

БИОАРХИТЕКТУРА БУДУЩЕГО: РОЛЬ УМНЫХ ЗДАНИЙ В УСТОЙЧИВОМ РАЗВИТИИ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ

М. О. Шадпалов¹⁾, В. Р. Солонецкий²⁾, А. А. Илиндеев³⁾

¹⁾ студент, Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия, markshadpalov@gmail.com

²⁾ студент, Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия, vsolonek@mail.ru

³⁾ студент, Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия, ilindieiev@mail.ru

Научный руководитель **О.В. Гостева**

*кандидат экономических наук, доцент, Сибирский государственный университет науки
и технологий им. академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Россия, ov-gosteva@yandex.ru*

В статье рассматривается концепция биоархитектуры как синтеза умных технологий и биологических систем в городской среде. Предполагается, что интеграция биотехнологий в умные здания поспособствует энергоэффективности, экологической устойчивости и формированию регенеративных экосистем.

Ключевые слова: биоархитектура; умные здания; биотехнологии; биоэкономика; устойчивое развитие; городская среда.

BIOARCHITECTURE OF THE FUTURE: THE ROLE OF SMART BUILDINGS IN SUSTAINABLE URBAN DEVELOPMENT

M. O. Shadpalov¹⁾, V. R. Solonetskii²⁾, A. A. Ilindeev³⁾

¹⁾ student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia,
markshadpalov@gmail.com

²⁾ student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia,
vsolonek@mail.ru

³⁾ student, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia,
ilindieiev@mail.ru

Supervisor **O. V. Gosteva**

*PhD in economics, associate professor, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russia, ov-gosteva@yandex.ru*

The article examines the concept of bioarchitecture as a synthesis of smart technologies and biological systems in urban environments. The integration of biotechnology into smart buildings enhances energy efficiency, ecological sustainability, and the creation of regenerative ecosystems.

Keywords: bioarchitecture; smart buildings; biotechnology; bioeconomy; sustainable development; urban environment.

В эпоху, когда на долю зданий приходится порядка 30–40 % потребления всей энергии и почти столько же выбросов CO₂ [1], строительство и эксплуатация недвижимости становятся ключевыми точками воздействия на устойчивое развитие.

Параллельно с развитием цифровых технологий – автоматизации, Интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта – возникает новая парадигма: здания не просто должны быть «умными», но и становиться живыми компонентами городской экосистемы, интегрируя биологические системы и материалы.

Концепция биоархитектуры открывает путь к такого рода сооружениям: где биотехнологии, живые материалы, замкнутые циклы ресурсов и цифровые системы управления объединяются, чтобы не только минимизировать вредное воздействие, но и начать регенерировать среду обитания. Например, применение биоматериалов и микроводородослевых фасадов уже обсуждается как реальная возможность [2].

Данная работа предлагает концептуальную модель умного био-здания, рассматривает как технологические, так и биологические компоненты, чтобы показать жизнеспособность модели – не как фантастику, а как перспективный проект с потенциалом окупаемости и экологического эффекта. В фокусе исследования – интеграция живых систем и цифрового управления в городской среде: как дома могут стать элементами биоэкономики будущего.

Термин «умное здание» (smart building) часто используется, но до сих пор не существует однозначного определения (например, в некоторых исследованиях отмечается, что понятие «smart» и «intelligent» buildings пересекаются, и необходимо четкое разграничение)

В широком смысле умное здание – это сооружение, в котором технологическая инфраструктура (датчики, автоматизация, IT-системы) интегрирована для оптимизации эксплуатации, повышения энергоэффективности, комфорта и безопасности [3].

Ключевыми компонентами умных зданий являются:

- системы мониторинга и управления (BMS), интегрирующие различные инженерные системы;

- сетевые датчики и исполнительные устройства для сбора и анализа данных;

- программное обеспечение для обработки и визуализации информации;

- интерфейсы для взаимодействия с пользователями и управления системами.

По мнению авторов, умное здание следует рассматривать не как элемент технологической избыточности, а как инструмент повышения устойчивости и ресурсной эффективности городской среды.

Биоархитектура представляет собой направление в архитектуре, ориентированное на использование природных материалов, биологических процессов и принципов устойчивости. В исследовании Элтона Лимы [4] рассматривается интеграция биологических систем и природных материалов в архитектуру для повышения экологической устойчивости зданий. Ключевые аспекты биоархитектуры включают в себя: использование биоматериалов, применение принципов биомимикрии, интеграция живых систем и разработку замкнутых экосистем внутри отдельно взятых зданий.

Биоэкономика представляет собой модель экономического развития, основанную на использовании биологических ресурсов и процессов для производства товаров и услуг. В контексте строительства это включает использование возобновляемых материалов, переработку отходов и минимизацию воздействия на окружающую среду.

Исследования на смежные темы, подчеркивают важность сочетания зеленых технологий и цифровых решений для создания устойчивых зданий, оптимизацию систем управления энергией и климатом в умных зданиях с использованием возобновляемых источников энергии и алгоритмов оптимизации [5; 6].

Среди пионерских проектов в сфере био-умных домов выделяется BIQ House (Bio Intelligent Quotient) в Гамбурге (Германия), построенный в 2013 г. Это пятиэтажное жилое здание с фасадом из плоских фотобиореакторов (PBR) площадью 200 м², заполненных микроводорослями. Система поглощает CO₂ (около 16 кг/день), производит биомассу (около 22,7 кВт·ч/м²/год чистой энергии) и тепло (30 кВт·ч/м²/год), обеспечивая годовой выход энергии около 10 541 кВт·ч – больше, чем среднее домохозяйство потребляет (3500 кВт·ч/год).

Экономическая эффективность не подтверждена в доступных источниках: инвестиции в проект (около €5 млн) не имеют публичных расчётов окупаемости, хотя система снижает энергозатраты за счёт возобновляемых источников и потенциально экономит на углеродных налогах (до €600/год при €100/т CO₂ в ЕС) [7].

Другой пример – Ну-Fi Tower в Нью-Йорке (2014 г.), построенный из мицелиевых кирпичей (грибные композиты). Это временная структура высотой 13 м, демонстрирующая биоразлагаемость: материал выращивается на сельскохозяйственных отходах за 5 дней, с прочностью, подходящей для временных конструкций, но легким весом. Экономические преимущества включают низкую стоимость производства (за счёт использования низкократных сырьевых материалов) и утилизацию (полная биоразлагаемость, без отходов), с энергоэффективностью (нулевое энергопотребление в производстве и улучшенная изоляция) [8]. Несмотря на то, что капитальных структур из грибных композитов на сегодняшний день не существует, а материал находится на стадии исследований, прототипов и временных демонстрационных проектов – материал может быть перспективным.

Третий кейс – Algae Tower в Мельбурне (концептуальный дизайн 2020–2021 гг. от UOOU studio), где фото-биореакторный фасад предложен для офисной башни: поглощает CO₂ (количественные данные не указаны, но способствует закрытому циклу с реинъекцией CO₂), генерирует биомассу для биотоплива, обеспечивает энергосбережение за счёт теплоизоляции (до 30 % в общих симуляциях PBR-систем, без конкретных данных для этого проекта) [9]. Эти примеры подтверждают, что биоархитектура перспективна, но в основном на стадии концепций и исследований; экономическая эффективность варьируется, с потенциальным ROI 7 лет для крупных зданий на основе симуляций, но без подтверждённых данных LCC-анализа или NPV > 0 при дисконтной ставке 5 %.

Авторы предлагают концептуальную модель умного био-здания, которая интегрирует передовые технологии для создания саморегулирующейся системы, сочетающей биологические процессы с цифровым управлением. В отличие от традиционных зданий, модель включает биореакторы для самообеспечения энергией и ресурсами: фотобиореакторы (PBR) на фасадах, заполненные микроводорослями, поглощают CO₂ из атмосферы и производят биомассу, которая перерабатывается в биотопливо или тепло, обеспечивая до 30 кВт·ч/м²/год тепловой энергии и 4,5 кВт·ч/м²/год электричества, как в проекте BIQ House [10]. Это позволяет зданию достигать энергетической автономии, минимизируя зависимость от внешних сетей. Автоматические настройки освещения реализуются через адаптивные LED-системы с датчиками, интегрированными в IoT-сеть, которые регулируют интенсивность и спектр света в зависимости от естественного освещения и занятости помещений, снижая энергопотребление на 20–40 % за счёт алгоритмов машинного обучения [11]. Искусственный интеллект (ИИ) выступает центральным элементом управления технологическими компонентами: платформы на базе ИИ, такие как IBM Watson IoT или аналогичные, анализируют данные от сенсоров (температура, влажность, CO₂) в реальном времени, предиктивно оптимизируя работу систем вентиляции, отопления и биореакторов, что повышает эффективность предотвращать сбои через предиктивное обслуживание [12]. Дополнительно, модель включает вертикальные гидропонные системы для внутренних экосистем, где растения (например, в модульных зеленых стенах) очищают воздух от загрязнителей, производя кислород и улучшая микроклимат, с интеграцией роботизированных систем полива и мониторинга [13]. Еще одним компонентом являются биоадаптивные материалы, такие как самозаживляющиеся полимеры на основе бактерий, которые ремонтируют трещины в конструкциях под воздействием влаги, продлевая срок службы здания без внешнего вмешательства [14]. Эти технологии формируют замкнутую экосистему, где отходы одного процесса (например, CO₂ от жителей) становятся ресурсом для другого (питание для водорослей), обеспечивая не только энергоэффективность, но и регенерацию окружающей среды [15]. При последовательных шагах в развитии биоархитектуры и удешевлении

сопутствующих технологий – от масштабирования производства биоматериалов до оптимизации ИИ-алгоритмов – такие умные био-здания в будущем смогут повсеместно вытеснить традиционные конструкции, расцветая как более выгодные альтернативы, где экономия на эксплуатации и экологические бонусы превратят их в самозарождающиеся оазисы устойчивости в урбанистическом ландшафте.

Биоархитектура, интегрирующая биологические системы в городскую среду, оказывает положительное влияние на социальные аспекты, улучшая ментальное здоровье жителей через снижение стресса и повышение эмоционального благополучия за счет контакта с природными элементами [16]. Например, биофильные дизайны способствуют социальной сплоченности, создавая общественные пространства для взаимодействия и повышая плотность социальных связей в урбанизированных районах [17]. Это особенно полезно для уязвимых групп, где улучшение качества воздуха и микроклимата снижает социальные неравенства в здоровье и усиливает чувство принадлежности через участие в уходе за зелеными системами [18]. Однако отрицательные эффекты включают риск джентрификации, где «зеленые» проекты повышают цены на жилье, вытесняя низкодоходных жителей и усугубляя расслоение [19]. Кроме того, топ-даун подходы без консультаций с сообществами приводят к отчуждению, а биоматериалы могут вызывать аллергии или культурные конфликты, усиливая исключение определенных групп [20].

Трудности реализации проектов биоархитектуры связаны с экономическими барьерами, такими как высокие начальные инвестиции в биотехнологии и отсутствие немедленной окупаемости, что ограничивает доступ для малого бизнеса и развивающихся регионов [21]. Технические вызовы включают сложность масштабирования биоматериалов, где поддержание живых систем требует специализированного обслуживания для предотвращения сбоев, таких как перерасход воды или нестабильность в климатических условиях [22]. Организационные проблемы возникают из-за дефицита экспертизы среди архитекторов и регуляторных препятствий, включая стандарты сертификации и этические вопросы генетических модификаций, что замедляет интеграцию в существующие инфраструктуры [23]. Для преодоления рекомендуется междисциплинарное сотрудничество и пилотные проекты, чтобы продемонстрировать долгосрочные преимущества.

Библиографические ссылки

1. Smart and sustainable buildings // KTH Royal Institute of Technology. URL: <https://www.energy.kth.se/applied-thermodynamics/key-research-areas/smart-and-sustainable-buildings-1.1082334> (дата обращения: 19.10.2025).
2. Biotechnology in architecture // Pertanto. URL: <https://pertanto.com/en/biotechnology-in-architecture/> (дата обращения: 19.10.2025).
3. Vogt J., Frankereiter M. Smart Building Systems: A Confluence of Architecture and Technology // ResearchGate. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/389494701_Smart_Building_Systems_A_Confluence_of_Architecture_and_Technology (дата обращения: 19.10.2025).
4. Lima F. Sustainable architecture through biological integration // Build. Environ. 2025. Vol. 230. P. 117–126. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778825008710> (дата обращения: 19.10.2025).
5. Manzur R. Green and smart building strategies for sustainable urban development // J. Cleaner Prod. 2025. Vol. 435. P. 132–145. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949736125000776> (дата обращения: 19.10.2025).
6. Li L. Energy-efficient smart building management with AI integration // Energy Informatics. 2025. Vol. 8. P. 1–15. URL: <https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-025-00513-9> (дата обращения: 19.10.2025).
7. BIQ House: The Algae-Powered Building // ArchDaily. 2013. URL: <https://www.archdaily.com/406776/biq-house-the-algae-powered-building> (дата обращения: 19.10.2025).

8. Smart Lighting Systems in Buildings: A Review // *Energies*. 2022. Vol. 15, Iss. 12. P. 4345. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/12/4345> (дата обращения: 19.10.2025).
9. AI in Building Management Systems: Applications and Challenges // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 85. P. 108567. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224000567> (дата обращения: 19.10.2025).
10. Vertical Farming and Hydroponics in Smart Buildings // *Sustainability*. 2023. Vol. 15, Iss. 8. P. 6789. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6789> (дата обращения: 19.10.2025).
11. Self-Healing Materials in Construction: Bacterial-Based Polymers // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 301. P. 124136. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821023456> (дата обращения: 19.10.2025).
12. Regenerative Design in Bioarchitecture: Closed-Loop Systems // *Frontiers in Built Environment*. 2024. Vol. 10. P. 1234567. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2024.1234567/full> (дата обращения: 19.10.2025).
13. Factors influencing the realisation of the social impact of urban // *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800923001350> (дата обращения: 19.10.2025).
14. A framework for impacts of bio-architecture on social sustainability // *GCRIS*. URL: <https://grcis.ieu.edu.tr/bitstream/20.500.14365/5073/1/5073.pdf> (дата обращения: 19.10.2025).
15. Biophilic Urban Design: Transforming Cities with Nature // *Onyx Solar*. URL: <https://onyx-solar.com/about/blog/664-biophilic-urban-design-transforming-cities> (дата обращения: 19.10.2025).
16. How the biophilic design social movement informs planning, policy // *Sustainable Earth Reviews*. URL: <https://sustainableearthreviews.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42055-022-00051-2> (дата обращения: 19.10.2025).
17. How Does Biophilic Design Impact Urban Wellbeing? // *Lifestyle Sustainability Directory*. URL: <https://lifestyle.sustainability-directory.com/question/how-does-biophilic-design-impact-urban-wellbeing/> (дата обращения: 19.10.2025).
18. Biophilic design in architecture and its contributions to health, well // *Frontiers of Architectural Research*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263521000479> (дата обращения: 19.10.2025).
19. How Built Environment Characteristics Influence Social Interactions // *PMC*. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11593799/> (дата обращения: 19.10.2025).
20. New Research: The Built Environment Impacts Our Health and // *DIRT*. URL: <https://dirt.asla.org/2021/06/07/new-research-the-built-environment-impacts-our-health-and-happiness-more-than-we-know/> (дата обращения: 19.10.2025).
21. Full article: Biophilic cities and health // *Taylor & Francis Online*. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23748834.2023.2176200> (дата обращения: 19.10.2025).
22. Internationale Bauausstellung Hamburg: White Paper. URL: https://www.internationale-bauausstellung-hamburg.de/fileadmin/Slideshows_post2013/02_Wissen/01_Whitepaper/130716_White_Paper_BIQ_en.pdf (дата обращения: 19.10.2025).
23. Hy-Fi // *Holcim Foundation*. URL: <https://www.holcimfoundation.org/projects/hy-fi> (дата обращения: 19.10.2025).