по рискам наступления катастроф, трактуемых как разрушение цикла развития, может быть определена следующим образом (табл. 4).

Каждому классу процессов развития урбосистемы можно противопоставить экологический риск как вероятность наступления катастрофы

$$R_e\,(0{,}1) = D_e * Q = \begin{pmatrix} R_e \to 1, \text{если } De \to (1{,}2 \vee 1{,}7) \\ R_e \to 0, \quad \text{если } De \to 1{,}5 \\ 0 < R_e < 1, \text{если } (1{,}2 < De < 1{,}7) \\ R_e = 1, \quad \text{если } De > 1{,}7 \end{pmatrix} \quad (8)$$

где R_e (0,1) – вероятность риска; Q – предполагаемая величина ущерба от наступления катастрофы.

Территориально-коммуникационная модель на основе мультифрактальной динамики идентифицирует параметры определенного типа поведения урбосистемы, отвечающие сложившемуся метаболизму с окружающей средой. Главным критерием эффективности этого метаболизма является взаимосвязь насыщенность – связность, которая подчиняется механизмам самоорганизации, свойственным сложным системам[22].

Структура цикла, обеспечивающая воспроизводство ресурса урбосистемы, определяется положительными обратными связями, увеличивающими насыщенность инфраструктур, что повышает привлекательность территории и

[22] Воробьев Ю. Л., Малинецкий Г. Г., Махутов Н. А. Управление риском и устойчивое развитие. Человеческое измерение // Общественные науки и современность. 2000. № 6. С. 150–162.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

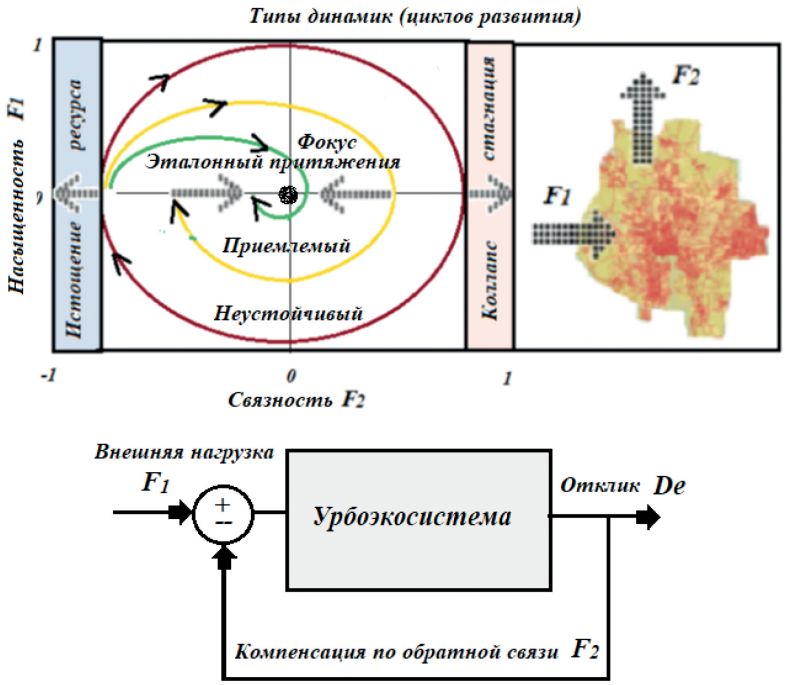


Рис. 8. Типы динамик и направленность процессов развития урбанизированных сред в фазовом пространстве

Fig. 8. Urbanized environments in the phase space: types of dynamics and development processes vectors

Таблица 5. Множество решений территориально-коммуникационной модели и их интерпретация

Table 5. Territorial-communication model: solutions and interpretations

Множество решений территориально-коммуникационной модели	Интерпретация решений (прогнозные типы динамик развития урбосистемы)
$D_e \to 1{,}5$; $I_f \to 1$; $R_e \to 0$ Эталонный тип динамики	Наиболее благоприятная динамика урбосистемы, при которой развитость инфраструктур и объем выбора населением объектов жизнеобеспечения максимален из-за их равномерного распределения в территориальных границах. Это замкнутый устойчивый цикл, при котором ресурс среды полностью сохраняется. Поэтому решение является эталоном устойчивости, с которым сравнивается эффективность организации территории.
$1{,}2 < D_e < 1{,}7$; $0 < I_f < 1$; $0 < R_e < 1$ Приемлемый тип динамики, не требующий внешнего управления	Самоорганизованная динамика с замкнутым и устойчивым циклом развития урбосистемы, при котором ее устойчивость обеспечивается частичными затратами ресурса, восстанавливаемыми естественным образом после снятия нагрузки. Такая динамика урбанизированных сред обладает приемлемым уровнем эффективности и экологической безопасности.
$D_e \to (1{,}2 \vee 1{,}7)$; $I_f \to 0$; $R_e \to 1$ Неблагоприятная нестабильная динамика, требующая внешнего управления ситуацией	Бистабильная (неустойчивая) динамика, при которой урбосистема чувствительна к случайным факторам, а дисбаланс соотношения насыщенность – связность достигает максимума. Урбосистема из открытой системы превращается в замкнутую и начинает существовать только за счет своего внутреннего ресурса. Это пограничная ситуация между жизнеспособностью урбосистемы и ее вырождением.
$D_e > 1{,}7$; $I_f = 0$; $R_e = 1$ Катастрофная неуправляемая динамика	Наиболее неблагоприятная катастрофная динамика, при которой происходят вырождение урбосистемы за короткое время. Это неуправляемый процесс, затрагивающий всю систему в целом.

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

усиливает тяготение к ней населения (процессы развития «вглубь» F1), а также отрицательными обратными связями, обусловленными конкуренцией территорий за размещение инфраструктур (процессы развития «вширь» F2).

Множество сбалансированных (эталонных) значений соотношения насыщенность – связность, которым соответствует максимально эффективная организация территории, в которой эволюционирует урбосистема, имеет в структуре территориально-коммуникационной модели параметры $D_e \rightarrow 1{,}5$; $I_f \rightarrow 1$; $R_e \rightarrow 0$. Это идеальный случай полной компенсации внешней нагрузки за счет внутреннего системного ресурса, что не обеспечивается в долговременной перспективе [23].

Наиболее часто урбанизированные среды функционируют в состояниях, далеких от равновесия с приемлемыми параметрами риска $1{,}2 < D_e < 1{,}7$; $0 < I_f < 1$; $0 < R_e < 1$ (рис. 8, табл. 5).

Через сравнение полученных решений с эталонным выявляются диспропорции территориальной организации, т. е. территории, требующие внешнего управления (табл. 5).

ВЫВОДЫ

Динамика развития урбосистемы оценивается двумя типами социально-экономических процессов, определяющих цикл ее естественного развития: хаотическими, отвечающими за рост инфраструктурной насыщенности по контуру положительной обратной связи, и детерминированными, регулирующими коммуникативную связность инфраструктур по контуру отрицательной обратной связи. Обе формы динамического поведения урбосистемы составляют две взаимосвязанные стороны единого процесса территориального развития.

Процесс развития урбосистемы протекает в направлении от низких форм структурной организации к высоким: увеличение размера урбосистемы (рост инфраструктурной ткани) всегда сопровождается пространственным рассредоточением каркаса для сохранения устойчивого (равновесного) развития. Урбанизированные среды функционируют в состояниях, далеких от равновесия с приемлемыми параметрами экологического риска. Это обуславливает сохранение устойчивого социально-экономического цикла развития в долгосрочной перспективе. Нарушению социально-экономического развития урбосистемы способствует возникновение в ее структуре т. н. предельных территориальных диспропорций соотношения насыщенность – связность, когда замкнутость цикла может нарушаться и приводить урбосистему к бистабильной динамике, способствующей ее полному вырождению.

Анализ территориальной организации урбосистемы заключается в выделении в структуре городской среды зон территориальной сбалансированности и диспропорций через сравнение полученных решений территориально-коммуникационной модели с фрактальным эталоном как показателя наиболее эффективной организации территории. В результате выявляются зоны риска развития урбосистемы, требующие внешнего управления и позволяющие сделать стратегию территориального развития более прозрачной и надежной при ее внедрении.

ЛИТЕРАТУРА

Бабич В. Н., Колясников В. А. Фрактальные структуры в планировке и застройке города // Академический вестник УралНИИ проект РААСН. 2009. № 2. С. 43–45.

Баевский О. А. Территориальное планирование и проектирование на основе исследования пространственной структуры города: курс лекций. Высшая школа урбанистики имени А. А. Высоковского, 2016.

[23] Насонов А. Н. Геоэкологическая оценка нарушения продуктивности почв урболандшафтов на основе фрактальных методов биотестирования // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2021. Т. 15. № 2. С. 75–83.

Балханов В. К. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления. Улан-Удэ: Бурятский государственный университет, 2013. 224 с.

Воробьев Ю. Л., Малинецкий Г. Г., Махутов Н. А. Управление риском и устойчивое развитие. Человеческое измерение // Общественные науки и современность. 2000. № 6. С. 150–162.

Гостев М. В. Об эвристической природе моделей эволюционного городского развития // Городские исследования и практики. 2018. Т. 3. № 1. С. 7–22. https://doi.org/10.17323/usp3120187-22

Гутнов А. Э. Системный подход в изучении города: основания и контуры теории городского развития // Системные исследования. Методологические проблемы / под ред. Д. М. Гвишиани. М.: Наука, 1986. С. 211–232.

Гущина Е. С., Смогунов В. В. Фрактальная размерность в оценке планировочной структуры крупного города // Современные научные исследования и инновации. 2016. Т. 58. № 2. С. 110–116.

Иудин Д. И., Копосов Е. В. Фракталы: от простого к сложному. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2012. 183 с.

Квинт В. Л., Новикова И. В., Алимурадов М. К. Согласованность глобальных и национальных интересов с региональными стратегическими приоритетами // Экономика и управление. 2021. Т. 27. № 11. С. 900–909. https://doi.org/10.35854/1998-1627-2021-11-900-909

Малков С. Ю. Социальная самоорганизация и исторический процесс: возможности математического моделирования. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 240 с.

Насонов А. Н. Геоэкологическая оценка нарушения продуктивности почв урболандшафтов на основе фрактальных методов биотестирования // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2021. Т. 15. № 2. С. 75–83.

Никоноров С. М. От стратегии социально-экономического развития к стратегии устойчивого развития регионов России // Менеджмент и бизнес-администрирование. 2016. № 4. С. 28–35.

Никоноров С. М., Папенов К. В., Талавринов В. А. Инновационные подходы перехода бизнеса к ESG-стратегиям (российский и зарубежный опыт) // Стратегирование: теория и практика. 2022. Т. 2. № 1. С. 49–56. https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-1-49-56

Павлов Ю. В. Фракталы как инструмент территориального планирования агломерационных систем // Фундаментальные исследования. 2013. № 10–10. С. 2242–2248.

Подлазов А. В. Теория самоорганизованной критичности – наука о сложности // Будущее прикладной математики. Лекции для молодых исследователей / под ред. Г. Г. Малинецкого. М.: Эдиториал УРСС, 2005. С. 404–426.

Структурная эволюция морфологии городской среды в историческом аспекте на примере Нижнего Новгорода / Е. В. Копосов [и др.] // Приволжский научный журнал. 2012. Т. 24. № 4. С. 138–144.

Фрактальный подход к оценке управляемости геоэкологическими рисками / В. В. Кульнев [и др.] // Известия Дагестанского государственного педагогического университета. Естественные и точные науки. 2019. Т. 13. № 4. С. 101–111.

Batty M. Building a science of cities // Cities. 2012. Vol. 29. P. S9–S16. https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.008

Marques M. L., Ferreira M. C. Occupation density analysis for urban agglomeration growth of São Paulo metropolitan through fractal dimensions estimate // Geografia. 2006. Vol. 31. № 2. P. 293–316.

REFERENCES

Babich VN, Kolyasnikov VA. Fractal structures in the lay-out and building of city. Akademicheskiy Vestnik UralNIIproekt RAASN. 2009;(2):43–45. (In Russ.)

Baevskiy OA. Territorial′noe planirovanie i proektirovanie na osnove issledovaniya prostranstvennoy struktury goroda: kurs lektsiy [Territorial planning and design based on the study of the spatial structure of the city: a course of lectures]. Vysokovsky Graduate School of Urbanism; 2016. (In Russ.)

Balkhanov VK. Osnovy fraktal′noy geometrii i fraktal′nogo ischisleniya [Fundamentals of fractal geometry and fractal calculus]. Ulan-Ude: Buryat State University; 2013. 224 p. (In Russ.)

Vorob′ev YuL, Malinetskiy GG, Makhutov NA. Upravlenie riskom i ustoychivoe razvitie. Chelovecheskoe izmerenie [Risk management and sustainable development. Human dimension]. Social Sciences and Contemporary World. 2000; (6):150–162. (In Russ.)

Gostev MV. On the heuristic nature of evolutionary urban development models. Urban Studies and Practices. 2018;3(1):7–22. (In Russ.) https://doi.org/10.17323/usp3120187-22

Gutnov AE. Systems approach to urban development: foundations and outline of a theory. In: Gvishiani DM, editor. Systems research. Methodological problems. Moscow: Nauka; 1986. pp. 211–232. (In Russ.)

Gushchina ES, Smogunov VV. Fractal dimension in estimation of a large city planning structure. Modern Scientific Researches and Innovations. 2016;58(2):110–116. (In Russ.).

Iudin DI, Koposov EV. Fraktaly: ot prostogo k slozhnomu [Fractals: from simple to complex]. Nizhny Novgorod: Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering; 2012. 183 p. (In Russ.)

Kvint VL, Novikova IV, Alimuradov MK. Alignment of global and national interest with regional strategic priorities. Economics and Management. 2021;27(11):900–909. (In Russ.) https://doi.org/10.35854/1998-1627-2021-11-900-909

Malkov SYu. Sotsial′naya samoorganizatsiya i istoricheskiy protsess: vozmozhnosti matematicheskogo modelirovaniya [Social self-organization and historical process: possibilities of mathematical modeling]. Moscow: Knizhnyy dom “LIBROKOM”; 2009. 240 p. (In Russ.)

Nasonov AN. Geoecological assessment of soil productivity disturbance in urban landscapes based on fractal biotesting methods. Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences. 2021;15(2):75–83. (In Russ.)

Nikonorov SM. The transition from a strategy of social and economic development to the sustainable development strategy. Management and Business Administration. 2016;(4):28–35. (In Russ.)

Nikonorov SM, Papenov KV, Talavrinov VA. Business transition to ESG-Strategies: Innovative approaches in Russian and international experience. Strategizing: Theory and Practice. 2022;2(1):49–56. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-1-49-56

Pavlov YuV. Fractals as a tool for regional planning of agglomeration’s systems. Fundamental Research. 2013;(10–10):2242–2248. (In Russ.)

Podlazov AV. Teoriya samoorganizovannoy kritichnosti – nauka o slozhnosti [Theory of self-organized criticality: the science of complexity]. In: Malinetskiy GG, editor. Budushchee prikladnoy matematiki. Lektsii dlya molodykh issledovateley [The future of applied mathematics. Lectures for young researchers]. Moscow: Ehditorial URSS; 2005. pp. 404–426. (In Russ.)

Koposov EV, Vinogradova TP, Iudin DI, Kaschenko OV, Chechin AV, Mareeva EE. Structural evolution of city environment morphology in a historical aspect on the example of Nizhny Novgorod. Privolzhsky Scientific Journal. 2012;24(4):138–144.

Kul`nev VV, Nasonov AN, Tsvetkov IV, Mezhova LA, Larionov AN. Fractal approach to manageability evaluation of ecological risks. Dagestan State Pedagogical University Journal. Natural and Exact Sciences. 2019;13(4):101–111. (In Russ.)

Batty M. Building a science of cities. Cities. 2012;29:S9–S16. https://doi.org/10.1016/j.cities.2011.11.008

https://doi.org/10.21603/2782-2435-2022-2-3-360-376

Marques ML, Ferreira MC. Occupation density analysis for urban agglomeration growth of São Paulo metropolitan through fractal dimensions estimate. Geografia. 2006;31(2):293–316.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявили об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и/или публикации данной статьи.

CONFLICTS OF INTEREST: The authors declared no potential conflicts of interests regarding the research, authorship, and/or publication of this article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ: Никоноров Сергей Михайлович, д-р экон. наук, профессор кафедры экономики природопользования, директор Центра исследования экономических проблем развития Арктики экономического факультета, эксперт ПОРА в области устойчивого развития и экономики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия; nico.73@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8205-2140

Кривичев Александр Иванович, канд. экон. наук, научный сотрудник экономического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия; krivichev@live.ru; https://orcid.org/0000-0002-4971-5264

Насонов Андрей Николаевич, доцент кафедры управления недвижимостью и развитием территорий, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия; adn22@yandex.ru

Цветков Илья Викторович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры экономики предприятия и менеджмента, Тверской государственный университет, Тверь, Россия; mancu@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5284-880X

ABOUT AUTHORS: Sergey M. Nikonorov, Dr.Sci. (Econ.), Professor of the Department of Environmental Economics, Director of the Center for Research on Economic Problems of the Development of the Arctic, Faculty of Economics, PORA expert in sustainable development and economics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nico.73@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-8205-2140

Alexander I. Krivichev, Cand.Sci.(Econ.), Researcher of the Faculty of Economics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; krivichev@live.ru; https://orcid.org/0000-0002-4971-5264

Andrey N. Nasonov, Associate Professor of the Department of Real Estate Management and Territory Development, Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia; adn22@yandex.ru

Ilya V. Tsvetkov, Dr.Sci.(Eng.), Professor, Professor of the Department of Enterprise Economics and Management, Tver State University, Tver, Russia; mancu@mail.ru; https://orcid.org/0000-0002-5284-880X