



МНОГОУРОВНЕВАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КРИТЕРИЕВ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ГЕОДАННЫХ

А. В. Игнатьев, М. А. Куликов, Н. А. Каплунов

Игнатьев Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация. тел.: + 7 (905) 336-06-14; e-mail: ignav@vstu.ru;

Куликов Михаил Александрович, старший преподаватель кафедры цифровых технологий в урбанистике, архитектуре и строительстве, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация. тел.: + 7 (909) 380-27-18; e-mail: mkulikov1997@mail.ru;

Каплунов Николай Алексеевич, магистрант, Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация. тел.: + 7 (904) 779-17-47; e-mail: kaplunovkoly200503@mail.ru

Рассматривается задача формирования критериев экологической оценки городских территорий на основе открытых пространственных данных. Предложена многоуровневая модель последовательного преобразования исходных геоданных в тематические пространственные слои, количественные показатели и критерии экологической оценки. В качестве источников используются данные OpenStreetMap, наборы объектов городской инфраструктуры, данные дистанционного зондирования Земли и кадастровые данные. Средствами геоинформационного анализа формируются критерии транспортной и промышленной нагрузки, благоустройства и обеспеченности озелененными пространствами. Предложенный подход обеспечивает воспроизводимость формирования критериев и может применяться в системах многокритериальной оценки экологического состояния городских территорий и поддержки принятия решений.

Ключевые слова: экологическое состояние городских территорий, пространственные критерии, геоинформационные технологии, открытые геоданные, OpenStreetMap, пространственный анализ, экологическая оценка, многокритериальная классификация, городская среда, экологическая безопасность.

MULTILEVEL MODEL OF A SYSTEM OF SPATIAL CRITERIA FOR ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF URBAN TERRITORIES BASED ON OPEN GEODATA

A. V. Ignatyev, M. A. Kulikov, N. A. Kaplunov

Ignatyev Aleksandr Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of Digital Technologies in Urbanistic, Architecture and Construction Department, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, phone: + 7 (905) 336-06-14; e-mail: ignav@vstu.ru;

Kulikov Mikhail Aleksandrovich, Senior Lecturer of Digital Technologies in Urban Planning, Architecture and Construction Department, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, phone: + 7 (909) 380-27-18; e-mail: mkulikov1997@mail.ru;

Kaplunov Nikolay Alekseyevich, undergraduate student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation; e-mail: kaplunovkoly200503@mail.ru

The paper addresses the formation of criteria for environmental assessment of urban territories based on open spatial data. A multilevel model is proposed for the sequential transformation of source geodata into thematic spatial layers, quantitative indicators, and environmental assessment criteria. The data sources include OpenStreetMap, urban infrastructure datasets, Earth remote sensing data, and cadastral data. GIS-based spatial analysis is used to derive criteria for transportation and industrial loads, urban amenities, and green space provision. The proposed approach ensures reproducibility of criteria formation and can be applied in multicriteria assessment systems for the environmental condition of urban territories and decision support systems.

Keywords: environmental condition of urban territories, spatial criteria, geoinformation technologies, open geodata, OpenStreetMap, spatial analysis, environmental assessment, multicriteria classification, urban environment, environmental safety.

Введение

В настоящее время вопросы оценки экологического состояния городских территорий приобретают все большую актуальность в связи с ростом антропогенной нагрузки, усложнением пространственной структуры городов и необходимостью повышения обоснованности принимаемых градостроительных и природоохранных решений. Как отмечается многими исследователями [A. Sharifi [19], Y. Jiang, Z. Huang, X. Zhou, X. Chen [12], S. M. Parizi, M. Taleai, A. Sharifi [18],

а также рядом отечественных авторов [3–5, 8, 9]], для оценки экологического состояния городской среды широко применяются геоинформационные технологии, методы пространственного анализа и многокритериальные подходы. Использование указанных методов позволяет учитывать разнообразные факторы городской среды, включая транспортную нагрузку, промышленное воздействие, озеленение, обеспеченность объектами инфраструктуры и другие характеристики территории.

Развитие открытых геоданных, в частности данных OpenStreetMap, открытых наборов объектов городской инфраструктуры и результатов дистанционного зондирования Земли, существенно расширило возможности получения пространственной информации о состоянии городской среды. В последние годы открытые геоданные все чаще используются при решении задач городского планирования, мониторинга окружающей среды и оценки качества городской среды [15, 20, 22]. Вместе с тем большинство существующих методик экологической оценки территорий ориентированы на использование заранее сформированного набора критериев, тогда как процесс их получения обычно остается за рамками исследования и основывается на экспертных процедурах либо использовании готовых статистических показателей.

Анализ последних исследований и публикаций показывает, что значительное внимание уделяется вопросам формирования экологических индикаторов городской среды, пространственному анализу городских территорий и применению геоинформационных технологий для поддержки принятия решений [13, 14, 17, 18, 21, 23, 24]. В работах зарубежных исследователей рассматриваются подходы к использованию добровольных географических данных, пространственных индикаторов устойчивого развития и показателей качества городской среды [12, 15, 19, 20, 22]. В отечественных исследованиях активно развиваются методы комплексной оценки экологического состояния территорий и многокритериального анализа городской среды [1–9]. Однако вопросы автоматизированного формирования системы критериев экологической оценки непосредственно на основе открытых пространственных данных в настоящее время остаются недостаточно проработанными.

Критерии экологической оценки выступают связующим звеном между пространственными данными и процедурами принятия решений. От корректности их формирования зависит достоверность последующей экологической оценки, многокритериальной классификации территорий и выбора управленческих решений. Несмотря на это, вопросам формализованного формирования критериев на основе открытых пространственных данных уделяется значительно меньше внимания, чем вопросам последующей оценки и интерпретации результатов.

Таким образом, существует противоречие между растущими возможностями получения пространственной информации из открытых источников и отсутствием формализованных подходов к ее преобразованию в систему критериев экологической оценки городских территорий. Решение данной задачи позволит повысить воспроизводимость результатов исследований, снизить зависимость от экспертных процедур

и создать основу для автоматизации процессов экологической оценки городской среды.

В связи с этим целью настоящего исследования является разработка концептуальной модели формирования системы пространственных критериев экологической оценки городских территорий на основе открытых геоданных.

Метод

Для обеспечения формализованного формирования критериев экологической оценки разработана многоуровневая модель преобразования открытых геоданных в систему критериев оценки городской среды.

Модель включает четыре уровня:

- 1) источников данных, представленный открытыми геоданными OpenStreetMap, наборами объектов городской инфраструктуры и результатами дистанционного зондирования Земли;
- 2) пространственных слоев, включающий тематические наборы объектов, характеризующие транспортную инфраструктуру, промышленные объекты, элементы благоустройства и озелененные территории;
- 3) пространственных показателей, на котором осуществляется расчет количественных характеристик городской среды на основе пространственного анализа тематических слоев;
- 4) критериев экологической оценки, обеспечивающий формирование критериев транспортной нагрузки, промышленной нагрузки, благоустройства и обеспеченности озелененными пространствами.

Структура предлагаемой модели представлена на рисунке 1.

Для реализации предложенной модели формирования пространственных критериев экологической оценки использованы методы системного анализа, геоинформационного моделирования и пространственного анализа данных. Методологической основой исследования является представление критериев экологической оценки как результата последовательного преобразования пространственных данных в систему количественных показателей, характеризующих состояние городской среды.

В качестве основных источников данных рассматриваются открытые геоданные OpenStreetMap, наборы объектов городской инфраструктуры POI-RU-CITY, данные дистанционного зондирования Земли и кадастровые данные. Использование открытых источников позволяет обеспечить воспроизводимость результатов исследования и возможность их применения для различных городских территорий.

Обработка и анализ пространственных данных выполняются средствами геоинформационных технологий. На этапе подготовки данных осуществляется формирование тематических пространственных слоев, содержащих сведения о

транспортной инфраструктуре, промышленных объектах, элементах благоустройства и озелененных территориях. Далее для каждого тематического слоя рассчитываются пространственные

показатели, характеризующие плотность объектов, зоны влияния, доступность объектов инфраструктуры и обеспеченность территории соответствующими элементами городской среды.



Рис. 1. Многоуровневая модель формирования пространственных критериев экологической оценки городских территорий (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Multilevel model for the formation of spatial criteria for environmental assessment of urban territories (illustration by the authors)

В общем виде процесс формирования критерия экологической оценки может быть представлен следующим выражением:

$$K_i = F(L_1, L_2, \dots, L_n), \quad (1)$$

где L_i – тематические пространственные слои, F – оператор пространственной агрегации, K_i – критерий экологической оценки.

В общем случае оператор пространственной агрегации может включать процедуры расчета плотности объектов, построения буферных зон,

определения показателей доступности и обеспеченности территории.

В рамках исследования рассматриваются четыре группы критериев: транспортная нагрузка, промышленная нагрузка, благоустройство и обеспеченность озелененными пространствами. Формирование указанных критериев осуществляется на основе пространственного анализа соответствующих тематических слоев и расчета характеризующих их показателей.

Результаты

В соответствии с предложенной многоуровневой моделью была разработана система

пространственных критериев экологической оценки городских территорий, представленная на рисунке 2.



Рис. 2. Формирование системы пространственных критериев экологической оценки на основе открытых геоданных (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Formation of a system of spatial criteria for environmental assessment based on open geodata (illustration by the authors)

Для формирования критерия транспортной нагрузки используются данные о дорожной сети, перекрестках и остановочных пунктах. Критерий промышленной нагрузки формируется на основе пространственного анализа промышленных объектов. Критерий благоустройства определяется по данным о размещении объектов городской инфраструктуры. Критерий обеспеченности озеленением формируется на основе пространственного анализа парков, скверов и иных зеле-

ных зон. Основные источники данных и соответствующие им критерии экологической оценки представлены в таблице 1.

Представленная система критериев охватывает основные компоненты городской среды, оказывающие влияние на экологическое состояние территории. Использование открытых пространственных данных позволяет автоматизировать процесс формирования критериев и обеспечить воспроизводимость результатов экологической оценки.

Таблица 1

Формирование критериев экологической оценки на основе открытых пространственных данных

Table 1

Development of environmental assessment criteria based on open spatial data

№ п/п	Критерий	Источники данных	Пространственные показатели
	1	2	3
1	Транспортная нагрузка	Дороги, перекрестки, остановки	Плотность транспортной инфраструктуры, транспортная доступность
2	Промышленная нагрузка	Промышленные объекты, производственные зоны	Плотность промышленных объектов, зоны влияния
3	Благоустройство	POI городской инфраструктуры	Показатели доступности объектов благоустройства
4	Обеспеченность озеленением	Парки, скверы, зеленые зоны	Показатели обеспеченности озелененными территориями

Для демонстрации практической реализации предложенной модели выполнена подготовка пространственных данных средствами геоинформационной системы QGIS. На основе открытых

геоданных OpenStreetMap сформированы тематические слои, характеризующие транспортную инфраструктуру, промышленную деятельность, объекты городской инфраструктуры и озелененные территории (рис. 3).

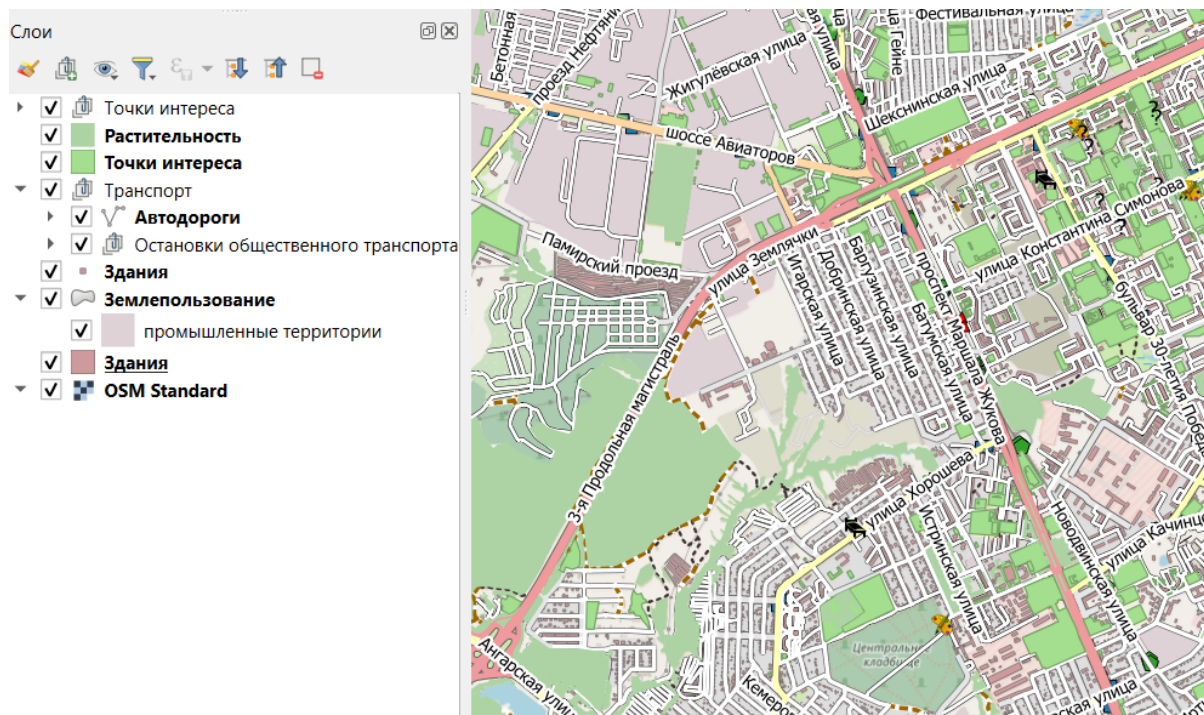


Рис. 3. Подготовка пространственных данных для формирования критериев экологической оценки городской территории в среде QGIS (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Preparation of spatial data for the formation of environmental assessment criteria for urban territories in QGIS (illustration by the authors)

Представленные на рисунке 3 тематические слои используются в качестве исходных данных для расчета пространственных показателей и последующего формирования критериев экологической оценки городской территории. Применение геоинформационных технологий обеспечивает автоматизацию обработки простран-

ных данных и возможность формирования критериев для различных территорий на основе единой методической схемы.

Соответствие основных пространственных показателей и операций геообработки, используемых при формировании критериев экологической оценки, представлено в таблице 2.

Таблица 2

Соответствие пространственных показателей и операций геообработки

Table 2

Correspondence between spatial metrics and geoprocessing operations

№ п/п	Пространственный показатель	Операция геообработки
	1	2
1	Плотность объектов	Density Analysis, Heatmap (Kernel Density)
2	Зоны влияния объектов	Buffer
3	Показатели доступности	Network Analysis, Service Area
4	Показатели обеспеченности	Spatial Join, Overlay Analysis
5	Расстояние до объектов	Distance Matrix, Near
6	Пространственное распределение объектов	Point Pattern Analysis

Представленные операции геообработки реализованы в современных геоинформационных системах и позволяют автоматизировать формирование пространственных показателей на основе открытых геоданных. Использование единого набора операций обеспечивает воспроизводимость результатов и возможность применения предложенной модели для различных городских территорий.

Обсуждение

Проведенный анализ показал, что большинство существующих исследований в области экологической оценки городских территорий ориентировано на использование заранее сформированной системы критериев. При этом основное внимание уделяется вопросам выбора критериев, определения их весовых коэффициентов и последующей интегральной или многокритериальной оценки состояния территории. Вопросы формиро-

вания самих критериев на основе пространственных данных обычно остаются за рамками исследования и решаются экспертным путем.

Предложенный подход отличается тем, что рассматривает критерии экологической оценки как результат последовательного преобразования открытых пространственных данных. В рамках разработанной модели формирование критериев осуществляется на основе тематических пространственных слоев, отражающих различные аспекты городской среды. Это позволяет перейти от экспертного задания критериев к их формализованному построению средствами геоинформационного анализа.

Важным преимуществом предложенного подхода является возможность использования открытых источников пространственных данных. Применение данных OpenStreetMap, наборов объектов городской инфраструктуры и результатов дистанционного зондирования Земли обеспечивает доступность исходной информации и создает предпосылки для автоматизации процедур экологической оценки городских территорий. Кроме того, использование единых источников данных способствует повышению воспроизводимости результатов исследований и снижению влияния субъективных факторов на процесс формирования критериев.

Следует отметить, что разработанная модель не заменяет существующие методы экологической оценки, а дополняет их новым этапом, связанным с формированием системы критериев. Полученные критерии могут использоваться как в интегральных методах оценки, так и в многокритериальных методах классификации городских территорий. В частности, предложенный подход может быть интегрирован в геоинформационные технологии многокритериальной оценки экологического состояния городской среды и системы поддержки принятия решений в области экологической безопасности.

В отличие от большинства существующих исследований, в которых критерии задаются экспертным образом, предлагаемый подход ориентирован на их автоматизированное формирование на основе открытых пространственных данных.

Таким образом, предложенная модель формирует основу для перехода от пространственных данных к системе критериев экологической оценки и может рассматриваться как один из элементов развития геоинформационных технологий анализа состояния городских территорий.

Выводы

1. Предложена концептуальная модель формирования пространственных критериев экологической оценки городских территорий на основе открытых геоданных.

2. Разработана схема преобразования пространственных слоев в систему критериев экологической оценки.

3. Обоснована возможность автоматизированного формирования критериев транспортной нагрузки, промышленной нагрузки, благоустройства и обеспеченности озелененными пространствами.

4. Показана возможность использования открытых геоданных в качестве источника информации для экологической оценки городских территорий.

5. Продемонстрирована возможность практической реализации предложенной модели средствами геоинформационной системы QGIS на основе открытых пространственных данных.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем многокритериальной классификации и систем поддержки принятия решений в области экологической безопасности.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой методов пространственной агрегации данных, автоматизацией формирования критериев и интеграцией предложенного подхода в геоинформационные технологии оценки экологического состояния городских территорий.

Список литературы

1. Балина Т. А. Комплексная оценка качества городской среды: подходы к изучению / Т. А. Балина, А. Н. Гальцева, А. А. Овсянкина // Современный город: власть, управление, экономика. – 2018. – Т. 1. – С. 216–222.
2. Букалова С. В. Индексный подход к оценке качества городской среды как инструмент повышения эффективности муниципального управления / С. В. Букалова, Т. Н. Модникова, А. Ю. Корнеев // Право и политика. – 2023. – № 12. – С. 86–95. – DOI 10.7256/2454-0706.2023.12.44098.
3. Дубровская С. А. Оценка потенциала развития комфортности урбанизированных геосистем Волгограда и Оренбурга / С. А. Дубровская, Р. В. Ряхов, В. М. Павлейчик // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. – 2022. – Т. 42. – С. 29–40. – DOI 10.26516/2073-3402.2022.42.29.
4. Зуев А. Ю. Структурно-морфологический подход к оценке качества городской среды / А. Ю. Зуев, Д. С. Парыгин, М. Ю. Тевелев и др. // Социология города. – 2024. – № 1. – С. 104–115. – DOI 10.35211/19943520_2024_1_104.
5. Игнатъев А. В. Методика оценки экологического благополучия и классификация территорий: подход к улучшению мониторинга загрязнения воздуха / А. В. Игнатъев, М. А. Куликов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – № 1 (98). – С. 247–255. – DOI 10.35211/18154360_2025_1_247.
6. Козюк М. Н. Благоустройство: история, культура, экология, право : монография / М. Н. Козюк, А. Ю. Чикильдина. – Волгоград : Волгоградский институт управления — филиал РАНХиГС, 2019. – 215 с.
7. Минстрой России. Индекс качества городской среды: методика расчета. – М., 2022. – 78 с.

8. Рашевский Н. М. Постановка задачи принятия решений для организации работы мобильных постов наблюдения за качеством атмосферного воздуха / Н. М. Рашевский, Н. П. Садовникова, Т. В. Ерещенко, М. А. Куликов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 2 (36). – С. 28–33. – DOI 10.52684/2312-3702-2021-36-2-28-33.
9. Цитман Т. О. Благоустройство дворовых территорий в районах жилой застройки / Т. О. Цитман, М. Д. Потапова, С. М. Петунина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2017. – № 2(20). – С. 103–114.
10. Guo Z. Deep learning assessment of street spatial quality in old residential communities of Wuchang, Wuhan, China / Z. Guo, Y. Li, H. Wang, L. Zhang // Scientific Reports. – 2025. – Vol. 15. – Art. 45176. – DOI 10.1038/s41598-025-28936-0.
11. Ignatyev A. V. Methodology for comprehensive assessment of atmospheric air state in populated areas / A. V. Ignatyev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 962, No. 4. – Art. 042048. – DOI 10.1088/1757-899X/962/4/042048.
12. Jiang Y. Evaluating the impact of urban morphology on urban vitality: an exploratory study using big geo-data / Y. Jiang, Z. Huang, X. Zhou, X. Chen // International Journal of Digital Earth. – 2024. – Vol. 17, № 1. – DOI 10.1080/17538947.2024.2327571.
13. Jorge-Ortiz A. Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring — a case study in Colombia / A. Jorge-Ortiz, M. Braulio-Gonzalo, M. D. Bovea // Environment, Development and Sustainability. – 2023. – Vol. 25, № 10. – P. 11789–11822. – DOI 10.1007/s10668-022-02554-6.
14. Khodakarami L. Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: integrating spatial modelling and multi-criteria decision-making approaches / L. Khodakarami, S. Pourmanafi, Z. Mokhtari, et al. // Sustainable Cities and Society. – 2023. – Vol. 97. – Art. 104725. – DOI 10.1016/j.scs.2023.104725.
15. Li W. Bidirectional enrichment of OpenStreetMap and CityGML 3.0 to facilitate cycling safety assessment / W. Li, J. Matijevic, C. Beil, L. Arzoumanidis, T. H. Kolbe, Y. Dehbi // International Journal of Geographical Information Science. – 2025. – DOI 10.1080/13658816.2025.2595662.
16. Lin C. Enhancing Urban Land Use Identification Using Urban Morphology / C. Lin, G. Li, Z. Zhou, et al. // Land. – 2024. – Vol. 13, № 6. – Art. 761. – DOI 10.3390/land13060761.
17. Moradi B. A scenario-based spatial multi-criteria decision-making system for urban environment quality assessment: case study of Tehran / B. Moradi, R. Akbari, S. R. Taghavi, et al. // Land. – 2023. – Vol. 12, № 9. – Art. 1659. – DOI 10.3390/land12091659.
18. Parizi S. M. A spatial evaluation framework of urban physical resilience considering different phases of disaster risk management / S. M. Parizi, M. Taleai, A. Sharifi // Natural Hazards. – 2024. – Vol. 120, № 14. – P. 13041–13076. – DOI 10.1007/s11069-024-06703-0.
19. Sharifi A. Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis / A. Sharifi // Ecological Indicators. – 2021. – Vol. 121. – Art. 107102. – DOI 10.1016/j.ecolind.2020.107102.
20. Turner R. Internationally validated open access indicators of large public urban green space availability and accessibility / R. Turner, Higgs C., Heikinheimo, et al. // Geographical Analysis. – 2025. – Vol. 57, № 4. – P. 793–808. – DOI 10.1111/gean.70023.
21. Wang Z. Impact of Urban Neighborhood Morphology on PM2.5 Concentration Distribution at Different Scale Buffers / Z. Wang, K. Hu, Z. Wang, B. Yang, Z. Chen // Land. – 2024. – Vol. 14, № 1. – P. 7. – DOI 10.3390/land14010007.
22. Yuan B. Urban Green Space Mapping from Sentinel-2 and OpenStreetMap via Weighted-Sample SVM Classification / B. Yuan, Z. Wan, L. Wu, et al. // Remote Sensing. – 2026. – Vol. 18, № 2. – Art. 272. – DOI 10.3390/rs18020272.
23. Zhang P. Integrating metro passenger flow data to improve the classification of urban functional regions using a heterogeneous graph neural network / P. Zhang, M. Yang, Y. Wang, et al. // International Journal of Digital Earth. – 2024. – Vol. 17, № 1. – DOI 10.1080/17538947.2024.2443467.
24. Zhang P. Spatial measures and methods in sustainable urban morphology: a systematic review / P. Zhang, D. Ghosh, S. Park // Landscape and Urban Planning. – 2023. – Vol. 237. – Art. 104776. – DOI 10.1016/j.landurbplan.2023.104776.
25. Zhou S. The impact of urban morphology on multiple ecological effects: Coupling relationships and collaborative optimization strategies / S. Zhou, T. Shi, S. Li, Y. Dong, J. Sun // Building Simulation. – 2023. – Vol. 16, № 8. – P. 1539–1557. – DOI 10.1007/s12273-023-1057-6.

References

1. Balina T. A., Galtseva A. N., Ovsyankina A. A. Kompleksnaya otsenka kachestva gorodskoy sredy: podkhody k izucheniyu [Comprehensive assessment of urban environment quality: approaches to the study]. *Sovremennyy gorod: vlast, upravlenie, ekonomika* [Modern City: Government, Management, Economics], 2018, vol. 1, pp. 216–222. (In Russ.).
2. Bukalova S. V., Modnikova T. N., Korneichev A. Yu. Indeksniy podkhod k otsenke kachestva gorodskoi sredi kak instrument povysheniya effektivnosti munitsipalnogo upravleniya [Index approach to assessing the quality of the urban environment as a tool for improving the efficiency of municipal management]. *Pravo i politika* [Law and Politics], 2023, no. 12, pp. 86–95. DOI 10.7256/2454-0706.2023.12.44098. (In Russ.).
3. Dubrovskaya S. A., Ryakhov R. V., Pavlechik V. M. Otsenka potentsiala razvitiya komfortnosti urbanizirovannikh geosistem Volgograda i Orenburga [Assessment of the potential for improving the comfort of urbanized geosystems of Volgograd and Orenburg]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle* [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences], 2022, vol. 42, pp. 29–40. DOI 10.26516/2073-3402.2022.42.29. (In Russ.).
4. Zuev A. Yu., Parigin D. S., Tevelev M. Yu., et al. Strukturno-morfologicheskii podkhod k otsenke kachestva gorodskoi sredi [Structural and morphological approach to assessing the quality of the urban environment]. *Sotsiologiya goroda* [Sociology of City], 2024, no. 1, pp. 104–115. DOI 10.35211/19943520_2024_1_104. (In Russ.).

5. Ignatyev A. V., Kulikov M. A. Metodika otsenki ekologicheskogo blagopoluchiya i klassifikatsiya territorii: podkhod k uluchsheniyu monitoringa zagryazneniya vozdukh [Methodology for assessing environmental well-being and classification of territories: an approach to improving air pollution monitoring]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, no. 1 (98), pp. 247–255. DOI 10.35211/18154360_2025_1_247. (In Russ.)
6. Kozyuk M. N., Chikildina A. Yu. *Blagoustroystvo: istoriya, kultura, ekologiya, pravo* [Landscaping: History, Culture, Ecology, Law]. Volgograd : Volgogradskii institut upravleniya – filial RANKhiGS; 2019, 215 p. (In Russ.)
7. Ministroi Rossii. Indeks kachestva gorodskoi sredi: metodika rascheta [Urban Environment Quality Index: Calculation Methodology]. Moscow; 2022, 78 p. (In Russ.)
8. Rashevskii N. M., Sadovnikova N. P., Ereshchenko T. V., Kulikov M. A. Postanovka zadachi prinyatiya reshenii dlya organizatsii raboti mobilnikh postov nablyudeniya za kachestvom atmosfernogo vozdukh [Statement of the decision-making problem for organizing the operation of mobile atmospheric air quality monitoring stations]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region], 2021, no. 2 (36), pp. 28–33. DOI 10.52684/2312-3702-2021-36-2-28-33. (In Russ.)
9. Tsitman T. O., Potashova M. D., Petunina S. M. Blagoustroystvo dvorovikh territorii v raionakh zhiloi zastroiki [Improvement of courtyard areas in residential development districts]. *Inzhenerno-stroitel'nyy vestnik Prikaspiya* [Engineering and Construction Bulletin of the Caspian Region]. 2017, no. 2 (20), pp. 103–114. (In Russ.)
10. Guo Z., Li Y., Wang H., Zhang L. Deep learning assessment of street spatial quality in old residential communities of Wuchang, Wuhan, China. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, art. 45176. DOI 10.1038/s41598-025-28936-0.
11. Ignatyev A. V. Methodology for comprehensive assessment of atmospheric air state in populated areas. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 962, no. 4, art. 042048. DOI 10.1088/1757-899X/962/4/042048.
12. Jiang Y., Huang Z., Zhou X., Chen X. Evaluating the impact of urban morphology on urban vitality: an exploratory study using big geo-data. *International Journal of Digital Earth*. 2024, vol. 17, no. 1. DOI 10.1080/17538947.2024.2327571.
13. Jorge-Ortiz A., Braulio-Gonzalo M., Bovea M. D. Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring – a case study in Colombia. *Environment, Development and Sustainability*, 2023, vol. 25, no. 10, pp. 11789–11822. DOI 10.1007/s10668-022-02554-6.
14. Khodakarami L., Pourmanafi S., Mokhtari Z., et al. Urban sustainability assessment at the neighborhood scale: integrating spatial modelling and multi-criteria decision-making approaches. *Sustainable Cities and Society*. 2023, vol. 97, art. 104725. DOI 10.1016/j.scs.2023.104725.
15. Li W., Matijevic J., Beil C., Arzoumanidis L., Kolbe T. H., Dehbi Y. Bidirectional enrichment of OpenStreetMap and CityGML 3.0 to facilitate cycling safety assessment. *International Journal of Geographical Information Science*, 2025. DOI 10.1080/13658816.2025.2595662.
16. Lin C., Li G., Zhou Z., et al. Enhancing Urban Land Use Identification Using Urban Morphology. *Land*, 2024, vol. 13, no. 6, art. 761. DOI 10.3390/land13060761.
17. Moradi B., Akbari R., Taghavi S. R., et al. A scenario-based spatial multi-criteria decision-making system for urban environment quality assessment: case study of Tehran. *Land*, 2023, vol. 12, no. 9, art. 1659. DOI 10.3390/land12091659.
18. Parizi S. M., Taleai M., Sharifi A. A spatial evaluation framework of urban physical resilience considering different phases of disaster risk management. *Natural Hazards*, 2024, vol. 120, no. 14, pp. 13041–13076. DOI 10.1007/s11069-024-06703-0.
19. Sharifi A. Urban sustainability assessment: An overview and bibliometric analysis. *Ecological Indicators*, 2021, vol. 121, art. 107102. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.107102.
20. Turner R., Higgs C., Heikinheimo V., et al. Internationally validated open access indicators of large public urban green space availability and accessibility. *Geographical Analysis*, 2025, vol. 57, no. 4, pp. 793–808. DOI 10.1111/gean.70023.
21. Wang Z., Hu K., Wang Z., Yang B., Chen Z. Impact of Urban Neighborhood Morphology on PM2.5 Concentration Distribution at Different Scale Buffers. *Land*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 7. DOI 10.3390/land14010007.
22. Yuan B., Wan Z., Wu L., et al. Urban Green Space Mapping from Sentinel-2 and OpenStreetMap via Weighted-Sample SVM Classification. *Remote Sensing*, 2026, vol. 18, no. 2, art. 272. DOI 10.3390/rs18020272.
23. Zhang P., Yang M., Wang Y., et al. Integrating metro passenger flow data to improve the classification of urban functional regions using a heterogeneous graph neural network. *International Journal of Digital Earth*, 2024, vol. 17, no. 1. DOI 10.1080/17538947.2024.2443467.
24. Zhang P., Ghosh D., Park S. Spatial measures and methods in sustainable urban morphology: a systematic review. *Landscape and Urban Planning*, 2023, vol. 237, art. 104776. DOI 10.1016/j.landurbplan.2023.104776.
25. Zhou S., Shi T., Li S., Dong Y., Sun J. The impact of urban morphology on multiple ecological effects: Coupling relationships and collaborative optimization strategies. *Building Simulation*, 2023, vol. 16, no. 8, pp. 1539–1557. DOI 10.1007/s12273-023-1057-6.

© А. В. Игнатьев, М. А. Куликов, Н. А. Каплунов

Ссылка для цитирования:

Игнатьев А. В., Куликов М. А., Каплунов Н. А. Многоуровневая модель системы пространственных критериев экологической оценки городских территорий на основе открытых геоданных // Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2027. № 3 (57). С. 34–41.