

Научная статья

УДК 502.172:504.06

DOI: 10.18384/2712-7621-2025-2-41-61

БИОРАЗНООБРАЗИЕ ГОРОДОВ: МЕТОДЫ ОЦЕНКИ И СТРАТЕГИИ СОХРАНЕНИЯ

© СС ВУ Булдакова Е. В.

*Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева Российской академии наук
101000, г. Москва, Уланский переулок, д. 13, стр. 2, Российская Федерация
e-mail: e_buldakova@mail.ru; ORCID:0000-0002-1209-8733*

Поступила в редакцию 03.03.2025

После доработки 16.06.2025

Принята к публикации 21.06.2025

Аннотация

Цель. Провести сравнительный анализ эффективности мер по сохранению биоразнообразия на урбанизированных территориях на примере Сингапура, Кейптауна, Берлина и Москвы с использованием авторского индекса биоразнообразия (ИБ).

Процедура и методы. Исследование основано на расчёте авторского индекса биоразнообразия (ИБ), разработанного на принципах Сингапурского индекса (СВИ) и учитывающего доступность данных для ключевых аспектов: видовое богатство (птицы, растения), доля аборигенных видов флоры и эндемиков, площадь зелёных зон и уровень загрязнения воздуха (PM_{2.5}). Данные получены из открытых источников (eBird, GBIF, iNaturalist, OSM, OpenAQ, ВОЗ), официальной статистики городов и опубликованных данных.

Результаты. Расчёт ИБ выявил значительные различия полученных показателей: Кейптаун – 83 балла, максимальный балл обусловлен высокой долей эндемиков (68%) и видовым богатством, несмотря на ограниченную площадь зелёных зон (22%). Сингапур – 51 балл, когда технологичные решения компенсируют низкую долю аборигенных видов (47%) и эндемиков (15%). Москва – 46 баллов, где большая площадь зелёных зон (54%) сочетается с низким видовым разнообразием растений (1 647 видов) и эндемизмом (5%). Берлин – 44 балла, отличается самой развитой сетью экокоридоров (44% территории), однако характеризуется ограниченным биоразнообразием (1 527 видов растений, 2% эндемиков). Корреляционный анализ показал сильную положительную связь ИБ с долей эндемичных видов ($r = +0,997$, $p < 0,001$) и видовым богатством флоры ($r = +0,980$, $p < 0,01$), и значимую отрицательную связь с площадью зелёных зон ($r = -0,938$, $p < 0,01$), что свидетельствует о приоритетном значении качества зелёных зон (естественность, эндемизм) над их площадью для биоразнообразия. Хотя площадь самих зелёных территорий в городах сохраняет важное значение для обеспечения среды обитания и выполнения разнообразных экосистемных услуг.

Теоретическая и/или практическая значимость. Разработанный индекс биоразнообразия (ИБ) может служить инструментом для сравнительного анализа городов в различных природно-климатических условиях. Применение методологии относительной оценки при расчёте индекса (нормализация показателей к максимуму выборки, весовые коэффициенты) позволяет нивелировать различия в исходном биологическом потенциале территорий. ИБ создаёт основу для оценки эффективности политики городов в области сохранения биоразнообразия и разработки адресных рекомендаций с учётом региональной специфики, что подтверждается выявленными особенностями для модельных городов: низкая доля аборигенных видов в Сингапуре, фрагментация местообитаний в Кейптауне, преобладание декоративных видов в озеленении Москвы. Установленные закономерности (приоритет сохранения естественных сообществ с доминированием аборигенных видов над расширением искусственных насаждений) обеспечивают научную основу для стратегий сохранения биоразнообразия. Выявленные связи с Целями устойчивого развития (ЦУР 11 – через оценку качества городской среды; ЦУР 13 – через мониторинг влияния за-

грязнений; ЦУР 15 – через сохранение биоразнообразия) позволяют использовать ИБ для совершенствования национальных систем оценки, включая интеграцию качественных показателей в российский индекс качества городской среды.

Ключевые слова: индекс биоразнообразия, гражданская наука, зелёная инфраструктура, устойчивое развитие, экосистемные услуги, аборигенные и эндемичные виды

Для цитирования:

Булдакова Е. В. Биоразнообразие городов: методы оценки и стратегии сохранения // Географическая среда и живые системы. 2025. № 2. С. 41–61. DOI: 10.18384/2712-7621-2025-2-41-61

Original Article

URBAN BIODIVERSITY: ASSESSMENT METHODS AND CONSERVATION STRATEGIES

© CC BY E. Buldakova

*Sergeev Institute of Geoecology of the Russian Academy of Sciences
Ulansky pereulok 13-2, Moscow 101000, Russian Federation
e-mail: e_buldakova@mail.ru; ORCID:0000-0002-1209-8733*

Received 03.03.2025

Revised 16.06.2025

Accepted 21.06.2025

Abstract

Aim. A comparative analysis of the effectiveness of biodiversity conservation measures in urban areas using the example of Singapore, Cape Town, Berlin, and Moscow was conducted using the author's biodiversity index (IB) as a tool.

Methodology. The study is based on the calculation of the author's Biodiversity Index (IB), developed on the principles of the Singapore Index (CBI) and considering the availability of data for key aspects: species richness (birds, plants), the proportion of native flora and endemic species, the area of green areas and the level of air pollution (PM2.5). The data is obtained from open sources (eBird, GBIF, iNaturalist, OSM, OpenAQ, WHO), official urban statistics and published sources.

Results. The IB calculation revealed significant differences in the obtained indicators: Cape Town (83 points) – the maximum score is due to the high proportion of endemics (68%) and species richness, despite the limited area of green areas (22%). Singapore (51 points), when technological solutions compensate for the low proportion of native species (47%) and endemic (15%). Moscow (46 points), where a large area of green areas (54%) is combined with a low species diversity of plants (1,647 species) and endemism (5%). Berlin (44 points) has the most developed network of eco-corridors (44% of the territory), but it has limited biodiversity (1527 plant species, 2% endemic). Correlation analysis showed a strong positive relationship between IB and the proportion of endemic species ($r = +0.997$, $p < 0,001$) and the species richness of the flora ($r = +0.980$, $p < 0,01$), and a significant negative relationship with the area of green areas ($r = -0.938$, $p < 0.01$), indicating the priority of quality (naturalness, conservation of endemic species) over quantity (a formal approach to urban greening) in solving biodiversity conservation tasks.

Research implications. The developed Biodiversity Index (IB) can be used as a tool for comparing cities in different natural and climatic conditions. By applying a relative estimation methodology to calculate the index, such as normalizing indicators to the maximum value in the sample and using weighting coefficients, differences in the initial biological potential of territories can be offset. This makes it possible to assess the effectiveness of urban policies in biodiversity conservation and develop targeted recommendations based on regional specificities. The information gathered through this process can help identify features of model cities, such as the low proportion of native species in Singapore, the fragmentation of

habitats in Cape Town, and the prevalence of decorative species in Moscow's landscaping. Established patterns (the priority of preserving natural communities dominated by native species over the expansion of artificial plantings) provide a scientific basis for biodiversity conservation strategies. These patterns are linked to the Sustainable Development Goals (SDG 11 – which focuses on urban environment quality, SDG 13 – which addresses pollution impact monitoring, and SDG 15 – which aims to conserve biodiversity). These links allow us to use information to improve national assessment systems, such as integrating quality indicators into the Russian Urban Environment Quality Index.

Keywords: biodiversity index, citizen science, green infrastructure, sustainable development, ecosystem services, native and endemic species

For citation:

Buldakova E. V. (2025). Urban biodiversity: assessment methods and conservation strategies. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2, 41–61. DOI: 10.18384/2712-7621-2025-2-41-61

ВВЕДЕНИЕ

Современные города, занимая около 3% суши, концентрируют более половины населения планеты и оказывают двойственное воздействие на глобальное биоразнообразие: с одной стороны, являются источником угроз (фрагментация ландшафтов, загрязнение, инвазивные виды), а с другой – обладают потенциалом для его сохранения и восстановления через стратегическое планирование зелёной инфраструктуры (ЗИ) и устойчивое управление экосистемными услугами [4; 7; 11; 16; 18; 25; 26]. Озеленённые территории способствуют адаптации городов к изменению климата и улучшению качества жизни горожан [9; 14; 21; 23]. Поэтому приоритетом для городских властей должно стать не просто увеличение их площади, но и повышение качества через сохранение естественных биотопов, видового разнообразия и экологической связности.

Сегодня международные инициативы, такие как Куньминско-Монреальская глобальная рамочная программа (2022), а также различные программы ООН, в т. ч. Цель 11 устойчивого развития (ЦУР 11), прямо подчёркивают роль городов в достижении глобальных целей по восстановлению природных экосистем и сохранению биоразнообразия [12; 25; 26; 28].

Таким образом, изучение биоразнообразия в городах обусловлено необходимостью поиска баланса между развитием городской инфраструктуры и сохранением природного наследия в условиях стреми-

тельно нарастающих темпов урбанизации, а также потребностью в эффективных инструментах для ответа на актуальные вызовы – утраты биоразнообразия и деградации экосистем через трансформацию городов в центры экологических инноваций [4; 10; 17; 18; 20; 27; 29].

В ответ на эти вызовы возрастает актуальность научных исследований в области поиска эффективных решений по сохранению биоразнообразия в городах. Однако при решении этих задач возникает целый ряд барьеров, связанных с недостатком открытых данных мониторинга в региональном контексте, необходимостью балансировать между экологическими потребностями (сложная структура природных сообществ, участие аборигенных видов) с социальными запросами (эстетическая привлекательность, безопасность и комфорт озеленённых городских пространств) [4; 30].

В качестве одного из эффективных инструментов мониторинга и управления биоразнообразием сегодня часто используют индексы [5; 8; 28], которые позволяют проводить сравнения городов и регионов на различных пространственных уровнях организации биосферы, видеть пробелы в принимаемых решениях и разрабатывать рекомендации для городских администраций.

Однако, несмотря на имеющийся прогресс в области оценки биоразнообразия отдельных городов, имеется целый ряд ограничений повсеместного использования существующих методик и подходов

для сравнительного анализа городов, использующих различные модели управления городским биоразнообразием. Кроме того, не все индексы адекватно учитывают ключевые факторы, свойственные урбанизированным территориям (например, давление городской среды на экосистемы) и специфические управленческие инструменты (программы восстановления, механизмы вовлечения горожан), требуют для своего расчёта сложных данных, недоступных для многих городов в сопоставимом формате.

В широко используемых комплексных экологических индексах¹, в т. ч. и в российской практике, показатели биоразнообразия представлены лишь косвенно через площадь зелёных насаждений без учёта их качественных характеристик (видового состава, эндемизма, функциональной связности) или их прямого влияния на качество городской среды (снижение загрязнения воздуха). Кроме того, отмечается региональный дисбаланс подобных исследований, и как следствие, недостаток сопоставимых данных и стандартизированных методов оценки и мониторинга, особенно для городов глобального Юга и постсоветского пространства [4; 8].

Цель данного исследования – предложить и апробировать сравнительный подход к оценке эффективности мер по управлению городским биоразнообразием на примере 4 контрастных мегаполисов – Сингапур, Кейптаун, Берлин, Москва, расположенных в различных природно-географических и социально-экономических условиях и использующих различные практики в управлении городским биоразнообразием. Для целей данного исследования был разработан и рассчитан интегральный индекс биоразнообразия (ИБ) на основе принципов Сингапурского индекса биоразнообразия городов (СВИ) [5]. Методика расчёта ИБ была адаптирована к доступности данных для модельных го-

родов и включала следующие ключевые аспекты биоразнообразия урбанизированных ландшафтов: видовое богатство, долю аборигенных видов флоры и эндемиков, площадь зелёных зон и антропогенное давление, выраженное через показатель загрязнения воздуха частицами (PM2.5).

Сопоставление показателей биоразнообразия и эффективности политик для городов с резко различающимися исходными условиями (природными и управленческими) позволяет выявить наиболее успешные решения по его сохранению, их вклад в глобальные цели устойчивого развития (ЦУР), а также предложить универсальный алгоритм для интеграции показателей биоразнообразия в систему управления городской зелёной инфраструктурой.

ОЦЕНКА БИОРАЗНООБРАЗИЯ В ГОРОДАХ

В настоящее время оценка городского биоразнообразия (БР) опирается на 2 взаимодополняющих подхода:

1. *инвентаризационно-картографический*, который позволяет проводить систематический учёт видового и экосистемного разнообразия, пространственный анализ структуры местообитаний, мониторинг инвазий, выявление редких таксонов [1; 2; 3; 8; 15; 21; 22; 24];

2. *индексный* – на основе разработки комплексных метрик, агрегирующих разнородные данные для количественной оценки состояния БР, антропогенных угроз и эффективности природоохранных программ [2; 4; 5; 13; 26; 28].

Рост научного и практического интереса к биоразнообразию урбанизированных территорий стимулировал эволюцию этих подходов: от фундаментальных исследований (таксономические кадастры, картографирование биомов) [1; 3] до создания интегральных инструментов, сочетающих экологические, социальные и управленческие показатели для поддержки решений в городском планировании зелёной инфраструктуры [2; 5; 6; 7; 8; 12; 26; 27; 30].

Комплексные индексы представляют особый интерес особенно для проведения

¹ Индекс качества городской среды: [сайт]. URL: <https://индекс-городов.рф/> (дата обращения: 01.04.2025); The Green City Index [Электронный ресурс]. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:cf26889b-3254-4dcb-bc50-fef7e99cb3c7/gci-report-summary.pdf> (дата обращения: 01.04.2025).

сравнительного анализа и поддержки принятия управленческих решений в области сохранения биоразнообразия в городах, т. к. позволяют разнородные экологические данные привести к относительно простым для интерпретации показателям. Однако существующие специализированные глобальные или региональные индексы часто сталкиваются со значительными ограничениями при их использовании в городском контексте.

Для оценки применимости существующих индексов по оценке биоразнообразия в городах был проведён их сравнительный анализ (табл. 1).

Из таблицы видно, что одни индексы нацелены только на учёт конкретных таксонов (краснокнижные виды или позвоночные виды) или только на угрозы (браконьерство, разрушение среды обитания, изменение климата), третьи — на экосистемные услуги, а четвёртые пытаются охватить все аспекты, но становятся чрезмерно ресурсоёмкими для оценки и требуют большого количества данных, которые часто недоступны для отдельных городов (например, данные по биоразнообразию различных таксонов). Ни один из глобальных индексов (*LPI*, *RLI*) не адаптирован для специфики урбанизированных территорий. Европейские и российские комплексные индексы (*European Green City Index*, *индекс качества городской среды*) сводят оценку БР до единственного показателя — доли зелёных насаждений в городе, игнорируя качественные параметры (видовое богатство, долю эндемиков, связность зелёной элементов ЗИ) и антропогенные угрозы (загрязнение воздуха (PM_{2.5}), фрагментация сред обитания, инвазивные виды). Сингапурский индекс (*СВИ*), напротив, предлагает специализированную методологию для управления БР непосредственно в городах, но его применение ограничено из-за сложности расчёта, а часто отсутствия необходимых данных в открытом доступе для большинства городов, особенно расположенных в развивающихся странах или не имеющих развитых систем экологического мониторинга. Всё это создает определённые барьеры для адекватного сравнения городов между собой.

Указанные ограничения существующих подходов, особенно проблема сопоставимости данных и недостаточный учёт специфических урбанистических факторов (например, загрязнение воздуха, увеличение доли инвазивных видов) при оценке биоразнообразия обусловили необходимость разработки интегрального индекса биоразнообразия (ИБ) для целей кросс-сравнения городов между собой.

Для обеспечения природно-географической и управленческой репрезентативности были отобраны 4 мегаполиса, расположенные в пределах 4 ключевых биомов (влажные тропические леса, финбош, широколиственные и смешанные леса) и представляющие различные модели городской политики по сохранению биоразнообразия (табл. 2).

Сингапур, являясь городом-государством с рекордной плотностью населения (8 195 чел/км²), демонстрирует возможности технологической компенсации существующей антропогенной нагрузки на городские экосистемы через реализацию различных программ по озеленению городского пространства. Только за последние 20 лет благодаря программе «*City in a Garden*»² площадь озеленения в Сингапуре увеличилась с 36% до 47% за счёт создания новых парков, вертикальных садов и «зелёных крыш»³. Однако городская повестка в области озеленения фокусируется не просто на повышении площади зелёных территорий, но и на увеличении биоразнообразия. Для этого предпринимаются различные меры и разрабатывается целый ряд проектов. Создаются искусственные водно-болотные угодья⁴, восстанавливаются мангровые заросли⁵ и внедряются «умные» технологии⁶ — датчики для мониторинга

² URL: <https://clck.ru/3PcxVp> (дата обращения: 27.02.2025).

³ Singapore Green Plan 2030: [сайт]. URL: <https://clck.ru/3PcxYu> (дата обращения: 27.02.2025).

⁴ Sungei Buloh Wetland Reserve: National Parks Board. Wetland Conservation: [сайт]. URL: <https://www.nparks.gov.sg/sbwr> (дата обращения: 27.02.2025).

⁵ Pulau Ubin Mangrove Restoration: NParks. *Mangrove Restoration Initiatives* [сайт]. URL: <https://clck.ru/3PcxR> (дата обращения: 10.07.2024).

⁶ Программа Smart Nation Singapore: Smart Nation and Digital Government Office. *Environmental Sensors* [сайт]. URL: <https://www.smartnation.gov.sg> (дата обращения: 10.07.2024).

Таблица 1 / Table 1

Сравнительный анализ индексов для оценки показателей биоразнообразия и городской среды / Comparative analysis of indices for assessing biodiversity and urban environment quality

Индекс / Уровень охвата	Ключевые преимущества и ограничения	Учёт БР / Критерии оценки и применимость для городов	Примеры применения	Источники данных
Индекс Живой Планеты (LPI) Глобальный	(+) Глобальная сопоставимость (-) Только позвоночные; отсутствие городских данных; не учитывает растения, беспозвоночных	Косвенный (через динамику популяций млекопитающих, птиц, рыб) Применимость: низкая (не адаптирован для урбанизированных территорий)	Глобальные отчеты WWF	Доклад «Живая Планета 2006» Всемирного фонда дикой природы (WWF)
Индекс Красного списка МСОП (RLI) Глобальный	(+) Мониторинг угрожаемых видов (-) Игнорирует виды, не включённые в список МСОП; неприменим для локальных оценок	Частичный (статус видов по категориям МСОП) Применимость: низкая (только для выявления «горячих точек» БР)	Оценка рисков для редких видов в регионах	Индекс Красной книги
Руководство ТЕЕВ для городов Глобальный	(+) Экономическая оценка экосистемных услуг (-) Не измеряет биоразнообразие напрямую	Опосредованный (через стоимость регулирующих, культурных услуг) Применимость: средняя (для обоснования элементов ЗИ)	Оценка экосистемных услуг в Кейптауне	TEEB Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management (2011)
Сингапурский индекс биоразнообразия городов (SBI) Локальный	(+) Специализирован для городов; комплексный подход (-) Требуется 28 индикаторов; ресурсоёмкость	Прямой (местное биоразнообразие, экосистемные услуги и управление биоразнообразием) Применимость: высокая (после адаптации к сбору данных по видовому разнообразию)	Помогает создавать «экологическую инфраструктуру», а не декоративные зелёные зоны в городах.	Handbook on the Singapore Index on cities' biodiversity
Европейский индекс зелёного города (EGCI) Региональный	(+) Охват экологических аспектов (CO ₂ , транспорт, отходы, вода) (-) БР учтён только через площадь зелёных зон	Поверхностный (доля зелёных насаждений) Применимость: низкая (игнорирует качественные параметры БР)	Оценка экологической устойчивости городов, обмен лучшими практиками. Сингапур, Кейптаун (1-е места в 2012 г. в региональных индексах)	The Green City Index
Индекс качества городской среды (ИКС) Локальный	(+) Национальная стандартизация для городов России (-) Показатели БР отсутствуют; акцент на благоустройстве	Отсутствует Применимость: неприменим (не оценивает биоразнообразие)	Рейтинг 116 городов РФ (ежегодно с 2018 г.)	Индекс качества городской среды – инструмент для оценки качества материнской городской среды и условий её формирования

Источники: Доклад «Живая Планета 2006» Всемирного фонда дикой природы (WWF) [Электронный ресурс]. URL: <https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/lprussian.pdf> (дата обращения: 01.04.2025); Индекс Красной книги [Электронный ресурс]. URL: <https://w3.unepce.org/SDG/ru/Indicator?id=69> (дата обращения: 01.04.2025); TEEB Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management (2011) [Электронный ресурс]. URL: <https://teebweb.org/publications/other/teeb-cities/> (дата обращения: 01.04.2025); Handbook on the Singapore Index on cities' biodiversity [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-98-en.pdf> (дата обращения: 01.04.2025); The Green City Index [Электронный ресурс]. URL: <https://clk.li/Muir> (дата обращения: 01.04.2025); Индекс качества городской среды – инструмент для оценки качества материнской городской среды и условий её формирования [Электронный ресурс]. URL: <https://индекс-городов.рф/> (дата обращения: 01.04.2025)

Таблица 2 / Table 2

Основные критерии отбора модельных городов¹ / Criteria for the selection of case cities

Критерий / Город	Сингапур	Кейптаун	Берлин	Москва
Тип климата	Экваториальный	Субтропический средиземноморский	Умеренно-континентальный (ближе к морскому)	Умеренно-континентальный
Биом	Постоянно влажные леса	Субтропические средиземноморские кустарники (финбош)	Широколиственные леса	Смешанные леса
Численность населения (млн чел), 2023 г. / плотность (чел./км ²)	5,92/8195	4,4/1950	3,8/4463	13,1/5115
Площадь города (км ²)	735	2446	891	2511
Открытость данных	данные полностью открыты и верифицируемы	частичные пробелы в мониторинге	данные полностью открыты и верифицируемы	ограниченный доступ к данным
Управленческая модель	Технократическая (инновации в сохранении БР)	Экосистемно-ориентированная (сохранение эндемиков)	Социально-управленческая (гражданская наука и соучастие)	Социально-управленческая (масштабные проекты и соучастие горожан)
Наличие специальных программ по сохранению БР	<ul style="list-style-type: none"> Город-сад (City in a Garden) Зелёный план (Green Plan 2030) 	<ul style="list-style-type: none"> Сеть сохранения биоразнообразия Кейптауна (Cape Town Biodiversity Network) Финбош для будущего (Fynbos for the Future) 	<ul style="list-style-type: none"> Зелёные коридоры Берлина (Grünzug Network) Городские деревья Берлина (Berliner Stadtbäume - картирование деревьев силами горожан) 	<ul style="list-style-type: none"> Миллион деревьев «Парки Москвы» Проект по озеленению Садового кольца
Репрезентативность	Азиатские мегаполисы	Глобальные точки БР	Европейские «зелёные столицы»	Постсоветские города

Источник: 'A city in a garden': Singapore's journey to becoming a biodiversity model [Электронный ресурс]. URL: <https://clk.li/chpS> (дата обращения: 27.02.2025); Singapore Green Plan 2030 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.greenplan.gov.sg/overview/> (дата обращения: 27.02.2025); City of Cape Town. Cape Town Biodiversity Network [Электронный ресурс]. URL: <https://clk.li/dRSW> (дата обращения: 11.02.2025); Fynbos for All Initiative [Электронный ресурс]. URL: <https://greenpop.org/fynbos-for-the-future/> (дата обращения: 11.02.2025); Berliner Netzwerk für Grünzüge [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gruenzuege-fuer-berlin.de> (дата обращения: 27.02.2025); Stadtbäume für Berlin [Электронный ресурс]. URL: <https://www.berlin.de/sen/uvk/natur-und-gruen/stadtgruen/stadtbaeume/> (дата обращения: 27.02.2025); Проекты Москвы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru/city/projects/> (дата обращения: 27.02.2025)

¹ Порядок городов отражает методологию отбора модельных территорий по биогеографическому градиенту.

качества воздуха и учёта видов в режиме реального времени. Кроме того, используются традиционные подходы по развитию сети озелененных территорий. Так, создание экологических коридоров в городской черте, позволило соединить в единую экологическую сеть более 300 парков и 4 природных заповедника, это дало возможность многим животным и птицам, в т. ч. птицам-носорогам (*Bucerotidae*) и малайскому рыбному филину (*Ketupa ketupu*) свободно мигрировать в черте города.

Ещё одним решением по сохранению биоразнообразия в городской среде является широко используемая в Сингапуре технология вертикального озеленения. Два всемирно известных проекта — 30-этажный отель *Oasia Hotel Downtown*⁷ с зелёным фасадом, где на площади около 1 800 м² растут более 21 вида тропических лиан и растений (например, *Antigonon leptopus* и *Vernonia elliptica*) и сады у залива с «супердеревьями» (*Gardens by the Bay*)⁸ — стали современным символом синтеза экологии и инноваций и визитной карточкой Сингапура. Однако, несмотря на достигнутые успехи, отмечается и ряд угроз для сохранения аборигенных сообществ, связанных с активной интродукцией экзотических видов при вертикальном озеленении, которые часто вытесняют представителей природной флоры, например, орхидея *Vanda Miss Joaquim*, которая является национальным символом страны.

Кейптаун, занимая в 3,3 раза большую территорию при вдвое меньшем населении, фокусируется преимущественно в своих программах на сохранении уникальных природных экосистем финбоша. Здесь, по разным оценкам, насчитывает около 9 600 видов растений, 68% из которых являются эндемиками⁹, включая редкие протеи (*Protea spp.*) и эрики (*Erica spp.*). Одной из проблем в сохранении биоразнообразия этой территории является сокращение площади зелёных зон (парки, заповедники,

природные коридоры), которые занимают всего 22%. Снижение этого показателя на 3% за последние 20 лет, в т. ч. обусловлено увеличением числа засух и пожаров в регионе в целом. Всё это создаёт угрозы для сохранения уникальных аборигенных экосистем в городе и эндемиков Капского царства¹⁰.

В ответ на существующие угрозы биоразнообразию в Кейптауне реализуется целая серия программ и проектов по его сохранению и улучшению качества городской среды. Одной из таких комплексных программ можно назвать *Cape Town Biodiversity Network*¹¹, которая направлена на восстановление деградированных территорий финбоша — уникальной растительной формации Капского флористического царства и создании экологических коридоров, связывающих урбанизированные ландшафты с природными, проведена реинтродукция эндемичных видов, включая серебряное дерево (*Leucadendron argenteum*) [22]. Ещё одной инициативой, объединяющей учёных, местные сообщества и школы является проект «Финбош для всех»¹². В рамках этого проекта волонтеры высаживают эндемичные растения (например, *Erica verticillata*) в парках и вдоль дорог, а также удаляют инвазивные виды, такие, как австралийская акация (*Acacia spp.*). Создание сети зелёных коридоров между городом и природным резерватом Кейп-Пойнт позволяет мигрировать многим видам животных, таким, как капская лисица (*Vulpes chama*) и капский сахарный медосос (*Promerops cafer*). Коридоры включают подземные переходы для животных и «зелёные мосты» над автострадами¹³.

Москва как крупнейший по численности населения европейский мегаполис

⁷ Архитектурное бюро WOHA: [сайт]. URL: <https://woha.net/project/oasia-hotel-downtown/> (дата обращения: 27.02.2025).

⁸ Gardens by the Bay: [сайт]. URL: <https://www.gardensbythebay.com.sg> (дата обращения: 27.02.2025).

⁹ UNESCO. Cape Floral Region Protected Areas: [сайт]. URL: <https://whc.unesco.org/en/list/1007/> (дата обращения: 10.02.2025).

¹⁰ South African National Biodiversity Institute (SANBI). Urban Expansion and Biodiversity Loss SANBI. Threats to Cape Flora [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sanbi.org/biodiversity/fynbos/> (дата обращения: 11.02.2025).

¹¹ City of Cape Town. Cape Town Biodiversity Network [Электронный ресурс]. URL: <https://clk.li/dRSW> (дата обращения: 11.02.2025).

¹² SANBI. Fynbos for All Initiative [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sanbi.org> (дата обращения: 11.02.2025).

¹³ CapeNature. Cape Peninsula Biodiversity Corridors [Электронный ресурс]. URL: <https://www.capenature.co.za> (дата обращения: 11.02.2025).

(13,1 млн жителей) сталкивается с вызовами управления протяжёнными, но фрагментированными зелёными зонами. Сегодня Москва занимает лидирующие позиции по площади зелёных насаждений на душу населения, что делает её более привлекательной с точки зрения экологического потенциала для горожан. Площадь зелёных зон, по данным официальных отчётов, составляет порядка 54%. Однако флора Москвы насчитывает 1 647 видов [3] из которых только 5% — эндемики. Это связано как с климатическими ограничениями, так и с исторически сложившимся подходом к озеленению декоративными, а не аборигенными видами.

Опыт Берлина в сохранении биоразнообразия в городской среде демонстрирует ещё один пример интеграция природы и городского развития. Этот город стал лидером в области охраны городского биоразнообразия и на протяжении десятилетий ведёт систематические исследования городских сообществ дикорастущих растений¹⁴. Биоразнообразие города поддерживается через развитую сеть природоохраненных территорий, где также сохраняются редкие виды птиц, летучих мышей и насекомых. Берлинская сеть экокоридоров «*Grünzug*» протяжённостью более 800 км соединяет парки (*Tiergarten*), леса (*Grunewald Forest*) и водоёмы (реки Шпрее и Хафель), обеспечивая миграцию видов и снижая фрагментацию их сред обитания.

В Берлине активно реализуются проекты по зелёным крышам и фасадам для снижения эффекта «теплого острова» и создания мест обитания для различных насекомых и птиц.

Кроме того, Берлин отличается активным вовлечением граждан в процессы сохранения биоразнообразия (например, *Berliner Stadtbäume*), когда учёт деревьев ведётся с помощью городских волонтеров [11]. Все эти инициативы и проекты делают Берлин образцом устойчивого городского планирования.

На следующем этапе были отобраны основные индикаторы (табл. 3) биоразнообразия на основании доступности данных

¹⁴ Urban biodiversity protection in the city of Berlin, Germany [сайт]. URL: <https://clk.li/uHZv> (дата обращения: 11.02.2025).

(научные публикации, официальная статистика, базы данных мониторинга воздуха) с возможностью их использования для оценки эффективности принимаемых мер по управлению биоразнообразием в конкретных городах на основе расчёта индекса.

Индекс рассчитывается в общем виде по формуле (1), которая позволяет агрегировать данные (табл. 3) в единый показатель. Формула (2) для расчёта ИБ, представленная в статье, была разработана автором на основе упрощённой модели Сингапурского индекса биоразнообразия городов (СВИ)¹⁵ для иллюстрации подхода к оценке эффективности усилий по сохранению биоразнообразия на основе набора ключевых показателей. С целью приведения разнородных показателей к единой шкале все данные были нормализованы. Учитывая роль эндемиков как ключевых маркеров биогеографической уникальности экосистем городов и их повышенную уязвимость к антропогенным воздействиям¹⁶, в структуре индекса им присвоен максимальный весовой коэффициент (25%). Остальные базовые показатели получили по 15%. Для возможности сравнения данных с другими индексами и рейтингами ИБ был рассчитан в баллах. Использование единой шкалы упрощает интерпретацию и визуализацию результатов. Чем выше значение индекса, тем эффективнее политика города в области управления биоразнообразием.

Для интерпретации баллов используется следующая экспертная градация:

- высокое биоразнообразие — 100–70 баллов;
- умеренное биоразнообразие — 69–40 баллов, требуется улучшение по отдельным параметрам;
- низкое биоразнообразие — 39–0 баллов, критически важны системные изменения.

¹⁵ The User's Manual on the Singapore Index on Cities' Biodiversity [Электронный ресурс]. URL: <https://clck.ru/3PrP8g> (дата обращения: 11.02.2025).

¹⁶ Куньминско-Монреальская глобальная рамочная программа в области биоразнообразия [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unep.org/ru/resources/kunminsko-monrealskaya-globalnaya-ramochnaya-programma-v-oblasti-bioraznoobraziya> (дата обращения: 11.02.2025).

Таблица 3/Table 3

Индикаторы биоразнообразия для оценки индекса / Biodiversity indicators for the assessment of the Index

Индикатор / Источник данных	Что показывает	Обоснование
<i>Природное богатство</i>		
1. Количество видов птиц и растений / eBird, GBIF, городские отчёты, iNaturalist	Разнообразие фауны и флоры	Отражают общее богатство экосистем. Чем выше этот показатель, тем устойчивее экосистема
2. Доля эндемичных растений / Красные книги, научные публикации	Уникальность экосистемы	Эндемики – индикаторы глобальной ценности биоразнообразия. Их сохранение критично для поддержания глобального биоразнообразия
	Уязвимость эндемичных растений	Узкий ареал делает виды чувствительными к изменениям среды
3. Доля аборигенных видов флоры/научные публикации	Естественность и устойчивость экосистемы	Высокая доля указывает на хорошую сохранность природного биоразнообразия
<i>Урбанизированная среда</i>		
4. Площадь зелёных зон / Спутниковые снимки, OSM	Пространство для жизни	Чем больше зелёных территорий, тем выше шансы на сохранение популяций и миграцию видов.
	Политика управления	Увеличение показателя доказывает реализацию стратегий по интеграции природы в урбанизированную среду
5. Уровень загрязнения воздуха (PM2.5)/ OpenAQ, ВОЗ	Влияние на экосистемы (угроза для чувствительных к загрязнению видов)	Загрязнение напрямую угрожает растениям, животным и людям, снижая качество среды

Источник: составлено автором

Индекс биоразнообразия = \sum (Норм. Параметр \times Вес параметра) (1)

$$\begin{aligned}
 \text{ИБ} = & \frac{\text{количество видов птиц в городе}}{\text{max значение среди городов}} \\
 & \times 15 + \frac{\text{количество видов растений в городе}}{\text{max значение среди городов}} \times 15 + \frac{\text{доля эндемиков в городе}}{\text{max значение среди городов}} \\
 & \times 25 + \frac{\text{площадь зелёных зон в городе}}{\text{max значение среди городов}} \times 15 + \frac{\text{доля аборигенных видов флоры}}{\text{max значение среди городов}} \times 15 \left(1 - \right. \\
 & \left. \frac{\text{PM2.5 города}}{\text{max значение среди городов}} \right) \times 15\% \text{ (2)}
 \end{aligned}$$

СРАВНЕНИЕ ИНДИКАТОРОВ БИОРАЗНООБРАЗИЯ ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ ГОРОДОВ

Расчёт индекса биоразнообразия (ИБ) выявил значительные различия между городами, отражающие влияние природ-

но-географических, управленческих и социально-экономических факторов на состояние экосистем (табл. 4).

Согласно проведённым расчётам, Кейптаун получил наибольший балл (83 балла) благодаря уникальным флористическим характеристикам: большому видовому

Таблица 4 / Table 4

Сравнение индикаторов биоразнообразия для модельных городов / Comparison of biodiversity indicators for case-cities

Индикатор	Сингапур	Кейптаун	Берлин	Москва
Площадь зелёных зон, % от всей территории города	47 ¹	22 ²	44 ³	54 ⁴
Число видов птиц ⁵	395	364	180	270
Число видов растений	2200+	3350	1527	1647
Доля эндемичных растений, %	15	68	2	5
Доля аборигенных видов флоры, %	47	90	85	50
Уровень загрязнения воздуха (PM2.5) ⁶ µg/mi	13,4	5,9	10,5	10,4
Индекс биоразнообразия (0–100)	51	83	44	46

Источник: составлено автором по [3, 7; 19; 22]

разнообразию и высокой доли эндемизма (68%) [21; 22]. Это обусловлено расположением в Капском флористическом царстве — одном из мировых центров биоразнообразия. Более низкий уровень загрязнения частицами PM2.5 (5,9 µg/mi) в сравнении с другими городами, может говорить, с одной стороны, об эффективной экологической политике, а с другой — связан с его природно-географическими (аэрация городского пространства из-за ветров с океана) и социально-экономическими (главный сектор экономики — туризм) особенностями. Однако проблемным является аспект, связанный с площадью зелёных зон (22%), которые в основном сосредоточены на ООПТ. Для улучшения ситуации городу в дальнейшем стоит расширять парковые зоны в урбанизированных районах, используя программу «Cape Town Biodiversity Network», сохра-

нять эндемичные виды, усиливая борьбу с инвазивными.

Сингапур по сумме баллов занимает второе место (51 балл). Этот город успешно сочетает урбанизацию с активным озеленением, но сталкивается с рядом проблем. Благодаря реализуемой с 2013 г. программе «Город в саду», здесь наблюдается довольно высокое видовое разнообразие (395 видов птиц и более 2 200 видов растений) на достаточно большой площади, занятой зелёными зонами (47%). Для города характерно высокое разнообразие реализуемых высокотехнологичных программ и проектов по увеличению биоразнообразия, и активно внедряются «умные» технологии²³ для мониторинга качества воздуха и учёта видов флоры и фауны. Однако, несмотря на достигнутые успехи, отмечается и ряд угроз для сохранения биоразнообразия, связанных с активной интродукцией экзотических видов при вертикальном озеленении, которые часто вытесняют представителей природной флоры, например, орхидеи *Vanda Miss Joaquim* — национальный символ страны [24]. Для города отмечается низкая доля эндемиков (15%) и аборигенных видов флоры (47%), что является ограничивающим фактором получения более высокого балла ИБ, несмотря

¹⁷ National Parks Board: [сайт]. URL: <https://www.nparks.gov.sg> (дата обращения: 25.01.2025).

¹⁸ City of Cape Town: [сайт]. URL: <https://odp-ctegis.opendata.arcgis.com> (дата обращения: 25.01.2025).

¹⁹ Umweltatlas Berlin: [сайт]. URL: <https://www.berlin.de/umweltatlas/> (дата обращения: 25.01.2025).

²⁰ Портал открытых данных Правительства Москвы: [сайт]. URL: <https://data.mos.ru> (дата обращения: 25.01.2025).

²¹ В таблице 4 и далее по тексту цифры по видовому богатству приведены без округления, т. к. каждый таксон влияет на расчёт индекса биоразнообразия.

²² Глобальная интерактивная карта концентрации PM2.5 по городам в 2023 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iqair.com/ru/world-air-quality-report> (дата обращения: 11.02.2025).

²³ Программа Smart Nation Singapore: Smart Nation and Digital Government Office. Environmental Sensors: [сайт]. URL: <https://www.smartnation.gov.sg> (дата обращения: 10.02.2025).

на существенные по площади озеленённые территории.

В Сингапуре отмечается ещё высокий уровень загрязнения воздуха по содержанию частиц (PM_{2.5}: 13,4 µg/mi), что превышает почти в 2,5 раза рекомендации ВОЗ (5 µg/mi)²⁴. Отличительной чертой политики этого мегаполиса в отношении поддержания биоразнообразия является не только повышение площади зелёных территорий, но и увеличение биоразнообразия. Сингапур может улучшить свои позиции в рейтинге по ИБ, во-первых, за счёт улучшения качества из-за ускорения перехода на электротранспорт (к 2030 г. – 60% автобусного парка) и расширения программы *SolarNova* (установка солнечных панелей на 95% зданий к 2035 г.), а во-вторых, увеличивая и дальше долю аборигенных видов в озеленении (например, замена декоративных видов *Delonix regia* аборигенными таксонами *Dipterocarpus*, *Fagraea* в проектах вертикального озеленения).

Москва выделяется масштабами озеленения, но отстаёт по качественным показателям. Больше половины территории (54%) занято зелёными зонами (лесопарки, парки, скверы). Реализуемая с 2013 г. программа «Миллион деревьев» помогла улучшить доступ к зелёным территориям в спальных районах и охватила более половины городских дворов. Однако не во всех районах города реализация этой программы привела к улучшению качества среды (рис. 1). Так, в некоторых исторических центральных районах замена газонов асфальтовым покрытием или плиткой на внутридворовых территориях при «благоустройстве» сократила площадь травянистых сообществ примерно на 40% (на фото справа), нарушив кормовую базу для насекомых-опылителей и создав локальные участки «островов тепла», в дальнейшем это может привести к усыханию деревьев из-за нехватки влаги корневой системой.

²⁴ Глобальная интерактивная карта концентрации PM_{2.5} по городам в 2023 [сайт]. URL: <https://www.iqair.com/ru/world-air-quality-report/> (дата обращения: 11.02.2025); What are the WHO Air quality guidelines? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines> (дата обращения: 11.02.2025).

В то же время присутствие в озеленении дворового пространства больших площадей с естественной растительностью благоприятно влияет на биоразнообразие двора и создаёт более комфортную и здоровую среду для горожан (фото слева).

Однако среднее видовое разнообразие (270 видов птиц, 1 647 видов растений), низкая доля эндемиков (5%) и невысокие показатели доли аборигенных видов флоры (из-за преобладания декоративных видов в озеленении) ставит Москву на третье место по данным расчёта ИБ. Для улучшения места в рейтинге нужно делать акцент не только на количестве, но и на качестве озеленённых территорий с приоритетом на восстановление экосистем с участием аборигенных видов в черте города.

Для Москвы отмечается повышенный уровень PM_{2.5} (10,4 µg/mi), что более чем в 2 раза превышает рекомендации ВОЗ (5 µg/mi). Это указывает на необходимость применения международных практик по внедрению «зелёных фильтров» (древесные и кустарниковые насаждения вдоль магистралей), а также ускорения перехода на электротранспорт и развития велоинфраструктуры.

Необходимо отметить, что, несмотря на имеющиеся проблемы, Москва сегодня активно реализует различные программы, направленные на компенсацию утраченного биоразнообразия (рис. 2). Например, создание новых экосистем на месте запечатанных поверхностей на основе инженерно-экологических решений с участием декоративных видов яблонь и луговых трав, как на Сухаревской площади. Реабилитация природных территорий (борьба с инвазиями – удаление *Acer negundo*, создание экотроп с минимальным вмешательством, посадка аборигенных видов деревьев), как в заказнике Воробьёвы горы.

Кроме того, в последние годы москвичи начинают активно использовать различные мобильные приложения в области гражданской науки (*INaturalist*, *eBird*), которые помогают собирать не только данные о биоразнообразии, но и вести мониторинг инвазионных видов (Антибошчевик)²⁵.

²⁵ Антибошчевик: [сайт.] URL: <https://antiborshevik.info> (дата обращения 11.02.2024).



Рис. 1 / Fig. 1. Пример озеленения дворов в разных частях города Москвы (спальный район (Ясенево) слева и центральный исторический район (Красносельский) справа) / Greening of courtyards in different parts of the Moscow (residential area on the left and central area on the right)

Источник: фото автора

Берлин, несмотря на европейские экологические стандарты качества городской среды: около 44% территории города занято парками, лесами и водными объектами, а 14% — охраняемыми природными территориями, что делает этот город одним из лидеров в Европе по сохранению городского биоразнообразия²⁶, тем не менее город имеет более низкий балл (44 балла) из-за ограниченного биоразнообразия (1 527 видов растений и 180 видов птиц) и всего 2% эндемиков. Для города характерна средняя площадь зелёных зон (44%), хотя реализуемые программы улучшает их связность. Уровень PM_{2.5} в Берлине (10,5 µg/mi) сопоставим с московским показателем (10,4 µg/mi), но при этом существенно ниже, чем в Сингапуре (13,4 µg/mi). Такой результат был достигнут благодаря разви-

той системе общественного транспорта и велоинфраструктуре. Отличительной чертой этого мегаполиса является активное вовлечение граждан в процессы оценки и сохранения биоразнообразия. Рекомендуется и дальше уделять внимание посадкам местных видов растений в парках и расширять сеть «зелёных коридоров».

Таким образом, видовое богатство, уровень эндемизма, число аборигенных видов флоры являются ключевыми факторами высокого значения индекса, как показывает пример Кейптауна. Загрязнение воздуха значительно повышает риск негативного влияния на биоразнообразие и снижает его потенциал так же, как и небольшая доля эндемиков и аборигенных видов флоры даже при больших площадях зелёных зон, как у Сингапура. Программы восстановления зелёных зон эффективны, но требуют фокуса на аборигенных видах.

²⁶ Senate Department for Urban Mobility, Transport, Climate Action and the Environment [сайт]. URL: <https://www.berlin.de/sen/uvk/en/> (дата обращения: 11.02.2025).



Рис. 2 / Fig. 2. Примеры компенсации биоразнообразия. Сквер у Сухаревской площади и лесной участок в заказнике Воробьевы горы г. Москва / Park near Sukharevskaya Square, a forest in the Vorobyovy Gory Nature Reserve Moscow

Источник: фото автора

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ИНДЕКСА БИОРАЗНООБРАЗИЯ ДЛЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Индекс биоразнообразия может служить не только инструментом диагностики эффективности принимаемых мер в области управления биоразнообразием, но и основой для принятия решений, направленных на повышение здоровья городских экосистем.

Преимуществом использования индекса биоразнообразия является возможность экспресс-оценки городов на основе объективных критериев. В дальнейшем он может быть актуализирован (например, могут быть изменены веса или добавлены новые параметры). Кроме того, использование ИБ может обеспечить гибкость при принятии управленческих решений, например, можно использовать пороговые значения для оценки эффективности мер.

Для выявления параметров, наиболее тесно связанных с индексом биоразно-

образия (ИБ), несмотря на малую выборку, был проведен корреляционный анализ. Для этого использовался коэффициент корреляции Пирсона. Результаты корреляционного анализа выявили значимые зависимости между (ИБ) и ключевыми экологическими параметрами (рис. 3). Наблюдается практически линейная положительная связь ИБ с долей эндемичных видов растений ($r = +0,997$, $p < 0,001$), что подтверждает их роль как ключевых индикаторов биоразнообразия. Эта зависимость объясняется уникальным вкладом эндемиков в формирование специфических экосистем, характерных для конкретных биогеографических регионов. Поэтому высокая доля эндемиков (как в Кейптауне – 68%) гарантирует максимальные значения индекса, а сохранение и восстановление местных эндемиков является наиболее эффективной стратегией повышения биоразнообразия в глобальном контексте.

Сильные положительные корреляции обнаружены между ИБ и критерием видового богатства флоры ($r = +0,980$, $p < 0,01$),

Параметры	Коэф. корреляции с ИБ ▼	Интерпретация
1 Доля эндемиков	1.00	Почти линейная зависимость
2 Количество видов растений	0.98	Сильная положительная
3 Количество видов птиц	0.56	Умеренная положительная
4 Доля аборигенных видов флоры	0.55	Умеренная положительная
5 PM2.5	-0.81	Сильная отрицательная
6 Площадь зел. зон	-0.94	Сильная отрицательная

Рис. 3 / Рис. 3. Корреляция экологических параметров с Индексом Биоразнообразия/ Correlation of environmental parameters with the Biodiversity Index. Составлено автором.

Источник: составлено автором

что подтверждает важность сохранения разнообразия флоры, формирующей основу экосистем и поддерживающей сложные трофические связи для обеспечения устойчивости среды. Одновременно был выявлен парадоксальный эффект, когда увеличение площади зелёных зон демонстрирует значимую отрицательную связь с ИБ ($r = -0,938$, $p < 0,01$), как, например в Москве (54% зелёных зон при ИБ=46). Это свидетельствует, что формальное озеленение без сохранения естественных биотопов может снижать экологическую ценность территорий. Поэтому качество зелёных зон (естественность, видовое разнообразие) важнее их площади для поддержания естественного биоразнообразия городов.

Загрязнение воздуха (PM2.5) оказывает выраженное негативное влияние ($r = -0,812$, $p < 0,05$), подтверждая гипотезу о токсическом воздействии на биоту. Умеренные положительные связи с долей аборигенных видов ($r = +0,545$) и разнообразием птиц ($r = +0,562$) подчёркивают важность сохранения автохтонных видов растений и орнитофауны как индикаторов высокого качества городских экосистем.

Выявленные закономерности имеют важные практические выводы для градостроительной политики. Практически

линейная зависимость индекса биоразнообразия (ИБ) от доли эндемичных видов ($r = +0,997$) подтверждает необходимость их приоритетной защиты, особенно в условиях стремительной урбанизации. Одновременно значимая отрицательная корреляция между площадью зелёных зон и ИБ ($r = -0,938$) указывает, что для сохранения биоразнообразия ключевое значение имеет качество озеленения (естественность, видовое богатство), а не формальное увеличение площадей, как это наблюдается в Москве, где 54% территории занято зелёными насаждениями при сравнительно низком ИБ (46 баллов). Однако для регулирования микроклимата (снижение эффекта «теплого острова», аккумуляция углерода) площадь и фитомасса зелёных зон остаются также критически важными параметрами.

АНАЛИЗ ВКЛАДА ГОРОДСКИХ ПРОЕКТОВ ПО БИОРАЗНООБРАЗИЮ В ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИНИЦИАТИВЫ

Урбанизированные территории обладают значительным потенциалом для реализации глобальных инициатив в области устойчивого развития и сохране-

Таблица 5 / Table 5

Связь городских проектов с целями устойчивого развития (ЦУР) / Links of urban projects with the Sustainable Development Goals (SDGs)

ЦУР	Конкретная задача	Решения, примеры и рекомендации
 ЦУР 11	11.7: Обеспечить доступ к безопасным зелёным зонам к 2030 г.	Увеличение площади зелёных зон напрямую улучшает качество жизни горожан. Сингапур – 47% зелёных зон, Москва – 54% зелёных зон. Внедрить стандарты качества озеленения (не менее 30% природных экосистем и представителей местной флоры, внимание к эндемичным видам, доступность для всех групп населения).
	11.6: Снижение негативного экологического воздействия городов (PM2.5, CO ₂)	Зелёные зоны и экологические виды транспорта снижают уровень загрязнения. Берлин: зелёные крыши, велоинфраструктура. Расширять «зелёные коридоры» вдоль дорог (озеленение «Садового кольца») и зоны с ограничением автомобильного движения.
 ЦУР 13	Снижение выбросов CO ₂ и адаптация к климатическим рискам	Зелёная инфраструктура поглощает CO ₂ и смягчает эффект «теплового острова». Сингапур («супердеревья» поглощают CO ₂), Берлин (снижение температуры на 2–3°C за счёт зелёных крыш). Мониторинг реального углеродного баланса.
 ЦУР 15	15.5: Сокращение деградации естественных сред обитания	Восстановление аборигенных видов и борьба с инвазивными. Кейптаун (проект восстановления финбоша), Москва (восстановление луговых сообществ вместо газонов). Ужесточить законы по охране редких видов и создать микрозаповедники в городской черте.
 ЦУР 3	Снижение заболеваемости за счёт улучшения качества среды	Зелёные зоны снижают уровень стресса и респираторные заболевания. Все города: снижение заболеваемости астмой на 15% в районах рядом с парками (данные ВОЗ). Интегрировать зелёные зоны в программы общественного здравоохранения.
 ЦУР 9	Внедрение устойчивых технологий в городское планирование	«Умные» решения (датчики, GIS, мобильные приложения) повышают эффективность управления биоразнообразием. Сингапур (мониторинг видов через IoT), все города (платформа iNaturalist). Разработать национальные стандарты для «умных» экологических технологий.

Источник: составлено автором

ния биоразнообразия. Анализ практики управления биоразнообразием 4 городов — Сингапура, Кейптауна, Берлина и Москвы — показал связи целей устойчивого развития (ЦУР) ООН с конкретными решениями, что позволило сформулировать рекомендации для повышения их эффективности (табл. 5).

Таким образом, дальнейшее развитие программ по сохранению биоразнообразия в городах должно опираться на 3 ключевых подхода: интеграцию зелёной инфраструктуры в планирование (ЦУР 11, 13), восстановление аборигенных экосистем (ЦУР 15) и цифровизацию управления биоразнообразием (ЦУР 9).

Полученные результаты показывают, что сегодня ключевая проблема при проектировании зелёной инфраструктуры городов состоит не столько в количестве, сколько в качестве и функциональности зелёных зон. Для создания благоприятной среды требуются системное планирование с учётом экологических коридоров; внедрение природоподобных решений (дождевые сады, многоярусные посадки); участие жителей в проектировании и сохранении биоразнообразия территорий с целью повышения инклюзивности реализуемых программ и мероприятий. Для реализации этих задач предлагается общий алгоритм, направленный на интеграцию биоразнообразия в городское планирование и включающий 7 шагов:

1. Оценка текущего состояния биоразнообразия (инвентаризация видов, экосистем, анализ угроз).
2. Разработка стратегии, согласованной с ЦУР и Куньминско-Монреальской программой.
3. Проектирование зелёной инфраструктуры и водно-зелёного каркаса с применением природоподобных технологий;
4. Борьба с инвазивными видами и загрязнением.
5. Вовлечение горожан через гражданскую науку и образование (iNaturalist, eBird, GBIF).
6. Мониторинг эффективности (индексы биоразнообразия, сенсоры, приложения, ИИ).
7. Финансирование и законодательная поддержка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование демонстрирует, что сохранение биоразнообразия в урбанизированных ландшафтах является одним из критических факторов дальнейшего устойчивого развития городов. Сравнительный анализ мегаполисов, представляющих основные биомы Земли — Сингапур (влажные тропические леса), Кейптаун (финбош), Берлин (широколиственные леса) и Москва (смешанные леса) позволил сделать ряд выводов:

1. высокие показатели биоразнообразия (как в Кейптауне, ИБ=83) достигаются не за счёт площади зелёных зон, а из-за сохранения эндемиков ($r = +0.997$) и аборигенных видов, тогда как формальные подходы к озеленению (без учета природного разнообразия) могут снижать экологическую ценность территорий. Поэтому качество самих озеленённых территорий оказывается важнее их количества и площадных характеристик;

2. системные управленческие меры (восстановление биотопов, борьба с инвазиями, развитие сети «зелёных коридоров») значительно повышают устойчивость экосистем. Технологические инновации (в Сингапуре) и развитие гражданской науки (в Берлине) существенно повышают эффективность реализуемых мероприятий;

3. успешно реализуемые городские проекты по сохранению биоразнообразия напрямую способствуют достижению Целей устойчивого развития: ЦУР 11 (доступ к зелёным зонам) через создание парков, ЦУР 13 (борьба с изменением климата) — частично, преимущественно за счёт локальной адаптации (снижение «острова тепла», управление ливневыми стоками; подцель 13.1), но с минимальным вкладом в глобальное смягчение (углеродный сток <1.5% городских выбросов CO₂; подцель 13.2), и ЦУР 15 (сохранение экосистем) путём восстановления аборигенных сообществ. Для максимальной эффективности проекты требуют адаптации к локальным условиям и актуализации законодательно-нормативной базы.

Предложенный индекс биоразнообразия (ИБ) доказал свою релевантность как инструмент кросс-сравнения городов, вы-

являя пробелы в политике управления биоразнообразием (низкая доля аборигенных видов в Сингапуре, фрагментация зелёных зон в Кейптауне). Однако его дальнейшее внедрение требует:

- развития открытых систем мониторинга биоразнообразия на уровне различных таксонов, особенно для городов глобального Юга и постсоветского пространства;
- учёта социальных аспектов (равный доступ к зелёным зонам, вовлечение жителей через платформы типа *iNaturalist*);
- разработки национальных стандартов оценки биоразнообразия (для Рос-

сии можно предложить, например, включение качественных показателей биоразнообразия в индекс качества городской среды).

Универсальные решения не смогут поддержать сохранение локального биоразнообразия в городах, но предложенный ИБ и управленческий алгоритм могут создать научную основу для дальнейшей разработки персонализированных стратегий. Полученные данные могут быть использованы при планировании долгосрочных научно-исследовательских программ при проведении мониторинга биоразнообразия как на региональном, так и на глобальном уровнях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / под ред. Г. Н. Огуреевой. М.: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. 623 с.
2. Биоразнообразие и способы его оценки / В. В. Корунчикова, И. С. Белюченко, Ю. Ю. Никифорова и др. Краснодар: КубГАУ, 2018. 85 с.
3. Урбанофлористика в России: современное состояние и перспективы / А. С. Третьякова, О. Г. Баранова, С. А. Сенатор, Н. Н. Панасенко, А. В. Суткин, М. Х. Алихаджиев // *Turczaninowia*. 2021. Т. 24. № 1. С. 125–144. DOI: 10.14258/turczaninowia.24.1.15
4. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management / M. F. J. Aronson, C. A. Lepczyk, K. V. Evans, M. Goddard, P. P. Marra, J. S. MacIvor, C. H. Nilon, et al. // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2017. Vol. 15. Iss. 4. P. 189–196. DOI:10.1002/fee.1480
5. Handbook on the Singapore Index on Cities' Biodiversity / L. Chan, O. Hillel, P. Werner, N. Holman, I. Coetzee, R. Galt, T. Elmqvist. 2021. 70 p.
6. Dnaz S., et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change // *Science*. 2019. Vol. 366. Iss. 6471. DOI: 10.1126/science.aax3100
7. Ecosystem Services of Russia: Prototype National Report. Vol. 3. In *Green Infrastructure and Ecosystem Services of the Largest Cities in Russia* / O. A. Klimanova, ed. Moscow, 2021. 100 p.
8. Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities: A Global Assessment / T. Elmqvist, et al., eds. 2013. 771 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_11
9. Implementing and managing urban forests: A much-needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing / T. Endreny, R. Santagata, A. Perna, C. De Stefano, R. F. Rallo, S. Ulgiati // *Ecological Modelling*. 2017. Vol. 360. P. 328–335. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2017.07.016
10. Francis R. A., Lorimer J. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls // *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92. P. 1429–1437. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.01.012
11. Towards Green Cities: Urban Biodiversity and Ecosystem Services in China and Germany / K. Grunewald, L. Junxiang, X. Gaodi, K. S. Lennart. Cham: Springer, 2017. 197 p. DOI: 10.1007/978-3-319-58223-8
12. Urban air quality management-A review / S. Gulia, Shiva Nagendra S.M., M. Khare, I. Khanna // *Atmospheric Pollution Research*. 2015. Vol. 6. Iss. 2. P. 286–304. DOI:10.5094/APR.2015.033
13. Haase D., et al. A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments: Concepts, Models, and Implementation // *Ambio*. 2014. Vol. 43(4). P. 413–433. DOI: 10.1007/s13280-014-0504-0
14. Javadi R., Nasrollahi N. Urban green space and health: The role of thermal comfort on the health benefits from the urban green space; a review study // *Building and Environment*. 2021. Vol. 202. P. 108039. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108039
15. Beta diversity of urban floras / F. A. La Sorte, M. F. J. Aronson, N. S. G. Williams, L. Celesti-Grapo, S. Cilliers, B. D. Clarkson, R. W. Dolan, et al. // *Global Ecology and*

- Biogeography. 2014. Vol. 23. P. 769–779. DOI: 10.1111/geb.12159
16. Lepczyk C. A., et al. Biodiversity in the city: fundamental questions for understanding the ecology of urban green spaces for biodiversity conservation // *BioScience*. 2017. Vol. 67. № 9. P. 799–807. DOI: 10.1093/biosci/bix079
17. Manoj R., Ravish K., Rahul B. Vertical Greenery Systems: a comprehensive review // *ICRRD JOURNAL*. 2022. Vol. 3. № 3. P. 117–135. DOI: 10.53272/icrrd
18. McDonald R., Marcotullio P., Güneralp B. Urbanization and Global Trends in Biodiversity and Ecosystem Services // *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*. Dordrecht: Springer, 2013. P. 31–52. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_3
19. Nowak D. J., Crane D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA // *Environmental Pollution*. 2002. Vol. 116. Iss. 3. P. 381–389. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7
20. Onaindia M., Fisher J. Urban Growth and Biodiversity Conservation. In: *Life on Land. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals* / W. Leal Filho, A. Azul, L. Brandli, et al., eds. Cham: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-319-71065-5_134-1
21. *Plants of the Greater Cape Floristic Region. Vol. 1: The Core Cape Flora* / J. Manning, P. Goldblatt, eds. Pretoria: SANBI, 2012. 360 p.
22. Rebelo A. G., et al. *Field Guide to the Proteas of the Cape Peninsula*. 2000. 130 p.
23. Shanahan D., Bush R., Gaston K., et al. Health Benefits from Nature Experiences Depend on Dose // *Scientific reports*. 2016. № 6. P. 28551. DOI: 10.1038/srep28551
24. *Singapore Biodiversity: An Encyclopedia of the Natural Environment and Sustainable Development*. Singapore, 2011. 552 p.
25. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services / S. Diaz, J. Settele, E. S. Brondizio, Hien T Ngo. Bonn, 2019. 56 p. DOI: 10.5281/zenodo.3553579
26. *The Economic Case for Greening the Global Recovery through Cities: 7 priorities for national governments* / M. Gulati, R. Becqué, N. Godfrey, A. Akhmouch, A. Cartwright, J. Eis, S. Huq, et al. 2020. 51 p.
27. United Nations Environment Programme and United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) *Global Environment for Cities-GEO for Cities: Towards Green and Just Cities*. UNEP, Nairobi, 2021. 146 p.
28. Votsi N.-E., et al. Urban Biodiversity Index for Trees: A Climate Adaptation Measure for Cities Based on Tree Inventories // *Environments*. 2024. Vol. 11. Iss. 144. P. 1–21. DOI: 10.3390/environments11070144
29. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. 290 p.
30. Martins J. O., Sharifi A. *World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities/ United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat)*. 2022. 400 p.

REFERENCES

1. Ogureeva G. N., ed. *Biodiversity of Russian biomes. Plain biomes*. Moscow: FGBU "IGKE", 2020. 623 p. (in Rus.)
2. Korunchikova V. V., Belyuchenko I. S., Nikiforenko Yu. Yu., et al. *Biodiversity and methods for its assessment*. Krasnodar: KubSAU, 2018. 85 p. (in Rus.)
3. Tretyakova A. S., Baranova O. G., Senator S. A., Panasenko N. N., Sutkin A. V., Alikhadzhiev M. Kh. Urban floristry in Russia: current state and prospects. In: *Turczaninowia*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 125–144. DOI: 10.14258/turczaninowia.24.1.15 (in Rus.)
4. Aronson M. F. J., Lepczyk C. A., Evans K. V., Goddard M., Marra P. P., MacIvor J. S., Nilon C. H., et al. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. In: *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2017, vol. 15, iss. 4. P. 189–196. DOI: 10.1002/fee.1480
5. Chan L., Hillel O., Werner P., Holman N., Coetzee I., Galt R., Elmquist T. *Handbook on the Singapore Index on Cities' Biodiversity*. 2021. 70 p.
6. Dhaz S., et al. Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. In: *Science*, 2019, vol. 366, iss. 6471. DOI: 10.1126/science.aax3100
7. Klimanova O. A., ed. *Ecosystem Services of Russia: Prototype National Report. Vol. 3. In Green Infrastructure and Ecosystem Services of the Largest Cities in Russia*. Moscow, 2021. 100 p.
8. Elmquist T., et al., eds. *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities: A Global Assessment*, 2013. 771 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_11
9. Endreny T., Santagata R., Perna A., De Stefano C., Rallo R. F., Ulgiati S. Implementing and managing urban forests: A much-needed conservation strategy to increase ecosystem

- services and urban wellbeing. In: *Ecological Modelling*, 2017. Vol. 360. P. 328–335. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2017.07.016
10. Francis R. A., Lorimer J. Urban reconciliation ecology: The potential of living roofs and walls. In: *Journal of Environmental Management*, 2011, vol. 92, pp. 1429–1437. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.01.012
 11. Grunewald K., Junxiang L., Gaodi X., Lennart K. S. *Towards Green Cities: Urban Biodiversity and Ecosystem Services in China and Germany*. Cham: Springer, 2017. 197 p. DOI: 10.1007/978-3-319-58223-8
 12. Gulia S., Shiva Nagendra S. M., Khare M., Khanna I. Urban air quality management—A review. In: *Atmospheric Pollution Research*, 2015, vol. 6, iss. 2, pp. 286–304. DOI:10.5094/APR.2015.033
 13. Haase D., et al. A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments: Concepts, Models, and Implementation. In: *Ambio*, 2014, vol. 43(4), pp. 413–433. DOI: 10.1007/s13280-014-0504-0
 14. Javadi R., Nasrollahi N. Urban green space and health: The role of thermal comfort on the health benefits from the urban green space; a review study. In: *Building and Environment*, 2021, vol. 202, pp. 108039. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108039
 15. La Sorte F. A., Aronson M. F. J., Williams N. S. G., Celesti-Grapow L., Cilliers S., Clarkson B. D., Dolan R. W., et al. Beta diversity of urban floras. In: *Global Ecology and Biogeography*, 2014, vol. 23, pp. 769–779. DOI: 10.1111/geb.12159
 16. Lepczyk C. A., et al. Biodiversity in the city: fundamental questions for understanding the ecology of urban green spaces for biodiversity conservation. In: *BioScience*, 2017, vol. 67, no. 9, pp. 799–807. DOI: 10.1093/biosci/bix079
 17. Manoj R., Ravish K., Rahul B. Vertical Greenery Systems: a comprehensive review. In: *ICRRD JOURNAL*, 2022, vol. 3, no. 3, pp. 117–135. DOI: 10.53272/icrrd
 18. McDonald R., Marcotullio P., Güneralp B. Urbanization and Global Trends in Biodiversity and Ecosystem Services. In: *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities*. Dordrecht: Springer, 2013. P. 31–52. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1_3
 19. Nowak D. J., Crane D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. In: *Environmental Pollution*, 2002, vol. 116, iss. 3, pp. 381–389. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00214-7
 20. Onaindia M., Fisher J. Urban Growth and Biodiversity Conservation. In: Leal Filho W., Azul A., Brandli L., et al., eds. *Life on Land. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals*. Cham: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-319-71065-5_134-1
 21. Manning J., Goldblatt P., eds. *Plants of the Greater Cape Floristic Region. Vol. 1: The Core Cape Flora*. Pretoria: SANBI, 2012. 360 p.
 22. Rebelo A. G., et al. *Field Guide to the Proteas of the Cape Peninsula*. 2000. 130 p.
 23. Shanahan D., Bush R., Gaston K., et al. Health Benefits from Nature Experiences Depend on Dose. In: *Scientific reports*, 2016, no. 6, pp. 28551. DOI: 10.1038/srep28551
 24. *Singapore Biodiversity: An Encyclopedia of the Natural Environment and Sustainable Development*. Singapore, 2011. 552 p.
 25. Diaz S., Settele J., Brondizio E. S., Hien T Ngo. *Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, 2019. 56 p. DOI: 10.5281/zenodo.3553579
 26. Gulati M., Becqué R., Godfrey N., Akhmouch A., Cartwright A., Eis J., Huq S., et al. *The Economic Case for Greening the Global Recovery through Cities: 7 priorities for national governments*. 2020. 51 p.
 27. *United Nations Environment Programme and United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) Global Environment for Cities-GEO for Cities: Towards Green and Just Cities*. UNEP, Nairobi, 2021. 146 p.
 28. Votsi N.-E., et al. Urban Biodiversity Index for Trees: A Climate Adaptation Measure for Cities Based on Tree Inventories. In: *Environments*, 2024, vol. 11, iss. 144, pp. 1–21. DOI: 10.3390/environments11070144
 29. *WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization, 2021. 290 p.
 30. Martins J. O., Sharifi A. *World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities*. United Nations, 2022. 400 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Булдакова Екатерина Валентиновна – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоэкологии г. Москвы и городских агломераций Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева Российской академии наук.
e-mail: e_buldakova@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Ekaterina V. Buldakova – PhD (Geography), Leading Researcher, Laboratory of Geocology of Moscow and Urban Agglomerations, Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Science;
e-mail: e_buldakova@mail.ru