

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. РЕКОНСТРУКЦИЯ И РЕСТАВРАЦИЯ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 711.4

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.481-494

Формирование модели водно-зеленого каркаса для линейной градостроительной системы

Вячеслав Валентинович Прокопенко

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Линейные градостроительные системы (ГС) из-за своей пространственной организации требуют особого подхода к формированию водно-зеленого каркаса (ВЗК), который играет ключевую роль в обеспечении их экологической устойчивости, улучшении микроклимата и качества среды. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки модели, позволяющей не только описывать, но и количественно оценивать и прогнозировать устойчивость структуры ВЗК. Научная новизна работы заключается в разработке методологии, интегрирующей теоретическое моделирование, математическую формализацию и оценку устойчивости, а также в апробации предложенной модели на примере Волгограда с расчетом интегрального показателя устойчивости водно-зеленого каркаса.

Материалы и методы. Исследование базируется на синтезе системного, комплексного и программно-целевого подходов. Методология включает три этапа: аналитический (пространственное зонирование, идентификация элементов ВЗК, комплексная оценка с использованием ГИС-анализа; концептуальное моделирование (разработка идеализированной модели ВЗК)); математическое моделирование и оценка. Для оценки устойчивости узлов применялся метод главных компонент, для определения весовых коэффициентов в интегральной модели — метод анализа иерархий.

Результаты. Предложена теоретическая модель структуры ВЗК для линейной ГС. Разработана и апробирована на примере Волгограда комплексная методология формирования и оценки модели ВЗК. Разработан интегральный показатель устойчивости $U_{ВЗК}$, агрегирующий нормализованные индексы продольных поясов (J_p), поперечных коридоров (J_k) и узлов (J_y). Определены весовые коэффициенты вклада каждого элемента структуры ВЗК в ее устойчивость.

Выводы. Практическая значимость работы состоит в предложении инструментария для количественной оценки и стратегического планирования развития ВЗК линейных ГС. Предложенная методология позволяет не только констатировать проблемы, но и выявлять их структурные причины, определяя приоритетность воздействия на системообразующие (продольные пояса) и связующие (поперечные коридоры) элементы. Результаты исследования могут быть применены в градостроительном проектировании и территориальном планировании для линейных градостроительных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: водно-зеленый каркас, линейная градостроительная система, устойчивость, математическое моделирование, градостроительное планирование, интегральный показатель, метод анализа иерархий

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Прокопенко В.В. Формирование модели водно-зеленого каркаса для линейной градостроительной системы // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 4. С. 481–494. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.481-494

Автор, ответственный за переписку: Вячеслав Валентинович Прокопенко, v.v.p_24@mail.ru.

Formation of a water-green framework model for a linear urban planning system

Vyacheslav V. Prokopenko

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Linear urban planning systems have a specific spatial organization that imposes special requirements for the formation of a water-green framework (WGF). The WGF is a key element in ensuring their ecological sustainability, improving the microclimate, and enhancing the quality of the environment. The relevance of the study is due to the need to develop a methodology that allows not only to describe but also to quantitatively assess and predict the sustainability of the WGF structure. The scientific novelty of the work lies in the development of a three-stage methodology integrating theoretical modelling, mathematical formalization, and sustainability assessment, as well as in the testing of this methodology on the example of Volgograd with the calculation of an integral sustainability indicator.

Materials and methods. The research is based on a synthesis of systemic, comprehensive, and program-targeted approaches. The methodology includes three stages: analytical (spatial zoning, identification of WGF elements, comprehensive assessment using GIS analysis); conceptual modelling (development of an idealized WGF model); mathematical modelling and assessment. The principal component method was used to assess the sustainability of nodes, and the analytic hierarchy process was used to determine the weight coefficients in the integral model.

Results. A theoretical model of the water-green framework structure for a linear urban planning system is proposed. A comprehensive methodology for the formation and assessment of the WGF model was developed and tested on the example of Volgograd. An integral sustainability indicator, U_{WGF} aggregating the normalized indices of longitudinal belts (J_b), transverse corridors (J_c), and nodes (J_n), is proposed. The weight coefficients of the contribution of each structural element of the WGF to its sustainability are determined.

Conclusions. The practical significance of the work lies in the proposal of a toolkit for the quantitative assessment and strategic planning of the development of the WGF for linear urban planning systems. The proposed methodology allows not only to state problems but also to identify their structural causes, determining the priority of impact on the system-forming (longitudinal belts) and connecting (transverse corridors) elements. The research results can be applied in urban planning and territorial planning for linear urban planning systems, in particular, in the regions of the Volga region, the Urals, and Siberia.

KEYWORDS: water-green framework, linear urban planning system, sustainability, mathematical modelling, urban planning, integral indicator, analytic hierarchy process

FOR CITATION: Prokopenko V.V. Formation of a water-green framework model for a linear urban planning system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(4):481-494. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.4.481-494 (rus.).

Corresponding author: Vyacheslav V. Prokopenko, v.v.p_24@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Современные вызовы урбанизации, связанные с обострением экологических проблем, требуют разработки эффективных инструментов устойчивого развития градостроительных систем. Особую актуальность это направление приобретает для городов с линейной градостроительной структурой, где пространственная организация предопределяет специфические требования к формированию и функционированию градостроительной системы [1, 2]. Водно-зеленый каркас (ВЗК), интегрирующий природные и антропогенные территории, выступает ключевым элементом в обеспечении экологической стабильности, улучшении микроклимата и повышении качества жизни населения в таких системах [3, 4].

Анализ подходов к стратегическому градостроительному планированию [5] свидетельствует о необходимости разработки комплексных методик, учитывающих коэволюцию техносферных и биосферных систем. При этом подчеркивается целесообразность рассмотрения природного комплекса как активного компонента, находящегося в динамическом взаимодействии с искусственной средой, что особенно значимо для линейных градостроительных систем, где данная взаимосвязь проявляется наиболее интенсивно.

Несмотря на большое количество исследований, посвященных зеленой инфраструктуре и природному каркасу [6–8], вопросы комплексного моделирования и количественной оценки устойчивости ВЗК именно для линейных градостроительных систем (ГС) остаются недостаточно разработанными. Существующие подходы зачастую носят описательный характер или фокусируются на отдельных компонентах, не учитывая системных взаимосвязей и иерархического построения структуры каркаса [9, 10]. Эмпирические исследования, рассматривающие формирование ВЗК в условиях исторически сложившегося культурного ландшафта [11], позволяют выявить типичные закономерности его деградации. К числу последних относятся утилитарный подход к использованию ключевых территорий, приводящий к их трансформации, фрагментация каркаса и наличие множественных антропогенных

барьеров. Полученные выводы имеют важное методологическое значение для разработки модели ВЗК линейных систем, поскольку акцентируют необходимость учета историко-генетических факторов для минимизации типичных планировочных ошибок.

Важный вклад в развитие концепции зеленой инфраструктуры как стратегического подхода к планированию внесли авторы работы [12]. Они определяют зеленую инфраструктуру как сеть природных и полуприродных территорий, которая обеспечивает широкий спектр экосистемных услуг и соединяет города с их окружением. Также авторы подчеркивают, что зеленая инфраструктура представляет собой парадигматический сдвиг в планировании, преодолевая фрагментированное мышление за счет интеграции различных дисциплин, таких как городское лесное хозяйство, сельское хозяйство и ландшафтная экология. Анализ исследований демонстрирует, что многофункциональность [13], связность [14] и учет социально-экономических аспектов являются ключевыми характеристиками успешных проектов зеленой инфраструктуры. Этот подход акцентирует целостное видение, при котором город рассматривается как часть более широкой природной системы, а не изолированное образование¹ [15]. В то же время недостаточно изучены методы интегральной оценки, агрегирующей разнородные параметры элементов ВЗК в единый показатель, а также инструменты анализа пространственной связности, определяющей целостность и устойчивость каркаса к внешним воздействиям [16, 17].

Цель настоящего исследования — разработка комплексной методологии формирования и оценки модели водно-зеленого каркаса для линейных градостроительных систем, позволяющей проводить количественную оценку его устойчивости.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- сформулировать теоретические основы и принципы моделирования ВЗК;

¹ Landscape Institute. Green Infrastructure: An integrated approach to land use. London : Landscape Institute, 2013. 17 p. URL: <http://www.landscapeinstitute.org/PDF/Contribute/2013GreenInfrastructureLIPositionStatement.pdf>

- разработать трехэтапный алгоритм построения модели;
- предложить систему интегральных показателей для оценки устойчивости и связности структуры;
- апробировать методологию на примере линейной ГС Волгограда.

Научная новизна исследования заключается в разработке трехэтапной методологии, интегрирующей теоретическое моделирование, математическую формализацию и оценку устойчивости ВЗК, а также в апробации предложенной методологии на примере Волгограда с расчетом интегрального показателя устойчивости, агрегирующего нормализованные индексы продольных поясов, поперечных коридоров и узловых элементов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования рассматривалась линейная градостроительная система Волгограда, в качестве предмета — ее водно-зеленый каркас. Методологическую основу исследования составил синтез теоретических и эмпирических методов, объединенных в комплексную трехэтапную методологию формирования и оценки модели ВЗК для линейных ГС. Общая схема методологии представлена на рис. 1.

Выбор Волгограда объектом исследования обусловлен его классической линейной структурой: город протянулся более чем на 90 км вдоль р. Волги, что создает уникальные условия для изучения специфики формирования ВЗК в подобных ГС.

Исследование основывается на применении системы взаимодополняющих научных подходов:

1. Системный подход позволил рассмотреть ВЗК как целостную иерархическую структуру, где свойства системы не сводятся к сумме свойств ее элементов (продольных поясов, поперечных коридоров, узлов), а определяются связями между ними.

2. Комплексный подход дал возможность осуществить одновременный учет градостроительных, экологических, социальных и функциональных аспектов при формировании модели.

3. Программно-целевой подход позволил сфокусировать исследование на достижении целевого показателя — устойчивости структуры ВЗК, что определило последовательность и содержание этапов.

4. Моделирование базировалось на следующих принципах: принципе генезиса (учет исторических трансформаций); принципе системного соответствия (взаимодействие элементов на всех уровнях территориального планирования); принципе пространственной непрерывности (обеспечение связности ядер и коридоров); принципе аддитивности (поэтапное формирование структуры от элемента к системе).

Методологическая основа исследования также включает элементы пространственного плани-

рования на разных иерархических уровнях, что позволяет учитывать не только урбанистические, но и природные аспекты формирования ВЗК. Интеграция этих подходов обеспечивает комплексность исследования и возможность учета разнородных факторов, влияющих на устойчивость каркасной структуры.

Этапы исследования и применяемые методы

Этап 1. Аналитический. На этом этапе решались задачи по сбору, систематизации и комплексной оценке исходных данных о состоянии территории. В качестве исходных сведений применялись: градостроительная документация (генеральный план, правила землепользования и застройки), информация дистанционного зондирования Земли (космические снимки), материалы натурных обследований, данные государственного статистического наблюдения, нормативно-правовые акты.

Достоверность результатов обеспечивалась использованием разнообразных источников информации: архивные материалы по истории градостроительного развития Волгограда, данные полевых обследований состояния зеленых насаждений, результаты лабораторных исследований качества окружающей среды. Особое внимание уделялось согласованию сведений из различных источников и их привязке к единой системе координат для обеспечения корректности пространственного анализа.

Методы:

- пространственное зонирование. Территория линейной ГС (на примере Волгограда) была разделена на систему параллельных поясов, ориентированных вдоль градостроительной оси (р. Волга). Выделено шесть продольных поясов: прибрежный, центральный, транспортный, срединный, периферийный и буферный. Критериями выделения продольных поясов служили: удаленность от р. Волги, функциональное зонирование территории, интенсивность транспортных потоков, характер застройки и экологические характеристики. Каждый пояс обладает специфическими особенностями, определяющими его роль в общей структуре ВЗК и требования к его развитию;

- ГИС-анализ. В среде геоинформационных систем (ArcGIS, QGIS) была создана цифровая картографическая основа. Произведена векторизация элементов ВЗК (парки, скверы, лесопарки, набережные, овражно-балочная сеть, водные объекты) с формированием атрибутивных баз данных (площадь, тип объекта, степень озелененности и др.). ГИС-анализ включал пространственный анализ распределения элементов ВЗК, расчет буферных зон влияния, оценку связности элементов каркаса с использованием методов сетевого анализа. Для оценки озелененности территорий применялись вегетационные индексы (NDVI), рассчитанные на основе мультиспектральных космических снимков. Использование вегета-

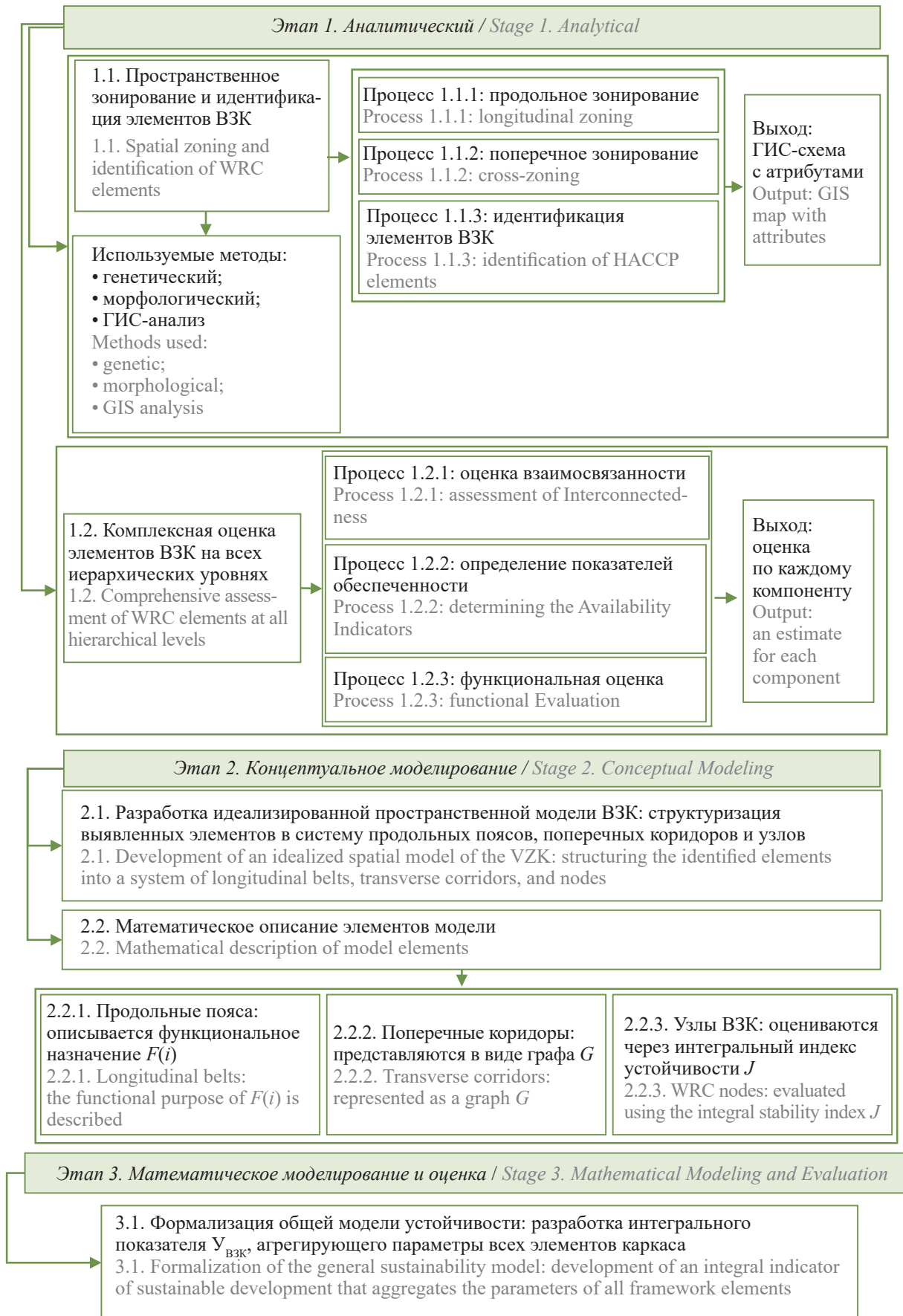


Рис. 1. Общая схема методологии формирования и оценки модели ВЗК

Fig. 1. General scheme of the methodology for forming and evaluating the WGF model

ционных индексов позволило получить объективные количественные данные о состоянии растительного покрова;

- генетический метод. Применен для анализа исторического формирования структуры ВЗК, выявления трансформаций ландшафта и определения современного состояния элементов каркаса (например, анализ эволюции овражно-балочной системы и «Зеленого кольца» Волгограда). Генетический анализ включал изучение исторических картографических материалов, архивных документов и научных публикаций [18–20], что позволило проследить этапы формирования градостроительной структуры Волгограда и выявить причины современных проблем ВЗК. Особое внимание уделялось анализу послевоенного восстановления города и его влияния на формирование зеленого каркаса;

- морфологический анализ. Использован для классификации элементов ВЗК по их пространственным характеристикам (конфигурация, размер, взаимное расположение) и функциональному назначению. В рамках морфологического анализа разработана типология элементов ВЗК по следующим критериям: размеру (крупные, средние, малые), конфигурации (линейные, площадные, точечные), функциональному назначению (рекреационные, средозащитные, природоохранные). Это позволило систематизировать разнородные элементы каркаса

и выявить закономерности их пространственного распределения;

- комплексная оценка. На основе собранных данных проведены оценка обеспеченности озелененными территориями по поясам, анализ функциональной эффективности и выявление конфликтных зон (например, размещение промышленных предприятий в прибрежном поясе). Комплексная оценка включала расчет показателей обеспеченности озелененными территориями на душу населения по районам города, анализ соответствия фактических параметров ВЗК нормативным требованиям, выявление зон экологического напряжения и территорий с нарушенными экологическими функциями. Для оценки функциональной эффективности использовались методы экспертных оценок и сравнительного анализа.

Этап 2. Концептуальное моделирование. Цель этапа — преобразование выявленных и оцененных элементов в идеализированную пространственную модель ВЗК (рис. 2).

Методы:

Структуризация. Все элементы ВЗК были систематизированы в три ключевых компонента модели:

1. Продольные пояса. Описываются через интегральную оценку их функционального назначения (формула (1)), которая учитывает долю различных

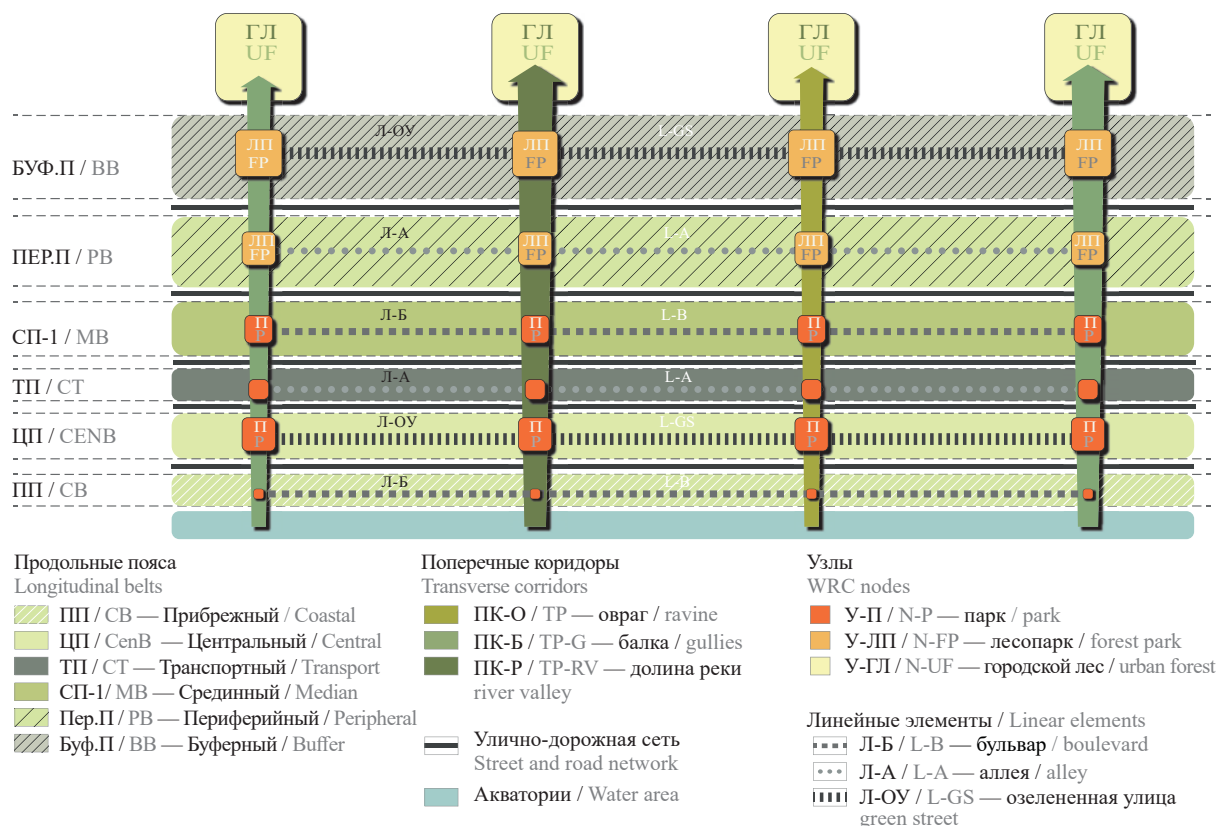


Рис. 2. Идеализированная модель структуры ВЗК линейной ГС

Fig. 2. Idealized model of the linear UPS WGF structure

типов озелененных территорий (общего, ограниченного пользования, специального назначения) с весовыми коэффициентами, определенными методом экспертных оценок:

$$F(i) = a_1 \frac{S_1}{S_{\text{пояса}}} + a_2 \frac{S_2}{S_{\text{пояса}}} + a_3 \frac{S_3}{S_{\text{пояса}}}, \quad (1)$$

где S_1, S_2, S_3 — площади озелененных территорий общего, ограниченного пользования и специального назначения в пределах пояса; $S_{\text{пояса}}$ — общая площадь пояса; a_1, a_2, a_3 — весовые коэффициенты.

Определение весовых коэффициентов проводилось методом экспертных оценок с привлечением специалистов в области градостроительства, экологии и архитектуры. Процедура экспертной оценки включала анкетирование 10 экспертов с последующим согласованием мнений методом Дельфи, что позволило достигнуть консенсуса по значимости различных категорий территорий для формирования ВЗК.

2. Поперечные коридоры. Формализованы в виде неориентированного графа:

$$G = (V, E), \quad (2)$$

где V — множество вершин (узлы пересечения коридоров с поясами, ключевые парки); E — множество ребер (участки оврагов, балок, долин малых рек, линейных озелененных территорий). Каждому ребру присваиваются атрибуты: длина, ширина, показатель озелененности.

Для оценки эффективности поперечных коридоров использовались показатели связности графа, включая индекс связанности, индекс линейной связности и другие топологические характеристики. Это позволило количественно оценить уровень интеграции различных элементов каркаса и выявить критические разрывы в системе экологических коридоров.

3. Узлы ВЗК. Крупные озелененные территории (парки, лесопарки), идентифицированные в местах пересечения продольных и поперечных элементов. Для них разработан алгоритм оценки индекса устойчивости J .

Идентификация узлов ВЗК осуществлялась на основе анализа их пространственного положения, размера и функциональной значимости. К узлам первого порядка отнесены наиболее крупные и ценные территории, играющие ключевую роль в обеспечении экологической стабильности города. Для каждого узла определялся радиус влияния и зона обслуживания населения.

Этап 3. Математическое моделирование и оценка. Цель этапа — количественная оценка устойчивости структуры ВЗК.

Методы:

Оценка устойчивости узлов (индекс J). Для перехода от множества разноплановых показателей

(площадь, плотность озеленения, породный состав, рекреационная нагрузка, шумовой фон, концентрация загрязняющих веществ и др.) к интегральной оценке применен факторный анализ, а именно метод главных компонент (МГК). Процедура включала:

- стандартизацию исходных показателей;
- построение матрицы интеркорреляций и проверку ее пригодности для факторного анализа;
- выделение латентных факторов (главных компонент), объясняющих большую часть дисперсии данных (критерий Кайзера и критерий «каменистой осыпи»). В результате для Волгограда было выделено два фактора, объясняющих 89,2 % общей дисперсии: «Планировочный потенциал» и «Антропогенная нагрузка»;

- расчет факторных весов для каждого объекта.

Проверка пригодности данных для факторного анализа включала расчет критерия Кайзера – Мейера – Олкина (КМО = 0,78) и теста сферичности Бартлетта ($p < 0,001$), что подтвердило возможность применения МГК. Выделение главных компонент проводилось с использованием метода варимакс-вращения для улучшения интерпретируемости факторов.

Определение индекса устойчивости $J(f)$ как среднего значения отношений факторов к их пороговым уровням:

$$J(f) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^2 \frac{f_i}{pf_i}, \quad (3)$$

где f_i — значение i -го фактора; pf_i — его пороговое значение.

Пороговые значения факторов определялись на основе нормативных требований, научно обоснованных критериев и анализа статистических данных. Для факторов, не имеющих нормативных аналогов, пороговые значения устанавливались методом квартильного анализа с использованием значений верхних квартилей как ориентиров для достижения [18].

Расчет компонентных индексов:

- индекс продольных поясов $J_{\text{п}}$ рассчитан как среднее арифметическое интегральных оценок $F(i)$ всех поясов;
- индекс поперечных коридоров $J_{\text{к}}$ рассчитан как средневзвешенная озелененность всех коридоров, где весами выступают их площади;
- индекс узлов $J_{\text{у}}$ рассчитан как среднее арифметическое индексов устойчивости J всех ключевых узлов.

Для обеспечения сопоставимости компонентных индексов проведена их нормализация к безразмерному виду с приведением к диапазону от 0 до 1. Это позволило корректно агрегировать разнородные показатели в интегральный индекс устойчивости и обеспечить сравнимость результатов для различных градостроительных систем.

Определение интегрального показателя устойчивости ВЗК ($Y_{\text{ВЗК}}$). Для агрегации компонентных индексов в единый показатель использован метод

анализа иерархий (МАИ) Т. Саати. Процедура включала [21]:

- построение иерархической структуры (цель – критерии – альтернативы);
- попарное сравнение элементов (продольные пояса, поперечные коридоры, узлы) экспертами по 9-балльной шкале относительно критерия «Вклад в общую устойчивость ВЗК»;
- формирование матрицы парных сравнений и расчет вектора приоритетов (весовых коэффициентов a , b , c) методом среднего геометрического;
- проверку согласованности экспертных суждений через расчет индекса согласованности (ИС) и отношения согласованности (ОС). Полученное значение $ОС < 0,1$ подтвердило приемлемую согласованность.

Интегральный показатель рассчитан по формуле:

$$Y_{\text{ВЗК}} = a \cdot J_{\text{П}} + b \cdot J_{\text{К}} + c \cdot J_{\text{У}}, \quad (4)$$

где $J_{\text{П}}$ — индекс продольных поясов; $J_{\text{К}}$ — индекс поперечных коридоров; $J_{\text{У}}$ — индекс узлов; a , b , c — весовые коэффициенты.

Чувствительность интегрального показателя проверялась методом вариации весовых коэффициентов в пределах $\pm 10\%$. Анализ показал, что полученные результаты устойчивы к незначительным изменениям весов, что подтверждает надежность предложенной методики оценки.

Апробация методологии осуществлена на примере линейной градостроительной системы Волгограда. Обработка данных выполнялась с использованием программного обеспечения: ArcGIS для пространственного анализа, STATISTICA 13.0 для реализации факторного анализа и метода главных компонент, а также специализированных расчетных модулей для реализации метода анализа иерархий.

Для верификации результатов применялись методы кросс-валидации и сравнения с альтернативными методами оценки. Проведенный анализ подтвердил адекватность предложенной методологии и ее применимость для оценки устойчивости ВЗК линейных ГС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная теоретическая модель применена для концептуализации ВЗК Волгограда. В результате было выделено шесть продольных поясов, сеть поперечных коридоров на основе овражно-балочной системы и долин малых рек, а также система узловых элементов. Выделенные продольные пояса рассматриваются не только как пространственные зоны, но и как функциональные модули, каждый из которых должен выполнять специфическую средообразующую и рекреационную роль в общей системе каркаса. Сеть поперечных коридоров, основанная на восстановлении и интеграции деградированных овражно-балочных систем и долин малых рек, концептуализирована как ключевой элемент, обеспечи-

вающий поперечную экологическую связность линейной структуры ГС. Узловые элементы, к которым отнесены крупные парки, лесопарки и природные территории, позиционированы как стабилизирующие ядра, повышающие локальную устойчивость и выполняющие функции центров рекреационного притяжения.

Пространственная модель определяет иерархические взаимоотношения между элементами каркаса: продольные пояса формируют основу структурного остова, поперечные коридоры обеспечивают поперечные связи и интеграцию различных частей города, а узлы выступают в качестве точек концентрации экологических и рекреационных функций. Такая организация позволяет эффективно распределять экологические нагрузки и обеспечивать устойчивость системы в целом. Каждый элемент модели обладает специфическими характеристиками: для продольных поясов ключевыми параметрами являются ширина, степень озеленения и функциональное разнообразие; для поперечных коридоров критическое значение имеют непрерывность и экологическая ценность; для узловых элементов определяющими служат площадь, биоразнообразие и рекреационная емкость.

Функциональное зонирование в рамках модели предусматривает специализацию различных элементов ВЗК. Прибрежный пояс ориентирован на рекреационно-экологические функции, центральный и транспортный пояса выполняют средозащитные и рекреационные задачи, а буферный пояс обеспечивает связь с пригородными территориями. Поперечные коридоры в зависимости от их характеристик могут осуществлять функции экологических миграционных путей, рекреационных маршрутов или климатических коридоров. Узловые элементы дифференцируются по их роли в общей системе — от локальных рекреационных объектов до крупных экологических стабилизаторов городской среды.

Концептуальная модель демонстрирует потенциал пространственной организации Волгограда для формирования полноценного ВЗК, где природные и антропогенные элементы синергетично взаимодействуют. Определяя иерархические взаимоотношения между элементами каркаса, концептуальная модель служит основой для перехода от хаотичного освоения территории к целенаправленному формированию каркаса как единого организма, способного адаптироваться к изменениям и обеспечивать долгосрочную экологическую стабильность.

Оценка текущего состояния и выявление структурных проблем ВЗК Волгограда

Однако эмпирическая проверка выявила значительное расхождение между теоретической моделью и реальным состоянием каркаса. Пространственный анализ в рамках аналитического этапа



Рис. 3. Итоги оценки текущего состояния ВЗК Волгограда

Fig. 3. Results of the assessment of the current state of the Volgograd WGF

позволил идентифицировать и локализовать ключевые структурные разрывы и дисфункции.

Наиболее критичными из них оказались (рис. 3):

- 1) фрагментация прибрежного пояса промышленными объектами, нарушающая связь города с главным водным ресурсом;
- 2) деградация овражно-балочной системы, лишаящая каркас естественных поперечных связей;
- 3) резкая диспропорция в распределении озелененных территорий общего пользования между различными продольными поясами.

Эти проблемы носят системный характер и не могут быть решены точечными мероприятиями.

Анализ пространственного распределения элементов ВЗК выявил значительные территориальные диспропорции. Наибольшая концентрация озелененных территорий общего пользования отмечается в центральном районе города, тогда как периферийные зоны характеризуются их острым дефицитом. Существующая сеть поперечных связей фрагментирована и не обеспечивает необходимой экологической связности между различными частями города. Особую проблему представляет деградация исторически сложившейся овражно-балочной системы, которая в естественном состоянии могла бы выполнять функции эффективных экологических коридоров.

Сравнительный анализ идеализированной модели и реального состояния ВЗК позволил определить ключевые направления для градостроительных изменений. Приоритетными задачами являются:

- восстановление непрерывности прибрежного пояса через редевелопмент промышленных территорий;
- реабилитация овражно-балочной системы и создание на ее основе сети экологических коридоров;

- выравнивание диспропорций в обеспеченности озелененными территориями за счет создания новых парков и скверов в периферийных районах;
- обеспечение функционального разнообразия элементов каркаса и их интеграции в единую систему.

Таким образом, концептуальное моделирование не только описывает идеальную структуру ВЗК, но и через сравнение с реальностью выявляет направления для стратегических градостроительных изменений. Оно служит связующим звеном между теоретическим пониманием структуры ВЗК и практическими задачами его реабилитации и развития, подчеркивая необходимость комплексного подхода, направленного на восстановление как системообразующих (продольных), так и связующих (поперечных) элементов.

Применение концептуальной модели ВЗК для линейной градостроительной системы Волгограда

На основе выявленных структурных проблем и дисфункций разработана идеализированная концептуальная модель ВЗК, призванная устранить существующие разрывы и обеспечить целостность каркаса. Концептуальная модель основана на положении, что устойчивость ВЗК линейной ГС определяется сбалансированным развитием трех ключевых компонентов: продольных поясов; поперечных коридоров, обеспечивающих поперечную связность и интеграцию с природным окружением; и узлов, выступающих центрами биоразнообразия и рекреационной активности. Идеализированная модель предполагает пространственную непрерывность каждого из этих элементов и их тесное функциональное взаимодействие (рис. 4).

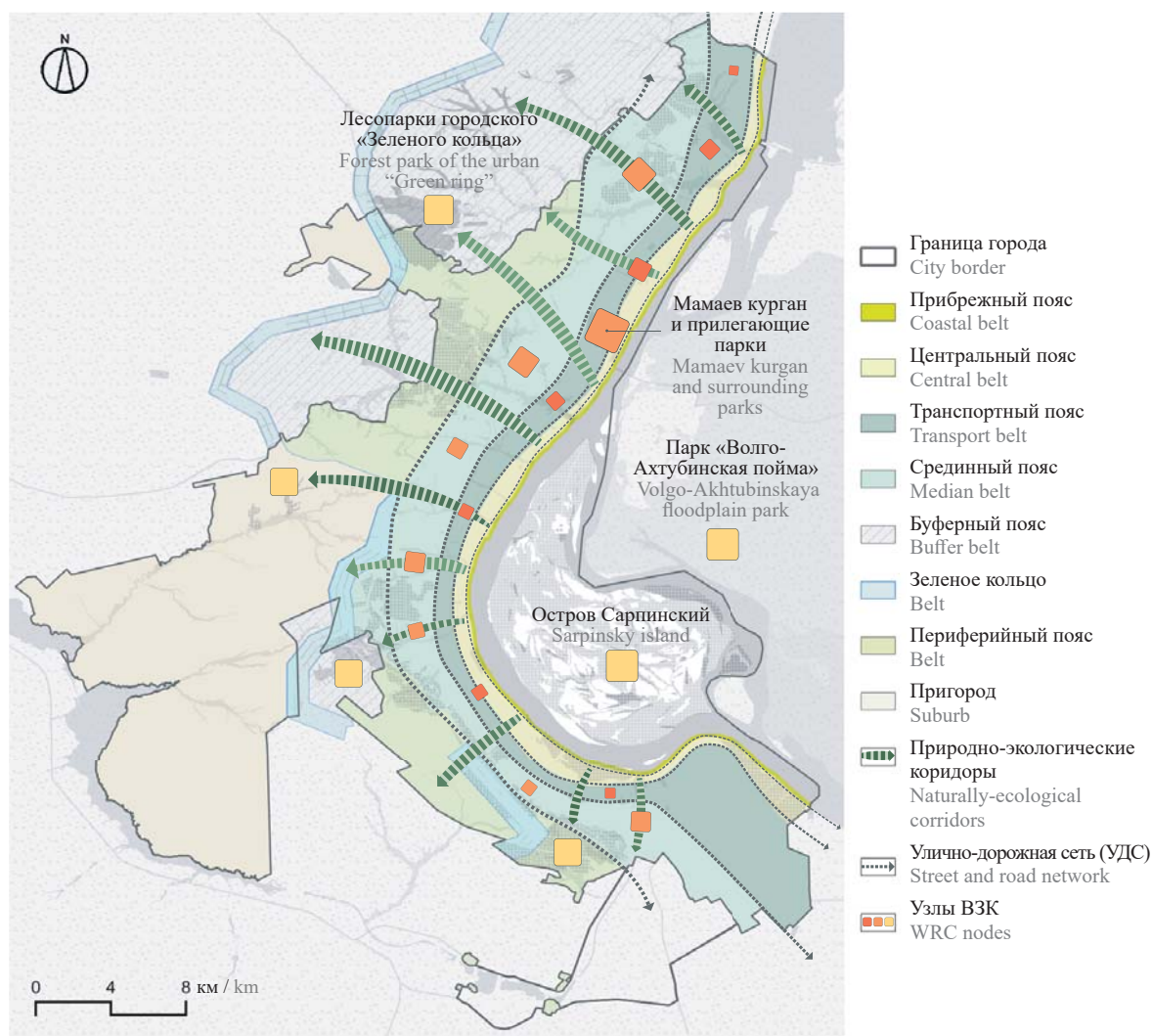


Рис. 4. Идеализированная (теоретическая) функционально-пространственная модель структуры водно-зеленого каркаса Волгограда

Fig. 4. Idealized (theoretical) functional-spatial model of the structure of the water-green frame of Volgograd

Количественная оценка устойчивости структуры ВЗК. Ключевым результатом стала количественная оценка устойчивости с помощью разработанного инструментария.

Оценка устойчивости узлов. С помощью МГК для 18 репрезентативных объектов были выделены два основных фактора, объясняющих 89,2 % дисперсии: «Планировочный потенциал» (66,1 %) и «Антропогенная нагрузка» (23,1 %). Расчет индекса устойчивости J показал значительную поляризацию: от критически низких значений для скверов в центре города ($J < 1,0$) до очень высоких для крупных лесомассивов ($J > 150,0$). Это подтвердило теоретическое положение о том, что устойчивость точечных элементов сильно варьируется и зависит от их масштаба, пространственного положения и уровня антропогенного воздействия.

Анализ факторов устойчивости продемонстрировал, что планировочный потенциал в наибольшей степени определяется площадью объекта, архитек-

турно-планировочными характеристиками и породным составом озеленения. Антропогенная нагрузка характеризуется показателями шумового фона, концентрации загрязняющих веществ и рекреационной нагрузки. Выявленная поляризация значений индекса J свидетельствует о необходимости дифференцированного подхода к управлению различными объектами ВЗК — от интенсивной ревитализации деградированных элементов до сохранения и поддержания высокоустойчивых природных ядер.

Пространственный анализ распределения индекса устойчивости J выявил четкую закономерность: наиболее низкие значения характерны для объектов, расположенных в зонах с большой транспортной нагрузкой и плотной застройкой, тогда как наиболее высокие значения отмечаются у объектов, находящихся в периферийных районах и имеющих значительную площадь. Это подтверждает гипотезу о том, что устойчивость элементов ВЗК напря-

мую зависит от их интеграции в природный каркас и уровня антропогенного давления.

Определение весовых коэффициентов модели

С помощью МАИ определен вектор приоритетов, формализующий вклад элементов в устойчивость системы:

- продольные пояса ($a = 0,571$). Наибольший вес, что теоретически обосновано их ролью как носителей основной массы биоразнообразия и детерминантов пространственной структуры линейной ГС;
- поперечные коридоры ($b = 0,286$). Существенный вес подтверждает теоретическую гипотезу о критической важности связности для целостности и устойчивости линейной системы к фрагментации;
- узлы ($c = 0,143$). Наименьший вес указывает на их зависимую роль: без интеграции в сеть поясов и коридоров их локальная устойчивость не обеспечивает устойчивости системы в целом.

Статистический анализ согласованности экспертных оценок показал высокую надежность полученных весовых коэффициентов. Индекс согласованности составил 0,0005 при отношении согласованности 0,0009, что значительно ниже порогового значения 0,1. Это свидетельствует о высокой степени согласованности экспертных суждений и надежности полученных результатов. Распределение весовых коэффициентов подтверждает системообразующую роль продольных поясов в линейной градостроитель-

ной системе и подчеркивает важность развития связности как ключевого фактора устойчивости.

На основе рассчитанных компонентов ($J_{\Pi} = 0,179$; $J_{\kappa} = 0,098$; $J_{\gamma} = 1,17$) получено значение интегрального показателя для Волгограда: $Y_{\text{ВЗК}} = 0,298$.

Полученное значение соответствует категории «Низкая устойчивость (критическое состояние)» по предложенной шкале (табл.), что количественно подтверждает выводы качественного анализа о системной деградации каркаса. Низкие значения J_{Π} и J_{κ} свидетельствуют о разрушении системообразующих и связующих элементов, а относительно высокое значение J_{γ} не компенсирует этот дисбаланс, что теоретически подтверждает наличие структурных проблем.

Анализ вклада отдельных компонентов в интегральный показатель показал, что наибольший негативный вклад вносят низкие значения индексов продольных поясов и поперечных коридоров. Это свидетельствует о системном характере проблем ВЗК Волгограда, связанных с нарушением целостности структуры каркаса. Относительно высокое значение индекса узловых элементов объясняется наличием нескольких крупных природных территорий, которые, однако, не интегрированы в единую систему и не могут компенсировать общую структурную деградацию каркаса.

Проведенный анализ позволяет определить приоритетные направления повышения устойчивости

Шкала оценки интегрального показателя устойчивости ВЗК $Y_{\text{ВЗК}}$

Scale for assessing the integral indicator of WGF stability Y_{WGF}

$Y_{\text{ВЗК}}$ Y_{WGF}	Категория устойчивости Sustainability category	Характеристика состояния системы Characteristics of the system state
0,00–0,30	Низкая (критическое состояние) Low (critical condition)	Сильная фрагментация элементов каркаса, отсутствие экологических коридоров, низкое биоразнообразие, высокая уязвимость к антропогенному воздействию Strong fragmentation of the framework elements, lack of ecological corridors, low biodiversity, and high vulnerability to anthropogenic impact
0,31–0,50	Недостаточная (напряженное состояние) Insufficient (stressed state)	Наличие отдельных элементов при слабых связях, ограниченная способность к саморегуляции, фрагментарное выполнение рекреационных и экологических функций The presence of individual elements with weak connections, limited ability to self-regulate, and fragmented performance of recreational and environmental functions
0,51–0,70	Средняя (стабильное состояние) Average (stable state)	Сформированная, но не оптимальная структура, наличие основных связей между элементами, выполнение базовых рекреационных и экологических функций A formed but not optimal structure, the presence of basic connections between elements, and the performance of basic recreational and environmental functions
0,71–0,85	Высокая (оптимальное состояние) High (optimal condition)	Хорошо развитая связанная структура, эффективное выполнение функций, высокое биоразнообразие, наличие резервов для компенсации нагрузок A formed but not optimal structure, the presence of basic connections between elements, and the performance of basic recreational and environmental functions
0,86–1,00	Очень высокая (эталонное состояние) Very high (reference condition)	Идеально сбалансированная структура, максимальная экологическая эффективность, полная интеграция в градостроительную систему Perfectly balanced structure, maximum environmental efficiency, and full integration into the urban planning system

ВЗК: развитие системы продольных поясов через увеличение доли озелененных территорий и улучшение их функционального разнообразия; восстановление поперечных связей за счет реабилитации овражно-балочной системы и создания новых экологических коридоров; оптимизация системы узловых элементов через повышение их устойчивости и улучшение интеграции в общую структуру каркаса.

Ключевой особенностью предложенной методологии является ее способность выявлять системные проблемы каркаса, а не просто констатировать недостатки благоустройства территории, что позволяет перейти от точечного благоустройства к стратегическому развитию ВЗК как целостной системы. Полученная количественная интегральная оценка со шкалой градации обеспечивает адаптивность методологии, что дает возможность применять ее для анализа других линейных ГС со схожими условиями. Это обуславливает широкую практическую значимость методологии для целей стратегического планирования и устойчивого развития.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Настоящее исследование позволило провести количественную оценку устойчивости водно-зеленого каркаса Волгограда, которая была классифицирована как низкая ($Y_{\text{ВЗК}} = 0,298$), и выявить системные структурные проблемы. Структура весовых коэффициентов ($a = 0,571$, $b = 0,286$, $c = 0,143$) обладает важным теоретическим и практическим значением, так как указывает на приоритетность направлений развития: инвестиции в развитие продольных поясов и поперечных коридоров будут иметь больший эффект для повышения общей устойчивости системы, чем изолированное благоустройство даже самых крупных узлов.

Полученные данные о поляризации индекса устойчивости узлов J согласуются с результатами других исследований о дифференцированном состоянии зеленых насаждений в крупных промышленных городах [22–24]. Предложенная методология позволяет не только констатировать этот факт, но и количественно ранжировать объекты по степени деградации, определяя первоочередные объекты для ревитализации.

Разработанная методология является адаптируемой. Представленный алгоритм, система показателей и принципы расчета могут быть применены для оценки ВЗК других линейных градостроительных систем, расположенных вдоль крупных рек или транспортных артерий. Однако весовые коэффициенты (a , b , c) и пороговые значения показателей могут нуждаться в корректировке с учетом региональной специфики.

Таким образом, исследование подтвердило эффективность разработанной методологии формирования и оценки модели водно-зеленого каркаса для линейных градостроительных систем. Теоретиче-

ской основой методологии выступает модель ВЗК как иерархической структуры, состоящей из взаимосвязанных продольных поясов, поперечных коридоров и узлов, что позволяет адекватно отражать пространственную организацию линейных ГС. Ключевой результат — разработка интегрального показателя устойчивости $Y_{\text{ВЗК}}$, который агрегирует разнородные характеристики элементов каркаса в единую количественную оценку. Применение метода анализа иерархий для определения весовых коэффициентов дало возможность объективно формализовать вклад каждого элемента в общую устойчивость системы.

Апробация методологии на примере Волгограда показала ее практическую эффективность, выявив критическое состояние ВЗК ($Y_{\text{ВЗК}} = 0,298$) и структурные причины этого состояния — деградацию продольных поясов и поперечных связей. Это подтверждает, что методология является не только диагностическим, но и стратегическим инструментом, указывающим приоритетные направления для градостроительных решений. Важный практический вывод исследования — доказательство необходимости смещения фокуса градостроительной политики с точечного благоустройства отдельных объектов озеленения на комплексное развитие системы ВЗК как целостного пространственного образования. Высокий вес продольных поясов (57,1 %) свидетельствует о том, что именно они должны стать основным объектом стратегических инвестиций, поскольку формируют структуру линейной ГС и аккумулируют ее экологический потенциал. Не менее значимым стал вывод о критической роли поперечных связей. Несмотря на меньший весовой коэффициент (28,6 %), именно деградация поперечных коридоров служит ключевым фактором фрагментации каркаса Волгограда. Следовательно, реабилитация овражно-балочных систем и долин малых рек, а также создание новых поперечных бульваров и аллей должны рассматриваться как стратегический приоритет для восстановления связности и экологической эффективности ВЗК.

Полученные количественные оценки, в частности шкала градации $Y_{\text{ВЗК}}$, предоставляют органам власти и проектировщикам инструментарий для мониторинга состояния каркаса и оценки эффективности принимаемых управленческих решений. Это дает возможность перейти от субъективных экспертных оценок к доказательному планированию в сфере развития городской среды.

Перспективы дальнейших исследований связаны не только с развитием динамического аспекта модели, но и с интеграцией предложенной методологии с инструментами экономического анализа. Оценка стоимости реабилитационных мероприятий для различных элементов каркаса и расчет их ожидаемого влияния на рост $Y_{\text{ВЗК}}$ позволят сформировать экономически обоснованные программы развития ВЗК и оптимизировать бюджетные расходы в условиях ограниченных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Forman R.T.T.* Urban Ecology: Science of Cities. Cambridge : Cambridge University Press, 2014. 474 p.
2. *Антофеев А.В.* Природно-ландшафтные основы формирования линейных градостроительных систем (на примере «Большого Волгограда») // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году : сб. науч. тр. РААСН в 2 т. 2021. Т. 1. С. 185–191. EDN QMJ0YJ.
3. *Ahern J.* Green infrastructure for cities: The spatial dimension // *Cities of the Future Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. London : IWA Publishing, 2007. Pp. 267–283.
4. *Benedict M.A.* Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities. Washington DC : Island Press, 2006. 299 p.
5. *Мусаев Т.И.* Стратегическое градостроительное планирование: перспективы развития в новых условиях // *Архитектура и современные информационные технологии*. 2025. № 1 (70). С. 292–302. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-1-292-302. EDN XBKSOE.
6. *Chen W.Y., Jim C.Y.* Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests // *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests*. 2008. Pp. 53–83. DOI: 10.1007/978-0-387-71425-7_5
7. *Cook E.A.* Landscape structure indices for assessing urban ecological networks // *Landscape and Urban Planning*. 2002. Vol. 58. Issue 2–4. Pp. 269–280. DOI: 10.1016/S0169-2046(01)00226-2
8. *Краснощекова Н.С.* Природный каркас в проекте Концепции Московской агломерации: нормативно-методические и правовые аспекты // *Academia*. Архитектура и строительство. 2014. № 4. С. 9. EDN TDNXTR.
9. *Mell I.C.* Green infrastructure: concepts, perceptions and its use in spatial planning : doctoral dissertation. Newcastle : School of Architecture, Planning and Landscape, Newcastle University, 2010. 413 p.
10. *Перькова М.В., Ладик Е.И.* Овражно-балочные ландшафты в структуре урбанизированных территорий г. Белгорода // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022–2023 годы : науч. тр. РААСН в 2 т. 2024. С. 521–532. EDN IORIPX.
11. *Гуцин А.Н., Дивакова М.Н.* Водно-зеленый каркас Екатеринбурга: история, проблемы, будущее // *Архитектон: известия вузов*. 2022. № 2 (78). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-2(78)-21. EDN WGGFJG.
12. *Borelli S., Chen Y., Conigliaro M., Salbitano F.* Green infrastructure: a new paradigm for developing cities // XIV World Forestry Congress. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1689.8320
13. *Vitulano V.* Integrating green infrastructure in Italian urban plans. Lessons from Turin and Bologna // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024. Vol. 177. Issue 2. Pp. 45–56. DOI: 10.1680/jurdp.22.00049. EDN IEUNVF.
14. *Aly S.S.A., Amer M.S.E.* Green Corridors as a response for nature: Greening Alexandria city by creating a green infrastructure network // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2010. Vol. 1. Pp. 101–117. DOI: 10.2495/DN100101
15. *Kato S.* Green Infrastructure for Asian Cities: The Spatial Concepts and Planning Strategies // *Proceedings of the 2011 International Symposium on City Planning*. Seoul : Korea Planners Association, 2011. Pp. 161–170.
16. *Grădinaru S.R., Hersperger A.M.* Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019. Vol. 40. Pp. 17–28. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.018
17. *Mahmoud I.* Nature-based solutions across spatial urban scales: three case studies from Nice, Utrecht and Milan // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024. Vol. 177. Issue 3. Pp. 109–122. DOI: 10.1680/jurdp.23.00063
18. *Иванова Н.В., Ганжа О.А.* Ландшафтно-экологические особенности формирования комфортной среды умного города (на примере исторического строительства зеленого кольца Сталинграда – Волгограда) // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2017. № 49 (68). С. 153–166. EDN ZGRUIN.
19. *Анопин В.Н., Солодовников Д.А., Степанова Е.А.* Адаптивно-ландшафтные технологии восстановления и преобразования насаждений Зеленого кольца г. Волгограда // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 1 (74). С. 138–150. EDN PHUNUO.
20. *Еланцева А.А., Ельникова Ю.С.* Оценка биоразнообразия герпетобионтов на урбанизированной территории // *Ученые записки Орловского государственного университета*. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. 2015. № 4. С. 149–154. EDN UZDFPB.
21. *Беликова Г.И., Витковская Л.В.* Основы теории вероятностей и элементы математической статистики : учебное пособие. СПб. : РГТМУ, 2018. 160 с. EDN YOSEYX.
22. *Прокопенко В.В., Плешаков И.Н.* Принципы и этапы формирования эколого-градостроитель-

ного каркаса Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2022. № 1 (86). С. 218–229. EDN KOVKHP.

23. Прокопенко В.В. Основные теоретические аспекты формирования системы озелененных территорий в городской среде // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строитель-

ного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 1 (90). С. 224–237. EDN EOJZFR.

24. Прокопенко В.В. Основные методики оценки зеленого каркаса крупнейшего города // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. № 5 (93). С. 155–167. EDN CQIRZW.

Поступила в редакцию 16 декабря 2025 г.

Принята в доработанном виде 19 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 19 февраля 2026 г.

ОБ АВТОРЕ: **Вячеслав Валентинович Прокопенко** — кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой урбанистики и теории архитектуры, Институт архитектуры и строительства; **Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)**; 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; SPIN-код: 5833-4999, РИНЦ ID: 793500, Scopus: 57202817435, ResearcherID: ANA-7525-2022, ORCID: 0000-0002-8161-9766; v.v.p_24@mail.ru.

REFERENCES

1. Forman R.T.T. *Urban Ecology: Science of Cities*. Cambridge, Cambridge University Press, 2014; 474.
2. Antyufeev A. Natural basis for formation of linear urban systems (on the example of “great Volgograd”). *Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020 : collection of scientific papers of RAASN*. 2021; 1:185-191. EDN QMJOYJ. (rus.).
3. Ahern J. Green infrastructure for cities: The spatial dimension. *Cities of the Future Towards Integrated Sustainable Water and Landscape Management*. London, IWA Publishing, 2007; 267-283.
4. Benedict M.A. *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Washington DC, Island Press, 2006; 299.
5. Musaev T.I. Strategic urban planning: development prospects in new conditions. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2025; 1(70):292-302. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-1-292-302. EDN XBKSOE. (rus.).
6. Chen W.Y., Jim C.Y. Assessment and valuation of the ecosystem services provided by urban forests. *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests*. 2008; 53-83. DOI: 10.1007/978-0-387-71425-7_5
7. Cook E.A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning*. 2002; 58(2-4):269-280. DOI: 10.1016/S0169-2046(01)00226-2
8. Krasnoshchokova N.S. The natural framework in the draft concept of the Moscow agglomeration: normative, methodological and legal aspects. *Academia. Architecture and Construction*. 2014; 4:9. EDN TDNXTR. (rus.).
9. Mell I.C. *Green infrastructure: concepts, perceptions and its use in spatial planning : doctoral dissertation*. Newcastle, School of Architecture, Planning and Landscape, Newcastle University, 2010; 413.
10. Perkova M.V., Ladik E.I. Ravine-beam landscapes in the structure of urbanized territories of Belgorod. *Fundamental, exploratory and applied research of RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2022–2023 : Scientific works of RAASN in 2 vol.* 2024; 521-532. EDN IORIPX. (rus.).
11. Gushchin A.N., Divakova M.N. The water and planting infrastructure framework of Yekaterinburg: past, problems, and future. *Architecton: Proceedings of Higher Education*. 2022; 2(78). DOI: 10.47055/1990-4126-2022-2(78)-21. EDN WGGFJG. (rus.).
12. Borelli S., Chen Y., Conigliaro M., Salbitano F. Green infrastructure: a new paradigm for developing cities. *XIV World Forestry Congress*. 2015. DOI: 10.13140/RG.2.1.1689.8320
13. Vitulano V. Integrating green infrastructure in Italian urban plans. Lessons from Turin and Bologna. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024; 177(2):45-56. DOI: 10.1680/jurdp.22.00049. EDN IEUNVF.
14. Aly S.S.A., Amer M.S.E. Green Corridors as a response for nature: Greening Alexandria city by creating a green infrastructure network. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2010; 1:101-117. DOI: 10.2495/DN100101
15. Kato S. Green Infrastructure for Asian Cities: The Spatial Concepts and Planning Strategies. *Proceedings of the 2011 International Symposium on City*

Planning. Seoul, Korea Planners Association, 2011; 161-170.

16. Grădinaru S.R., Hersperger A.M. Green infrastructure in strategic spatial plans: Evidence from European urban regions. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019; 40:17-28. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.018

17. Mahmoud I. Nature-based solutions across spatial urban scales: three case studies from Nice, Utrecht and Milan. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Urban Design and Planning*. 2024; 177(3):109-122. DOI: 10.1680/jurdp.23.00063

18. Ivanova N.V. E., Ganzha O.A. Landscape and ecological features of the formation of comfortable environment of smart cities (by the example of the historical construction of a “green ring” of Stalingrad – Volgograd). *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2017; 49(68):153-166. EDN ZGRUIN. (rus.).

19. Anopin V.N., Solodovnikov D.A., Stepanova E.A. Adaptive and landscape technologies for the restoration and transformation of the plantations of the green ring of Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2019; 1(74):138-150. EDN PHUNUO. (rus.).

Received December 16, 2025.

Adopted in revised form on February 19, 2026.

Approved for publication on February 19, 2026.

20. Elanceva A.A., Elnicova Y.S. The herpetobiont's evaluation from the urbanized territory. *Scientific Notes of Orel State University. Series: Natural, Technical and Medical Sciences*. 2015; 4:149-154. EDN UZDFPB. (rus.).

21. Belikova G.I., Vitkovskaya L.V. *Fundamentals of Probability Theory and Elements of Mathematical Statistics*. St. Petersburg, RGGMU, 2018; 160. EDN YOSEYX. (rus.).

22. Prokopenko V.V., Pleshakov I.N. Principles and stages of formation of the ecological and urban planning framework of Volgograd. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2022; 1(86):218-229. EDN KOVKHP. (rus.).

23. Prokopenko V.V. The main theoretical aspects of the formation systems of green areas in the urban environment. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2023; 1(90):224-237. EDN EOJZFR. (rus.).

24. Prokopenko V.V. The main methods of assessing the green framework of the largest city. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2023; 5(93): 155-167. EDN CQIRZW. (rus.).

B I O N O T E S: **Vyacheslav V. Prokopenko** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Urban Studies and Theory of Architecture, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; SPIN-code: 5833-4999, ID RSCI: 793500, Scopus: 57202817435, ResearcherID: AHA-7525-2022, ORCID: 0000-0002-8161-9766; v.v.p_24@mail.ru.