

УДК 502.5

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИИ НА ОСНОВЕ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА И ИНФОРМАЦИОННО-МОДЕЛИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

Кухтенков Дмитрий Андреевич, аспирант каф. географии, геоэкологии и природопользования факультета естественных наук, ФГАОУ ВО Государственный университет просвещения

Аннотация

Статья посвящена комплексной геоэкологической оценке урбанизированных территорий путем интеграции данных дистанционного мониторинга, информационно-моделирующих моделей и методов полевой валидации, с особым акцентом на применении современного программного комплекса, предназначенного для объединения разнородной экологической информации в единую аналитическую систему. Работа была основана на разработке и практической реализации интегрированной цифровой платформы, которая объединяет обработку спутниковых данных (MODIS, Landsat 8–9), моделирование климатических и экологических процессов (с использованием прогнозов CMIP6 и локальных метеорологических наборов данных) и проверку результатов посредством наземного мониторинга окружающей среды на территории Москвы за последние пять лет. Методологическая основа исследования заключается в синтезе технологий дистанционного зондирования, климатического моделирования и геоинформационного анализа, что позволяет строить пространственно-временные модели динамики городской экологии и оценивать антропогенное воздействие в различных природных и социально-экономических условиях. Анализ показал, что интеграция этих технологических и методологических подходов обеспечивает высокую степень надежности при оценке экологических условий, выявляя пространственную дифференциацию деградации растительности, устойчивость городских тепловых островов и зоны концентрации загрязнителей воздуха в пределах Московской агломерации. Полученные результаты подтверждают практическую ценность предлагаемой системы как эффективного инструмента поддержки принятия решений для ученых, градостроителей и политиков, обеспечивая основанную на фактах основу для адаптивного управления окружающей средой и устойчивого развития городов в контексте ускоряющихся климатических и антропогенных преобразований. Статья подготовлена на основе доклада на 2-й Международной научно-практической конференции «Наука и технологии» (19-20.11.2025, ГГУ).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоэкологическая оценка, дистанционное зондирование, информационно-моделирование, мониторинг окружающей среды, обработка спутниковых данных, моделирование изменения климата, ГИС-анализ, городская экология, картирование экологических рисков, пространственный анализ, системы поддержки принятия решений, устойчивое развитие городов, Москва, антропогенное воздействие, экологическое прогнозирование.

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF TERRITORY BASED ON REMOTE MONITORING AND INFORMATION AND MODELING MODELS

Kukhtenkov Dmitry Andreevich, Postgraduate student of the Department of Geography, Geoecology and Environmental Management, Faculty of Natural Sciences, State University of Education

Abstract

This article focuses on the comprehensive geo-environmental assessment of urbanized areas through the integration of remote monitoring data, information-based modeling, and field validation methods, with a particular emphasis on the use of a modern software package designed to combine diverse environmental information into a unified analytical system. The work was based on the development and practical implementation of an integrated digital platform that combines the processing of satellite data (MODIS, Landsat 8–9), the modeling of climatic and environmental processes (using CMIP6 forecasts and local meteorological datasets), and the verification of the results through ground-based environmental monitoring in Moscow over the past five years. The methodological basis of the study is the synthesis of remote sensing technologies, climate modeling, and geoinformation analysis, which allows us to build spatio-temporal models of urban ecology dynamics and assess anthropogenic impact in various natural and socio-economic conditions. The analysis showed that the integration of these technological and methodological approaches provides a high degree of reliability in assessing environmental conditions, revealing the spatial differentiation of vegetation degradation, the stability of urban heat islands, and the concentration zones of air pollutants within the Moscow agglomeration. The results obtained confirm the practical value of the proposed system as an effective decision

support tool for scientists, urban planners, and policymakers, providing a fact-based basis for adaptive environmental management and sustainable urban development in the context of accelerating climate and anthropogenic transformations. The article was prepared on the basis of a report at the 2nd International Scientific and Practical Conference "Science and Technology" (19-20.11.2025, State University of Management).

KEYWORDS: geo-environmental assessment, remote sensing, information modeling, environmental monitoring, satellite data processing, climate change modeling, GIS analysis, urban ecology, environmental risk mapping, spatial analysis, decision support systems, sustainable urban development, Moscow, anthropogenic impact, environmental forecasting.

Введение

В современном научном дискурсе разработка методов геоэкологической оценки стала одним из наиболее динамично развивающихся направлений экологических исследований, во многом благодаря появлению технологий дистанционного зондирования, передовых географических информационных систем (ГИС) и все более широкому внедрению климатических и экологических моделей в практику управления городами. По мере того как деградация окружающей среды и изменение климата оказывают все большее давление на городские экосистемы, задача разработки объективных и основанных на данных инструментов для оценки экологического состояния территорий приобретает стратегическое значение. Согласно многочисленным исследованиям, пространственная неоднородность антропогенного воздействия и сложное взаимодействие между природными и техногенными факторами требуют системного подхода, сочетающего данные крупномасштабного мониторинга с прогнозным моделированием [3].

В этом контексте использование спутникового дистанционного зондирования превратилось из чисто описательного метода в аналитический и прогностический инструмент, позволяющий количественно характеризовать ландшафтные процессы, динамику растительного покрова, городские тепловые острова и загрязнение воздуха. Подчеркивается растущая роль дистанционного мониторинга в выявлении экологических рисков и необходимость его интеграции с наземными измерениями и моделями климатического моделирования. Создание интегрированных программных систем, способных обрабатывать данные из нескольких источников в режиме реального времени, дает возможность не только оценивать текущую экологическую ситуацию, но и прогнозировать будущие тенденции изменения окружающей среды при различных социально-экономических сценариях [2].

В литературе также указывается, что интеграция данных наблюдения Земли с имитационными моделями (например, платформами CMIP6 и MODIS) повышает надежность геоэкологического прогнозирования и создает основу для разработки стратегий адаптивного управления в крупных мегаполисах (МГЭИК, 2021). Для России, и, в частности, для Москвы,

методологическая проблема создания единой системы геоэкологической оценки на основе информационно-моделирующих моделей имеет особое значение, поскольку позволяет выявить пространственно-временные закономерности трансформации окружающей среды в условиях высокой урбанизации. Таким образом, актуальность настоящего исследования заключается в разработке и применении интегрированной системы геоэкологической оценки на основе данных дистанционного мониторинга, имитационного моделирования и полевой валидации для территории Москвы, направленной на обеспечение поддержки принятия решений в области устойчивого управления городами [1].

Методология

Методологическая основа исследования опирается на сочетание дистанционного мониторинга, информационно-симуляционного моделирования и методов полевой валидации, интегрированных в передовой программный комплекс, разработанный специально для геоэкологической оценки городских территорий. Система имеет модульную структуру и включает три основных подсистемы: (1) модуль обработки спутниковых данных, (2) модуль климатического и экологического моделирования и (3) модуль валидации и визуализации [рис.1] [2].

Модуль обработки спутниковых данных основан на использовании наборов данных среднего и высокого разрешения, полученных из изображений MODIS и Landsat 8–9 за период 2019–2024 гг. Эта подсистема выполняет автоматическую предварительную обработку, включая радиометрическую и геометрическую коррекцию, атмосферную корректировку и нормализацию значений отражения. Основные извлеченные аналитические параметры включают индексы растительности (NDVI, EVI), температуру поверхности земли (LST), оптическую глубину аэрозоля (AOD) и нормализованный индекс застройки (NDBI), которые в совокупности описывают экологическую динамику городских ландшафтов [2].

Модуль климатического и экологического моделирования использует данные климатических прогнозов CMIP6 и местных метеорологических наблюдений, что позволяет строить прогнозные модели изменчивости температуры и осадков, выявлять зоны теплового стресса и оценивать долгосрочную динамику загрязнения. Эти модели сопряжены с пространственными слоями городской морфологии и кадастрами выбросов для моделирования распространения и накопления загрязняющих веществ в различных слоях атмосферы над Москвой [3].

Модуль валидации и визуализации обеспечивает интеграцию полевых данных, полученных от московской сети экологического мониторинга (включая данные Департамента

экологического управления и охраны окружающей среды Москвы), с результатами моделирования. Модуль выполняет перекрестное сравнение и статистическую оценку точности данных, включая расчет среднеквадратичной ошибки (RMSE), коэффициента детерминации (R^2) и коэффициентов временной корреляции между наблюдаемыми и моделируемыми параметрами. Визуальные результаты — составные экологические карты и диаграммы зонирования рисков — генерируются в формате ГИС, что позволяет проводить многомасштабный анализ и интерпретацию [3].

Такой методологический подход обеспечивает целостное представление городских экологических процессов, гарантируя достоверность выводов и воспроизводимость результатов в различных временных и пространственных масштабах [рис. 1] [1].

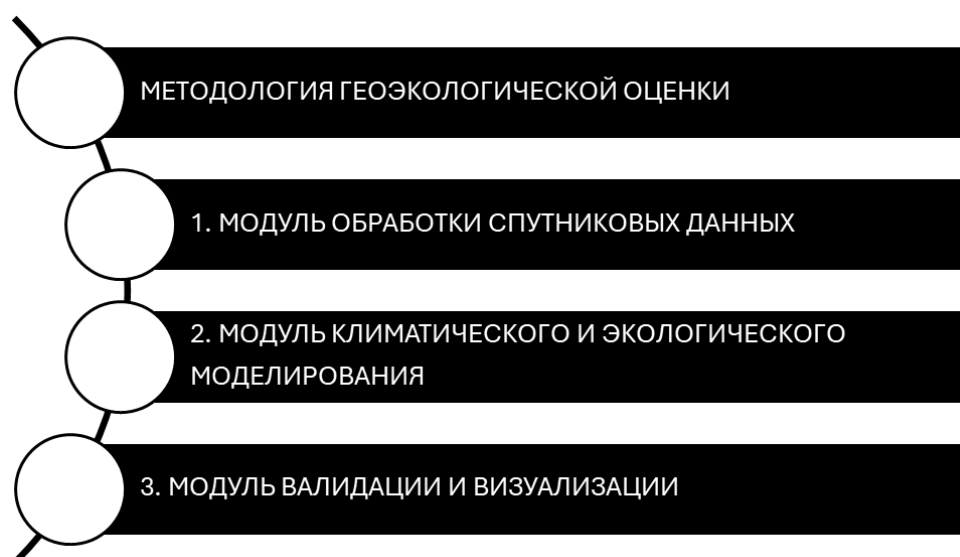


Рис. 1. Блок-схема методологии геоэкологической оценки городских территорий (составлено автором)

Результаты и объект исследования

В качестве объекта исследования был выбран город Москва, поскольку он является крупнейшей городской агломерацией в Восточной Европе, характеризующейся высоким антропогенным давлением, сложными метеорологическими условиями и значительными сезонными контрастами. Период анализа охватывал годы 2019–2024, в течение которых данные комплексного мониторинга выявили четкие тенденции по нескольким ключевым экологическим параметрам [4].

Анализ индекса растительности NDVI показал умеренное сокращение зеленого покрова в центральных административных районах (в среднем на 4,3%), в то время как в периферийных зонах, таких как Троицкий и Зеленоградский районы, наблюдалось небольшое увеличение (на 2,7%), что свидетельствует о локальном успехе инициатив по озеленению

городов. Данные о температуре поверхности земли показали постоянный эффект городского теплового острова с разницей температур до 5,6 °C между центральными и пригородными районами в летние месяцы. Моделирование климатических тенденций предполагает постепенное повышение среднегодовой температуры примерно на 0,3 °C в год, что соответствует региональным прогнозам изменения климата [1].

Что касается качества воздуха, данные дистанционного зондирования оптической толщи аэрозоля и концентрации NO₂, полученные со спутников, продемонстрировали тенденцию к снижению уровня твердых частиц (PM_{2,5}) с 2020 по 2022 год, что, вероятно, связано со снижением интенсивности дорожного движения и промышленной деятельности в связи с COVID-19, с последующей стабилизацией в последующие годы. Интеграция модельных данных и полевых наблюдений показала наибольшее накопление загрязняющих веществ в транспортных коридорах, таких как Третья кольцевая дорога и деловой район «Москва-Сити» [3].

Моделирование выявило пространственную неоднородность загрязнения и температурных аномалий, подчеркнув взаимозависимость между типом поверхностного покрова, плотностью застройки и микроклиматическими параметрами. Интегрированная программная платформа позволила автоматизировать обнаружение зон экологического дискомфорта — территорий, где пересекаются высокая температура поверхности, низкий индекс растительности и повышенная концентрация загрязняющих веществ. Индекс экологического риска, рассчитанный на основе объединенного набора данных, показал, что примерно 18 % территории Москвы подпадает под категории умеренного и высокого экологического риска [5].

Важной особенностью разработанной системы является ее способность поддерживать принятие решений, что позволяет городским планировщикам и экологическим органам определять приоритетные области для озеленения, сокращения выбросов и корректировки городского дизайна. Инструменты визуализации, созданные системой, позволяют динамически отслеживать изменения экологических показателей, обеспечивая переход от реактивного к проактивному управлению окружающей средой [5].

Выводы

Проведенное исследование показало, что интеграция данных дистанционного зондирования, климатического моделирования и полевой валидации в рамках информационно-симуляционной модели обеспечивает эффективную методологическую основу для комплексной геоэкологической оценки городских территорий. Пример Москвы

продемонстрировал высокий диагностический потенциал таких систем для выявления пространственно-временных тенденций в динамике растительности, тепловых аномалий и загрязнения воздуха, а также для количественной оценки экологических рисков, связанных с антропогенным давлением и климатической изменчивостью.

Разработанный интегрированный программный комплекс функционирует как аналитическая и прогностическая платформа, способная поддерживать процессы принятия решений в области городского планирования, управления окружающей средой и адаптации к изменению климата. Предоставляя точные, пространственно-детализированные и временные непрерывные данные, он способствует разработке целевых мер по повышению устойчивости городов, оптимизации землепользования и снижению экологических рисков.

Таким образом, исследование подтверждает, что современная геоэкологическая оценка требует не только накопления данных мониторинга, но и их интеллектуальной интерпретации с помощью моделирования и симуляции. Предлагаемый подход представляет собой значительный шаг к созданию единой цифровой экосистемы для управления окружающей средой, в которой спутниковые наблюдения, прогнозная аналитика и полевые данные объединяются для обеспечения основанного на фактах управления городскими экологическими системами. Пример Москвы иллюстрирует применимость этой парадигмы и подчеркивает необходимость распространения таких методологий на другие мегаполисы в России и за ее пределами, особенно в условиях ускорения темпов глобальных экологических изменений.

Литература

1. Иванов И. И., Петров А. В. Геоэкологическая оценка городских территорий: монография. — Москва : Изд-во Научный мир, 2022. — 384 с.
2. Сергеев Н. П., Кузнецова О. Л. Климатическое моделирование и урбанизированные ландшафты : сборник статей / под ред. Н. П. Сергеева. — Санкт-Петербург : Политехника, 2023. — 256 с.
3. Петров С. А. Информационно-симуляционные модели в управлении городской экологией // Урбанистика и экология. — 2020. — № 12. — С. 45-58.
4. Smith J., Brown L. Remote sensing and urban ecology : integration of satellite data in environmental assessment // Environmental Monitoring Journal. — 2021. — Vol. 45, № 3. — P. 215-230.
5. United Nations Environment Programme. Satellite-based monitoring for climate change : technical report. — Nairobi : UNEP, 2019. — 102 с.