

И. И. Счастливая¹, М. А. Крупская²

ЛАНДШАФТНЫЕ МЕТРИКИ КАК ИНСТРУМЕНТ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ОЗЕЛЕНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ГОРОДОВ БРАСЛАВА И БАРАНОВИЧЕЙ (БЕЛАРУСЬ)

АННОТАЦИЯ

Создание устойчивой системы озелененных территорий в городах, как один из способов создания комфортной городской среды — актуальная проблема в современных условиях активной урбанизации. В статье предлагается один из вариантов решения этой проблемы — использование ландшафтных индексов как базового инструмента для оценки устойчивости структуры систем озелененных территорий (на примере городов Браслава и Барановичей, различающихся по природным условиям, масштабу и функциям). Оценка и сравнение проведено по трем типам показателей: площадь (средняя площадь участка (AREA_MN), индекс наибольшего участка (LPI)); форма (среднее соотношение периметра и площади (PARA_MN) и усредненный индекс формы участка (SHAPE_MN)); агрегация (плотность участков (PD), индекс агрегации (AI), индекс разделения (SPLIT) и полезный размер сетки (MESH)). Для комплексной характеристики и выводов использован метод главных компонент, позволивший получить расчетные баллы, характеризующие степень устойчивости систем озелененных территорий городов. Результаты расчетов выявили, что тенденции развития систем озелененных территорий в обоих городах схожи: уменьшение площади при увеличивающейся фрагментации и раздробленности. Система их озелененных территорий характеризуется нестабильной динамикой с чередованием как положительных, так и отрицательных периодов. В г. Браславе динамика комплексного балла более изменчива, с частыми колебаниями от положительного до отрицательного состояния (лучшее состояние отмечается в 2017 г.: 3,42 балла; худшее — в 2018 г.: –2,40 балла). При этом в г. Барановичах изменения были более плавными и в последние годы происходило стабильное улучшение (лучшее состояние отмечается в 2017 г.: 3,63 балла; худшее — в 2020 г.: –2,82 балла). Также установлено, что даже при сокращении площади улучшение таких характеристик, как агрегация, форма участков, уменьшение фрагментации и сохранение крупных участков позволяет сохранить устойчивость озелененных территорий и дает возможность предложить направления оптимизации и элементы совершенствования системы их управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система озелененных территорий, зеленая инфраструктура, ландшафтные метрики, пространственная структура, городское планирование

¹ Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, д. 4, Минск, Республика Беларусь, 220030, e-mail: shchasnaya@bsu.by

² Научно-проектное республиканское унитарное предприятие «БЕЛНИИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА», пр-т Машерова, д. 29, Минск, Республика Беларусь, 220002, e-mail: maria.krupskayya@gmail.com

Iryna I. Shchasnaya¹, Maria A. Krupskaya²

LANDSCAPE METRICS AS A TOOL FOR THE ASSESSING SPATIAL STRUCTURE SUSTAINABILITY OF GREEN AREAS OF THE CITIES OF BRASLAV AND BARANOVICHI (BELARUS)

ABSTRACT

The creation of a sustainable green areas system of cities, as one of the means of developing a comfortable urban environment, represents a pressing issue in the context of rapid urbanization. This article proposes one possible approach to addressing this issue — the use of landscape metrics as a fundamental tool for assessing the structural sustainability of green areas systems, using the cities of Braslav and Baranovich as case studies. These cities differ in their natural conditions, size, and functional characteristics. Assessment and comparison was carried out according to three types of parameters: area (Mean Patch Area (AREA_MN), Largest Patch Index (LPI)); shape (Perimeter-Area Ratio Distribution (PARA_MN), Mean Patch Shape Index (SHAPE_MN)); aggregation (Patch Density (PD), Aggregation Index (AI), Splitting Index (SPLIT) and Effective Mesh Size (MESH)). The principal component analysis was applied for integrated characteristics and derivations to obtain computational scores indicating the degree of sustainability of urban green areas systems. The calculation results showed that the tendencies of green areas systems development in both cities are similar: decreasing area along with increasing fragmentation and splitting. The green areas system is characterized by unstable dynamics, with alternation of both positive and negative periods. The dynamics of the complex score is more unstable in Braslav, with frequent fluctuations from positive to negative condition (the best condition is indicated in 2017: 3.42 points; the worst condition is indicated in 2018: -2.40 points). Meanwhile, in Baranovich city the variations were more gradual and a stable improvement has taken place in recent years (the best condition is registered in 2017: 3.63 points; the worst condition is registered in 2020: -2.82 points). Furthermore, it is also discovered that although the area is reducing, the improvement of such characteristics as aggregation, shape of patches, reduction of fragmentation and preservation of large patches allows maintaining the sustainability of green areas and allows providing guidelines towards optimization and options for improvement of its management framework.

KEYWORDS: green areas system, green infrastructure, landscape metrics, spatial structure, urban planning

ВВЕДЕНИЕ

Изучением структуры, экологического состояния и функций озелененных территорий городов занимается большое количество исследователей из разных стран, в т. ч. и в Беларуси [Кравчук, 2011; Счастливая, Рондак, 2024; Shchasnaya, Varabyou, 2024]. Однако актуальность проблемы создания комфортной среды для жизни населения в городах определяет необходимость поиска новых путей ее решения, в т. ч. и с привлечением новых инструментов.

В соответствии с одним из основных положений теории ландшафтной экологии, пространственная структура организмов, популяций и экосистем в ландшафте отражает действие природных и антропогенных факторов и, в свою очередь, формирует многие экологические процессы. Эта взаимосвязь пространства и процессов, происходящих в его

¹ Belarusian State University, 4, Nezavisimosti ave., Minsk, 220030, Belarus, *e-mail:* shchasnaya@bsu.by
² Scientific and design republican unitary enterprise “BELNIIPGRADOSTROITELSTVA”, 29, Masherova ave., Minsk, 220002, Belarus, *e-mail:* maria.krupskayya@gmail.com

пределах, определила количественную оценку ландшафтной структуры как одну из наиболее фундаментальных задач ландшафтной экологии.

Появление пакета анализа FRAGSTATS почти 30 лет назад позволило значительно преобразовать анализ ландшафтной структуры и утвердить индексы ландшафтной структуры или «ландшафтные метрики» в наборе статистических инструментов многих экологов и биогеографов [Kupfer, 2012].

В теории ландшафтной экологии ландшафт представляется как гетерогенный регион, состоящий из ряда различных участков (patches) или компонент ландшафтной структуры. Под ландшафтной структурой (landscape pattern) понимается пространственная конфигурация участков ландшафта различных размеров и форм. Ландшафтная структура отражает не только его неоднородность, но и следствия антропогенной деятельности и природных процессов в разных масштабах [Yu et al., 2019].

Ландшафтные метрики — это количественные показатели, описывающие структурные и пространственные аспекты ландшафта. Для описания ландшафтной структуры используются метрики, разработанные для оценки на уровне участков (например, размер, форма) и ландшафта в целом (плотность и разнообразие участков, их связность) [McGarigal et al., 2002]. При этом цель анализа ландшафтной структуры должна заключаться в установлении связи между ландшафтными метриками и их влиянием на экологические процессы, а не полагаться на количественное описание пространственной структуры [Kupfer, 2012].

В качестве ландшафта может рассматриваться как городское пространство в целом, так и его отдельные зоны, в частности озелененные территории (ОТ). Система ОТ города формируется территориями общего пользования, территориями специального назначения, участками естественной растительности, лесами и прочими зелеными насаждениями. Структура ОТ имеет решающее значение для поддержания биоразнообразия [Norton et al., 2016]. Обеспечение рационального размещения озелененных территорий может способствовать росту количества и качества экосистемных услуг [Grafius et al., 2018]. Оценка ландшафтной структуры находит свое применение и в сфере городского планирования [Wu, Ding, 2022].

Помимо традиционных подходов на основе FRAGSTATS, для оценки связности и устойчивости зеленой инфраструктуры применяются и другие методы геоинформационного моделирования, в частности морфологический анализ пространственных паттернов (Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA). MSPA используется в работах, посвященных вопросам сохранения и развития зеленой инфраструктуры городов, а также интерпретации ландшафтных метрик [Петров, Колбовский, 2020].

Целью исследования является изучение и оценка устойчивости структуры систем озелененных территорий городов Браслава и Барановичей с применением ландшафтных индексов для определения направлений оптимизации и предложений по совершенствованию системы их управления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Браслав — курортный город на северо-западе Беларуси, административный центр Браславского района Витебской обл. Расположен между озерами Дривяты, Новята, Свято и Неспиш. Браслав является одним из наиболее привлекательных малых городов страны для туризма и отдыха.

Наличие большого количества неблагоустроенных заболоченных и покрытых древесно-кустарниковой растительностью территорий является одной из основных проблем существующей системы озелененных территорий общего пользования г. Браслава. Кроме того, большинство благоустроенных объектов приурочены к центральной части города

либо располагаются вдоль береговой линии озер. Большая площадь жилой усадебной застройки характеризуется низким уровнем развития системы озелененных территорий общего пользования (рис. 1).



Рис. 1. Система озелененных территорий г. Браслава
Fig. 1. The green areas system of the city of Braslav

Город Барановичи — административный центр одноименного района в Брестской обл., расположен в северо-восточной ее части, в трансевропейском коридоре Е-2. Барановичи — крупный промышленный, образовательный и культурный центр, ключевой транспортный узел на западе Беларуси.

Пространственная структура системы озелененных территорий города может быть характеризована как неравномерная. В центральной части ОТ представлены большим количеством разнообразных элементов — коридорами и участками малого и среднего размера (парки по ул. Комсомольской, бульвары и скверы, на севере — водно-зеленая система по берегам оз. Светиловичского). Территории вблизи городской черты имеют широкомасштабную структуру — это такие территории, как пригородный лесопарк «Гай» и зеленая зона у водохранилища на р. Мышанке. Город Барановичи выделяется отсутствием естественных коридоров ОТ, таких как реки или обширные зеленые зоны и присутствием железной дороги без упорядоченной системы озеленения (рис. 2). Отсутствие природных коридоров и небольшое количество зеленых насаждений вдоль железнодорожной линии

представляет собой отклонение от имеющихся экологических подходов и снижает качество жизни городского населения [Forman, 1995].

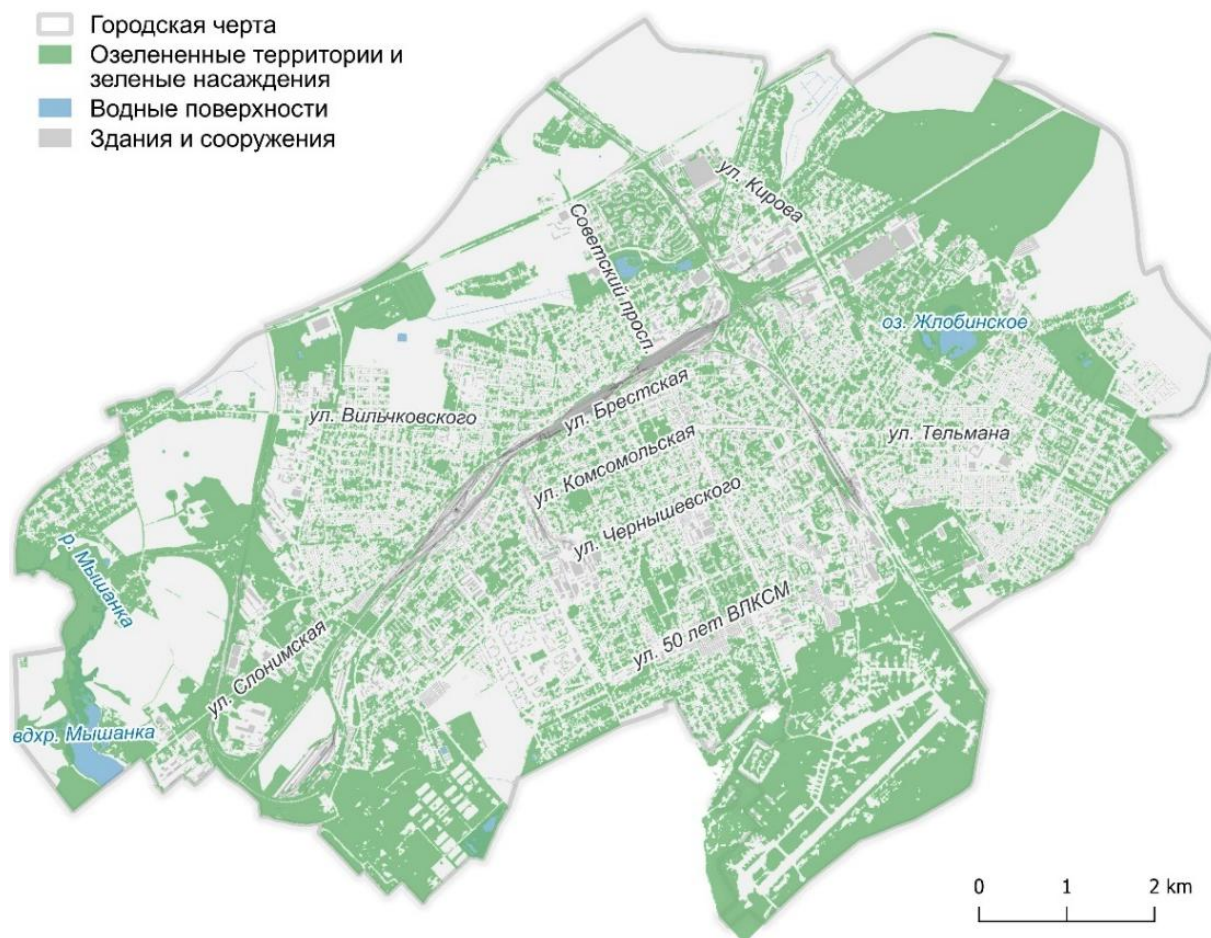


Рис. 2. Система озелененных территорий г. Барановичей
Fig. 2. The green areas system of the city of Baranovichi

В качестве материалов для настоящего исследования использовались открытые данные из «Схемы озелененных территорий общего пользования г. Барановичи», пространственные данные УП «БЕЛНИИПГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА» и изображения за летний период 2017–2023 гг. с пространственным разрешением 10 м, полученные в рамках миссии Sentinel-2. На основании ДЗЗ был рассчитан индекс NDVI, по значениям которого были выделены зеленые насаждения города. Затем с помощью программы расчета ландшафтных индексов Fragstats 4.0 рассчитаны индексы ландшафтной структуры систем озелененных территорий для каждого года за период 2017–2023 гг.

Для изучения структуры и развития системы озелененных территорий городов были выбраны три типа показателей (площадь, форма и агрегация). Индексы площади следующие: средняя площадь участка (AREA_MN) и индекс наибольшего участка (LPI), который представляет собой степень фрагментации ландшафта, предназначен для измерения доли общей площади, занимаемой наибольшим участком в городе. Индексы формы основываются на периметре и площади участков: среднее соотношение периметра и площади (PERA_MN), усредненный индекс формы участка (SHAPE_MN). Индексы степени агрегации отражают степень пространственной агрегации или разделения участков в ландшафте. Если ландшафт состоит из множества разрозненных и небольших участков,

то степень агрегации низкая, а если ландшафт состоит из нескольких крупных участков, то степень агрегации высокая. В данном исследовании в качестве показателей степени агрегации были выбраны плотность участков (PD), индекс агрегации (AI), индекс разделения (SPLIT) и полезный размер сетки (MESH).

Метод главных компонент (PCA) — метод, используемый для создания минимального набора данных, потеряв наименьшее количество информации. Это метод многомерного статистического анализа, в котором небольшое число важных переменных, называемых главными компонентами, выбирается путем линейного преобразования множества переменных. PCA объединяет комплексные показатели переменных с минимальной потерей исходной информации. Формула (1) для расчета с использованием метода главных компонент:

$$F_p = a_{1i}Z_{x1} + a_{2i}Z_{x2} + a_{3i}Z_{x3} + \dots + a_{pi}Z_{xp} \quad (1),$$

где $a_{1i}, a_{2i}, \dots, a_{pi} (i = 1, 2, \dots, m)$ — собственный вектор, соответствующий собственному значению ковариационной матрицы X ,

$Z_{x1}, Z_{x2}, \dots, Z_{xp}$ — нормализованное значение исходной переменной.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Выполнены расчеты ландшафтных индексов систем озелененных территорий городов Браслава и Барановичей за период 2017–2023 гг. (табл. 1–2).

Табл. 1. Ландшафтные индексы системы озелененных территорий г. Браслава за 2017–2023 гг.

Table 1. Landscape Metrics of the Green Areas System of the City of Braslav for 2017–2023

| Год | AREA_MN | LPI | PARA_MN | SHAPE_MN | PD | AI | SPLIT | MESH |
|------|---------|------|----------|----------|-------|-------|--------|-------|
| 2017 | 1,07 | 5,13 | 3 607,44 | 1,46 | 15,15 | 93,88 | 249,24 | 13,99 |
| 2018 | 0,67 | 2,64 | 3 791,43 | 1,41 | 20,63 | 93,23 | 602,42 | 5,79 |
| 2019 | 0,89 | 2,73 | 3 604,72 | 1,44 | 17,27 | 93,60 | 461,59 | 7,55 |
| 2020 | 0,69 | 2,81 | 3 707,08 | 1,39 | 19,25 | 93,37 | 633,10 | 5,51 |
| 2021 | 1,12 | 4,49 | 2 797,69 | 1,41 | 13,40 | 94,10 | 298,35 | 11,68 |
| 2022 | 0,82 | 3,20 | 3 674,26 | 1,43 | 18,44 | 93,48 | 497,20 | 7,01 |
| 2023 | 0,70 | 2,88 | 3 235,55 | 1,36 | 19,51 | 93,21 | 483,39 | 7,21 |

Табл. 2. Ландшафтные индексы системы озелененных территорий г. Барановичей за 2017–2023 гг.

Table 2. Landscape Metrics of the Green Areas System of the City of Baranovichy for 2017–2023

| Год | AREA_MN | LPI | PARA_MN | SHAPE_MN | PD | AI | SPLIT | MESH |
|------|---------|------|----------|----------|-------|-------|----------|-------|
| 2017 | 0,60 | 3,58 | 3 190,21 | 1,43 | 38,81 | 92,37 | 320,72 | 44,41 |
| 2018 | 0,42 | 2,75 | 3 329,98 | 1,35 | 44,67 | 92,07 | 630,59 | 22,59 |
| 2019 | 0,35 | 2,77 | 3 285,07 | 1,38 | 48,58 | 90,60 | 905,24 | 15,73 |
| 2020 | 0,31 | 1,37 | 3 409,75 | 1,29 | 44,52 | 91,87 | 1 551,25 | 9,18 |
| 2021 | 0,41 | 2,89 | 3 328,01 | 1,35 | 41,12 | 92,12 | 791,16 | 18,00 |
| 2022 | 0,36 | 1,43 | 3 341,75 | 1,34 | 45,22 | 91,75 | 1 179,08 | 12,08 |
| 2023 | 0,45 | 2,80 | 3 299,97 | 1,36 | 42,23 | 92,19 | 696,46 | 20,46 |

Анализ расчетов показал, что в г. Браславе за период с 2017 по 2023 гг. общая площадь озелененных территорий уменьшилась с 566,25 га (61,25 % от площади города) в 2017 г. до 477,44 га (51,64 %) в 2023 г. Общая площадь озелененных территорий г. Барановичей уменьшилась с 3 307,86 га в 2017 г. до 2 718,08 га в 2023 г. Процент площади города, занятый зелеными насаждениями, снизился с 38,59 до 31,71 %.

Изучение динамики ландшафтных индексов системы озелененных территорий проведено в рамках трех основных групп (площадь, форма, агрегация).

В Браславе средняя площадь участков (AREA_MN) варьируется от 0,67 га в 2018 г. до 1,12 га в 2021 г., что указывает на относительно большие участки ОТ. В Барановичах средняя площадь участков значительно меньше, изменяется от 0,31 га в 2020 г. до 0,60 га в 2017 г. Это свидетельствует о том, что система ОТ в Барановичах более фрагментирована, с меньшими по площади участками озеленения. Индекс наибольшего участка (LPI) подтверждает это: в Браславе показатель варьируется от 2,64 в 2018 г. до 5,13 в 2017 г., что говорит о крупном наибольшем участке, занимающем значительную долю общей площади. В Барановичах индекс LPI колеблется от 1,37 в 2020 г. до 3,58 в 2017 г., следовательно доля территории города, занятая единым участком ОТ, меньше.

Индексы формы — это отношения периметра и площади участков. В г. Браславе индекс соотношения периметра и площади (PERIM_MN) колеблется от 2 797,69 в 2021 г. до 3 791,43 в 2018 г., что указывает на разнообразие форм участков, их нерегулярные границы. В Барановичах этот индекс варьируется от 3 190,21 в 2017 г. до 3 409,75 в 2020 г., что также свидетельствует о разнообразии форм, но оно несколько меньше, чем в Браславе. Усредненный индекс формы участка (SHAPE_MN) также помогает понять характер формы участков. В Браславе он варьируется от 1,36 в 2023 г. до 1,46 в 2017 г., что указывает на участки с умеренно сложной формой. В Барановичах значения SHAPE_MN колеблются от 1,29 в 2020 г. до 1,43 в 2017 г., и по этому показателю форма участков более компактна.

Анализ степени агрегации показывает, как участки расположены относительно друг друга. В Браславе плотность участков (PD) варьируется от 13,40 в 2021 г. до 20,63 в 2018 г., что указывает на меньшее количество составляющих участков. При большей площади, занятой ОТ, в Барановичах этот показатель значительно выше и колеблется от 38,81 в 2017 г. до 48,58 в 2019 г. Индекс агрегации (AI) в Браславе выше и варьируется от 93,21 в 2023 г. до 94,10 в 2021 г., что говорит о более высоком уровне агрегации — участки находятся ближе друг к другу. В Барановичах индекс AI варьируется от 90,60 в 2019 г. до 92,37 в 2017 г., что указывает на менее выраженную агрегацию, но в целом она остается на среднем уровне. Индекс разделения (SPLIT) в Браславе варьируется от 249,24 в 2017 г. до 633,10 в 2020 г., что свидетельствует о менее выраженном разделении участков по сравнению с Барановичами, где SPLIT варьируется от 320,72 в 2017 г. до 1 551,25 в 2020 г., что подтверждает более высокую степень разделения и большую фрагментацию. Полезный размер сетки (MESH) в Браславе колеблется от 5,51 в 2020 г. до 13,99 в 2017 г., что свидетельствует о меньших размерах сетки (участков). В Барановичах MESH значительно выше и варьируется от 9,18 в 2020 г. до 44,41 в 2017 г., что указывает на более крупные участки.

Далее, для сравнения динамики систем озелененных территорий городов проведен анализ индексов, полученных методом главных компонент, и выделены две главные компоненты с совокупным коэффициентом вклада 85 % для г. Браслава и 93 % для г. Барановичей.

Расчетный (комплексный) балл представляет собой сумму значений главных компонент, умноженную на их вес, т. е. общую оценку системы озелененных территорий города за год. Результаты расчета комплексного балла, представленные в табл. 3, позволяют сравнить структуру и динамику систем озелененных территорий городов (рис. 3).

Сравнивая комплексные баллы городов, в первую очередь можно отметить, что оба города характеризуются нестабильной динамикой с чередованием как положительных, так и отрицательных периодов.

Табл. 3. Комплексная оценка систем озелененных территорий гг. Браслава и Барановичей за 2017–2023 гг.
Table 3. Comprehensive Assessment of the Green Areas Systems of the Cities of Braslav and Baranovichi for 2017–2023

| Год | Расчетный (комплексный) балл | |
|------|------------------------------|---------------|
| | г. Браслав | г. Барановичи |
| 2017 | 3,42 | 3,63 |
| 2018 | -2,40 | 0,18 |
| 2019 | -0,12 | -0,12 |
| 2020 | -2,03 | -2,82 |
| 2021 | 3,19 | 0,10 |
| 2022 | -0,70 | -1,48 |
| 2023 | -1,36 | 0,53 |

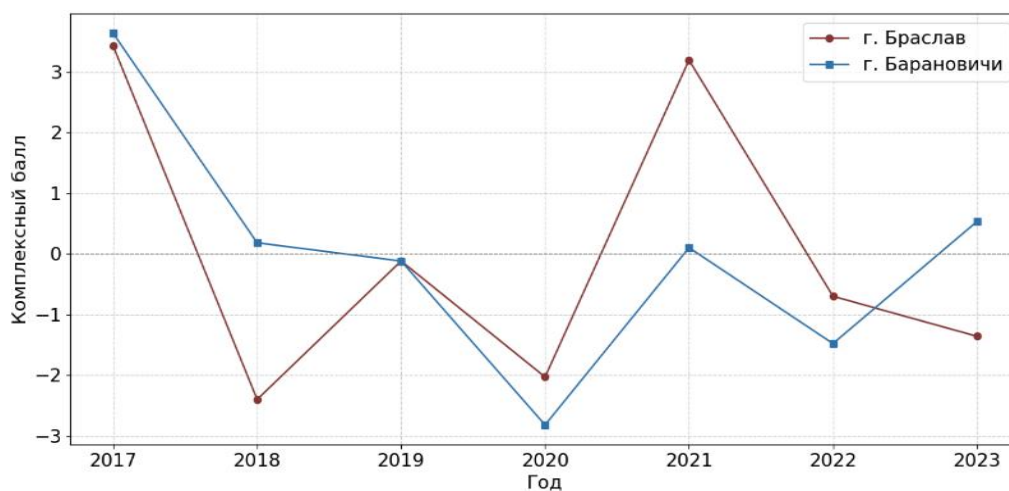


Рис. 3. Динамика комплексного балла ландшафтной структуры систем озелененных территорий гг. Браслава и Барановичей за период 2017–2023 гг.
Fig. 3. Dynamics of the comprehensive assessment value of the landscape structure of green areas systems in the cities of Braslav and Baranovichi for 2017–2023

В 2017 г. Браслав демонстрирует один из самых высоких показателей комплексного балла — 3,42. Это указывает на хорошее состояние системы озелененных территорий в городе с благоприятными условиями для озеленения и минимальной фрагментацией. Такой результат достигается за счет наиболее благоприятных показателей LPI, SHAPE_MN, SPLIT и MESH. В 2018 г. комплексный балл резко падает до -2,40 при наименее благоприятных значениях LPI, PARA_MN, PD, AI, MESH. В последующие годы комплексный балл системы г. Браслава оставался отрицательным вплоть до 2023 г., хотя и вырос с -2,40 в 2018 г. до -1,36 в 2023 г. Таким образом, динамика балла в г. Браславе характеризуется

большими колебаниями с резким ухудшением в 2018 г. и постепенным, но неполным восстановлением.

В 2017 г. система ОТ г. Барановичей характеризуется значением комплексного балла 3,63, что немного выше, чем в г. Браславе; все рассматриваемые показатели для этого года являются наиболее благоприятными за весь период. Это также свидетельствует о хорошем состоянии системы озеленения с низким уровнем фрагментации и большой площадью крупных участков. В 2018 г. происходит снижение качества системы, но в отличие от г. Браслава падение гораздо менее резкое — до 0,18. Это указывает на меньшую степень ухудшения, система ОТ в г. Барановичах более стабильна. В 2020 г. комплексный балл падает до $-2,82$, что является наиболее выраженным ухудшением; отмечаются наименее благоприятные значения AREA_MN, LPI, PARA_MN, SHAPE_MN, SPLIT и MESH. После этого в 2021 г. система ОТ восстанавливается, хотя и с меньшими результатами: балл повышается до 0,10. В 2022 г. происходит снижение балла до $-1,48$, ухудшение показателей LPI, SPLIT, MESH. В 2023 г. система города показывает улучшение с комплексным баллом 0,53, что продолжает положительную динамику и восстановление после значений 2020 г.

Таким образом, оба города показывают схожие тренды развития озелененных территорий: резкое ухудшение комплексных показателей в начале рассматриваемого периода, что связано с сокращением их площади, повышением фрагментации и раздробленности систем и постепенное восстановление в дальнейшем.

В г. Браславе динамика комплексного балла более изменчива, с большими колебаниями от положительного до отрицательного состояния. При этом в г. Барановичах изменения были более плавными, и в последние годы происходило стабильное улучшение. Несмотря на резкое падение в 2020 г., в г. Барановичах к 2023 г. была достигнута положительная динамика, в то время как в г. Браславе улучшения являются менее выраженными.

Оба города демонстрируют четкую взаимосвязь между уменьшением площади озелененных территорий и ухудшением значений ландшафтных индексов. Это влияет на снижение комплексного балла и, как следствие, на экологическую и эстетическую ценность городского пространства. В таких условиях структура и связность могут выступать в качестве компенсаторных механизмов. Даже при снижении площади улучшение таких параметров, как агрегация (AI), индекс наибольшего участка (LPI), индекс формы участка (SHAPE_MN) и уменьшение фрагментации (низкий SPLIT) может повысить общее качество и устойчивость системы озелененных территорий городов.

В г. Браславе снижение состояния системы озеленения было более значительным и восстановление менее эффективным, поскольку были утрачены протяженные и связующие участки, играющие важную роль в целостности системы. Это вызвало рост фрагментации и снижение связности. Потери затронули не только точечные и небольшие участки, но и важные линейные элементы, значимые также по площади, что повлияло на индексы SPLIT, AI и MESH (рис. 4).

Такое положение, вероятно, обусловлено сокращением численности населения и изменением площади жилищного фонда. Отток населения приводит к снижению финансирования содержания озелененных территорий, а трансформация жилищного фонда — к их фрагментации из-за точечной застройки или ликвидации отдельных участков.

Из графического представления разницы в озелененных территориях г. Барановичей за 2017 и 2023 гг. видно, что сократившиеся участки характеризуются незначительной протяженностью (рис. 5). Это позволило системе быстрее восстановить свои показатели, сохранив основную структуру и связи между крупными участками. Улучшение состояния подтверждается ростом комплексного балла к 2023 г. и меньшими потерями в индексах связности и формы.

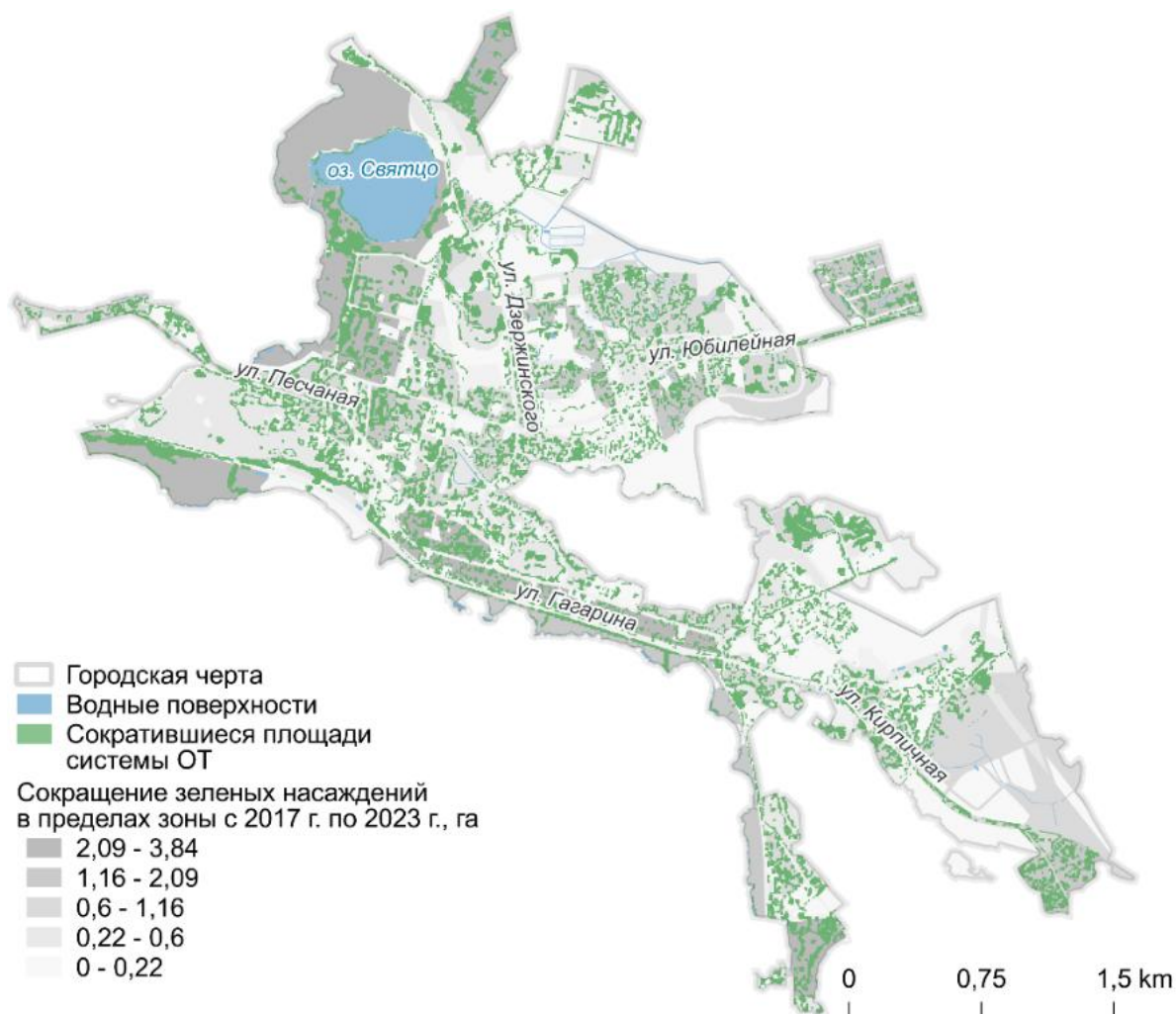


Рис. 4. Изменение ландшафтной структуры системы озелененных территорий г. Браслава за период 2017–2023 гг.

Fig. 4. Transformation of the landscape structure of the green areas system of the city of Braslav for 2017–2023

Для зеленой инфраструктуры ключевым фактором мог стать рост объема монтажных работ, связанный с активной застройкой или инфраструктурными проектами, которые временно нарушили целостность зеленых зон. Кроме того, экономические колебания, такие как сокращение инвестиций в определенные годы, явно повлияли на состояние системы, что подчеркивает зависимость экологических систем от бюджетного планирования. Интересно, что сокращение населения в период улучшения состояния зеленой инфраструктуры может указывать на снижение антропогенной нагрузки или перераспределение бюджетных средств в пользу экологических программ.

Результаты анализа полученных результатов позволяют предложить несколько направлений по оптимизации системы озелененных территорий городов.

Прежде всего, важно сохранять и увеличивать площадь озелененных территорий, особенно тех, которые в большей степени влияют на показатели связности и непрерывности. Важно стремиться к укрупнению участков, повышению агрегации и формированию зеленых коридоров. Состояние системы озелененных территорий необходимо оценивать также не только по площади, но и по структуре, используя ландшафтные индексы. При стратегическом планировании следует учитывать возможность интеграции участков ОТ в

существующую и перспективную застройку, снижая фрагментацию и обеспечивая распространение и расширение зеленых пространств. Кроме того, более широкий региональный (многоуровневый) взгляд на планирование — внимание к структуре и связности не только внутри города, но и в его пригородной зоне — усиливает устойчивость зеленой инфраструктуры и расширяет возможности для распределения экосистемных услуг в городской системе [Forman, 2008].

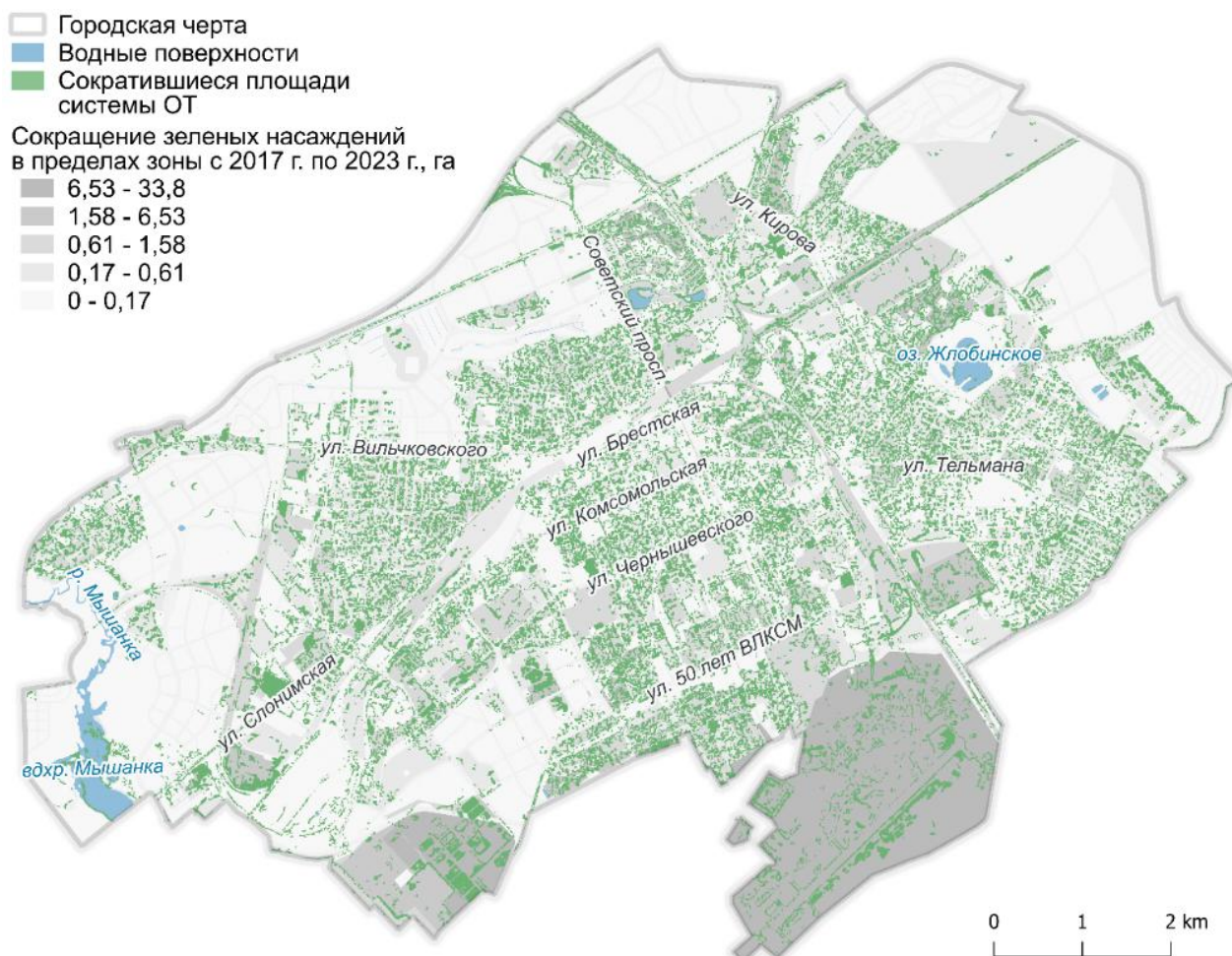


Рис. 5. Изменение ландшафтной структуры системы озелененных территорий г. Барановичей за период 2017–2023 гг.
 Fig. 5. Transformation of the landscape structure of the green areas system of the city of Baranovichi for 2017–2023

Таким образом, сохранение и развитие системы озеленения требует комплексного подхода, включающего поддержание показателей площади, структурную оптимизацию и стратегическое планирование. Даже в условиях плотной застройки и роста урбанизации сохранение формы, связности и структуры озелененных территорий позволяет обеспечить устойчивость системы, сохранять биологическое разнообразие и создать комфортную городскую среду.

ВЫВОДЫ

Несмотря на ограничения, связанные с разрешением данных, ландшафтные метрики продолжают широко использоваться, поскольку являются простым и доступным инструментом для оценки изменений в структуре любой системы и, как следствие, изменений в базовых экологических процессах.

В исследовании рассматривается структура систем озелененных территорий городов Браслава и Барановичей на основании набора ландшафтных индексов, описывающих площадь участков (AREA_MN, LPI), форму участков (PARA_MN, SHAPE_MN) и их агрегацию (PD, AI, SPLIT, MESH). Метод главных компонент (PCA) применяется для уменьшения набора данных и расчета комплексного балла структуры территорий за год.

В результате изучения пространственной структуры озелененных территорий с помощью ландшафтных индексов становится возможным сравнение территорий городов, различающихся по природным условиям, масштабу и их функциям, что позволяет выявлять закономерности и факторы, влияющие на развитие и состояние озелененных территорий в городах.

Тенденции развития систем озелененных территорий в обоих городах схожи: уменьшение площади и упрощение краев при увеличивающейся фрагментации и разобщенности озелененных территорий городов. Так, для г. Браслава в 2017 и 2021 гг. отмечаются наилучшие показатели, что подтверждается высокими значениями показателей агрегации, такими как индекс агрегации (AI), индекс связности (COHESION) и относительно низкий индекс разбиения (SPLIT). В эти годы отмечаются также хорошие показатели по среднему размеру участков, что говорит о хорошей пространственной целостности и низкой степени фрагментации. В 2018, 2020 и 2022 гг. система характеризуется ухудшением параметров: увеличивается фрагментация, снижается размер полезной сетки и уменьшается средний размер участков. Несмотря на географическое положение и рекреационную функцию города, Браслав оказался подвержен более резким изменениям системы озелененных территорий, что характеризует ее как менее устойчивую.

Город Барановичи, наоборот, показывает более стабильное состояние системы ОТ, хотя и с некоторыми отклонениями. В наименее благоприятные годы (особенно 2020 г.) наблюдается резкое ухудшение показателей, включая минимальные значения по показателям AREA_MN, SHAPE_MN, LPI и MESH и максимальные значения PARA_MN и SPLIT, что говорит о сильной пространственной деградации системы. В 2023 г. отмечается положительная динамика и опережение г. Браслава. В целом в городе более плавная динамика изменений и, в сравнении с г. Браславом, можно говорить о более устойчивой системе озеленения.

Из результатов сравнительного анализа следует, что ключевым фактором снижения устойчивости системы озелененных территорий является сокращение ее площади, что отражается через ухудшение значений ландшафтных индексов. Однако анализ также выявил, что даже при сокращении площади улучшение таких характеристик, как агрегация, форма участков, уменьшение фрагментации и сохранение крупных участков позволяет поддержать или полностью сохранить устойчивость системы озелененных территорий.

Для этого приоритет должен отдаваться сохранению протяженных зеленых коридоров, соединяющих парки, скверы, городские леса и другие крупные элементы системы. В рамках градостроительного планирования, особенно при разработке проектов «Схема озелененных территорий общего пользования города», необходимо выделять структурно важные участки озелененных территорий и ограничивать их застройку. Полезным также представляется создание зеленых коридоров и буферных зон, соединяющих фрагментированные ОТ, особенно в условиях плотной городской застройки. Следует поддерживать и создавать малые озелененные участки (ОТ ограниченного пользования, насаждения улиц).

Введение ландшафтных индексов как элемента в систему управления озелененными территориями также существенно расширяет ее возможности. Регулярный мониторинг и анализ устойчивости структуры озелененных территорий с использованием предлагаемого инструмента позволит своевременно выявлять проблемные зоны и разрабатывать локальные стратегии озеленения, направленные на решение конкретных проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кравчук Л. А. Структурно-функциональная организация ландшафтно-рекреационного комплекса в городах Беларуси. Минск: Беларуская навука, 2011. 170 с.

Петров Л. А., Колбовский Е. Ю. Современные методы пространственного анализа зеленой инфраструктуры урбанизированных территорий (на примере города Грозного). Грозненский естественнонаучный бюллетень, 2020. Т. 5. № 3(21). С. 39–51. DOI: 10.25744/genb.2020.20.3.004.

Счастливая И. И., Рондак У. А. Оценка экологического состояния и экосистемных услуг озелененных территорий общего пользования г. Жодино. Журнал Белорусского государственного университета. Экология, 2024. С. 24–34. DOI: 10.46646/2521-683X/2024-2-24-34.

Forman R. T. T. Some General Principles of Landscape and Regional Ecology. *Landscape Ecology*, 1995. V. 10. P. 133–142. DOI: 10.1007/BF00133027.

Forman R. T. T. *Urban Regions: Ecology and Planning Beyond the City*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754982.

Grafius D. R., Corstanje R., Harris J. A. Linking Ecosystem Services, Urban Form and Green Space Configuration Using Multivariate Landscape Metric Analysis. *Landscape Ecology*, 2018. No. 33. P. 557–573. DOI: 10.1007/s10980-018-0618-z.

Kupfer J. A. Landscape Ecology and Biogeography: Rethinking Landscape Metrics in a Post-FRAGSTATS Landscape. *Progress in Physical Geography*, 2012. P. 400–420. DOI: 10.1177/0309133312439594.

McGarigal K., Cushman S. A., Neel M. C., Ene E. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, 2002. 182 p.

Norton B. A., Evans K. L., Warren P. H. Urban Biodiversity and Landscape Ecology: Patterns, Processes and Planning. *Current Landscape Ecology Reports*, 2016. No. 1. P. 178–192. DOI: 10.1007/s40823-016-0018-5.

Shchasnaya I., Varabyou D. Assessment of the Environment-Forming Functions of Green Spaces of Urban Landscapes in Industrial Centers of Belarus Using Geoinformation Technologies. *American Institute of Physics Conference Series*, 2024. V. 3184. Art. 020044. DOI: 10.1063/5.0212165.

Wu W., Ding K. Optimization Strategy for Parks and Green Spaces in Shenyang City: Improving the Supply Quality and Accessibility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022. V. 19. Art. 4443. DOI: 10.3390/ijerph19084443.

Yu H., Liu X., Kong B., Li R., Wang G. Landscape Ecology Development Supported by Geospatial Technologies: A Review. *Ecological Informatics*, 2019. V. 51. P. 185–192. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2019.03.006.

REFERENCES

Forman R. T. T. Some General Principles of Landscape and Regional Ecology. *Landscape Ecology*, 1995. V. 10. P. 133–142. DOI: 10.1007/BF00133027.

- Forman R. T. T.* Urban Regions: Ecology and Planning Beyond the City. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. DOI: 10.1017/CBO9780511754982.
- Grafius D. R., Corstanje R., Harris J. A.* Linking Ecosystem Services, Urban Form and Green Space Configuration Using Multivariate Landscape Metric Analysis. *Landscape Ecology*, 2018. No. 33. P. 557–573. DOI: 10.1007/s10980-018-0618-z.
- Kravchuk L. A.* Structural-Functional Organization of Landscape-Recreational Complex in the Cities of Belarus. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2011. 170 p. (in Russian).
- Kupfer J. A.* Landscape Ecology and Biogeography: Rethinking Landscape Metrics in a Post-FRAGSTATS Landscape. *Progress in Physical Geography*, 2012. P. 400–420. DOI: 10.1177/0309133312439594.
- McGarigal K., Cushman S. A., Neel M. C., Ene E.* FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps, 2002. 182 p.
- Norton B. A., Evans K. L., Warren P. H.* Urban Biodiversity and Landscape Ecology: Patterns, Processes and Planning. *Current Landscape Ecology Reports*, 2016. No. 1. P. 178–192. DOI: 10.1007/s40823-016-0018-5.
- Petrov L. A., Kolbovsky E. Yu.* Modern Methods of Spatial Analysis of Green Infrastructure of Urbanized Territories (On the Example of the City of Grozny). *Grozny Natural Science Bulletin*, 2020. V. 5. No. 3(21). P. 39–51 (in Russian). DOI: 10.25744/genb.2020.20.3.004.
- Shchasnaya I., Rondak U.* Assessment of Public Green Spaces' Ecological Condition and Ecosystem Services in Zhodino City. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*, 2024. P. 24–34 (in Russian). DOI: 10.46646/2521-683X/2024-2-24-34.
- Shchasnaya I., Varabyou D.* Assessment of the Environment-Forming Functions of Green Spaces of Urban Landscapes in Industrial Centers of Belarus Using Geoinformation Technologies. *American Institute of Physics Conference Series*, 2024. V. 3184. Art. 020044. DOI: 10.1063/5.0212165.
- Wu W., Ding K.* Optimization Strategy for Parks and Green Spaces in Shenyang City: Improving the Supply Quality and Accessibility. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022. V. 19. Art. 4443. DOI: 10.3390/ijerph19084443.
- Yu H., Liu X., Kong B., Li R., Wang G.* Landscape Ecology Development Supported by Geospatial Technologies: A Review. *Ecological Informatics*, 2019. V. 51. P. 185–192. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2019.03.006.
-