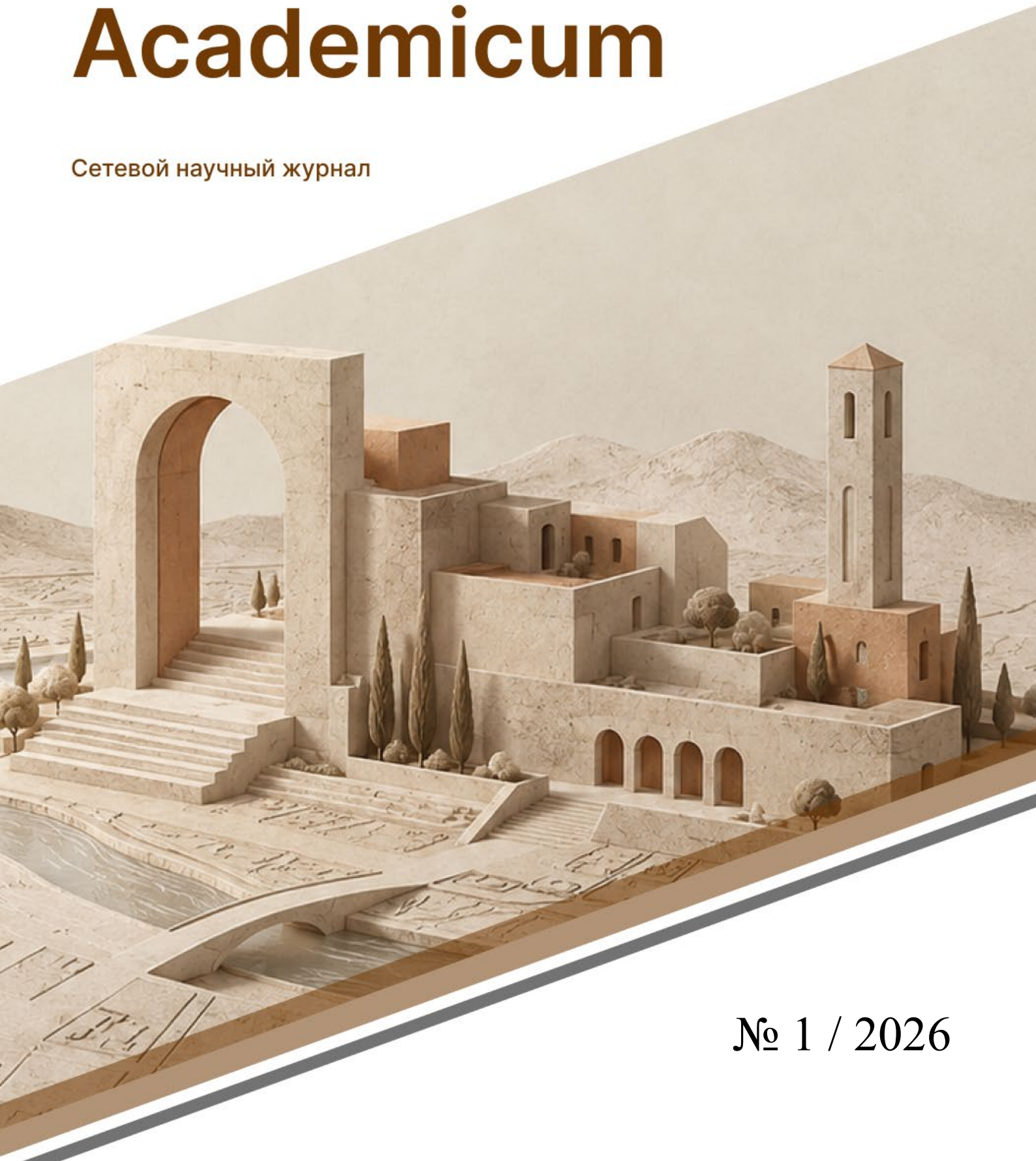
https://fundareview.ru/

Fundamentum Academicum

Сетевой научный журнал



№ 1 / 2026

Главный редактор журнала:
Овчинников Игорь Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения», Тюменский индустриальный университет, Россия, Тюмень.

Заместитель главного редактора: Куровская Наталья Анатольевна, генеральный директор ООО «Академия Науки и Образования», Донецк, Российская Федерация.

Члены редакционной коллегии:

Алсус Мухаммад Махди, кандидат технических наук, кафедра архитектуры, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Анпилов Сергей Михайлович, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных конструкций кафедры ЖБК, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Новосибирск.

Батаева Петимат Денаевна, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова РАН, Россия, Грозный.

Большакова Полина Владимировна, кандидат технических наук, кафедра технологии и организации строительного производства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Власов Денис Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Галишникова Вера Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура, реставрация и дизайн», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Гогина Екатерина Григорьевна, кандидат технических наук, кафедра архитектуры и градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Зильберова Инна Юрьевна, доктор технических наук, доцент кафедры «Городское строительство и хозяйство», Донской государственный технический университет, Россия, Ростов-на-Дону.

Ильичев Вячеслав Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Российская академия архитектуры и строительных наук, Россия, Москва.

Киевский Илья Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры, Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт организации, механизации и технической помощи строительству, Россия, Москва.

Киевский Леонид Владимирович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Научно-проектный центр «Развитие города», Россия, Москва.

Козлова Анастасия Юрьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Технологии и организация строительного производства», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Коротич Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры архитектуры, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, Екатеринбург.

Котков Роман Васильевич, кандидат технических наук, кафедра технологии и организации строительства, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Новосибирск.

Леоненко Кирилл Алексеевич, кандидат технических наук, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Казань.

Лисицына Александра Владиславовна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры архитектурного проектирования, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Нижний Новгород.

Маилян Вадим Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, кафедра инженерно-строительных дисциплин, Южный федеральный университет, Россия, Ростов-на-Дону.

Метленков Николай Фёдорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура», Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Михальченко Олег Юрьевич, доктор технических наук, профессор, кафедра технологии и организации строительства, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Новосибирск.

Назыпова Светлана Викторовна, кандидат технических наук, кафедра технологии и организации строительного производства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Попов Евгений Владимирович, профессор, профессор кафедры инженерной графики и информационного моделирования, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, Нижний Новгород.

Салмо Али, кандидат технических наук, кафедра градостроительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Москва.

Шеина Светлана Георгиевна, доктор технических наук, профессор, кафедра «Городское строительство и хозяйство», Донской государственный технический университет, Россия, Ростов-на-Дону.

Шипилова Наталья Анатольевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии, организации, экономики строительства и управления недвижимостью, Кубанский государственный технологический университет, Россия, Краснодар.

Шубенков Михаил Валерьевич, доктор архитектуры, профессор, заведующий кафедрой, Московский архитектурный институт, Россия, Москва.

Югов Анатолий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и организации строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, Макеевка.

Учредитель и издатель:
ООО «АКАДЕМИЯ НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ»
Адрес учредителя: 283086, Донецкая Народная Республика, г. о. Донецк, г. Донецк, ул. Артема, д. 41, ком. 306в.
ИНН: 9303040432
КПП: 930301001
ОГРН: 1259300002103
Телефон: +7(909)679-60-04
Сайт: https://fundareview.ru/

Регистрационный номер СМИ: Эл № ФС77-92142 выдан 25.08.2026 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Издатель: Куровская Наталья Анатольевна, Генеральный директор ООО «АНО».
Адрес издателя: г. Москва.

© Fundamentum Academicum, 2026 г.
Периодичность 4 раза в год.

В ЖУРНАЛЕ ПУБЛИКУЮТСЯ СТАТЬИ ПО СЛЕДУЮЩИМ НАУЧНЫМ СПЕЦИАЛЬНОСТЯМ:
2.1.7. «Технология и организация строительства (технические науки)»
2.1.12. «Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки)»
2.1.13. «Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)»

ПОРЯДОК РАССМОТРЕНИЯ СТАТЕЙ

Все представленные рукописи первоначально проверяются редакцией на соответствие тематике журнала и проводят проверку на оригинальность (с использованием соответствующих программно-аппаратных комплексов). Прошедшие этот этап статьи передаются на анонимное рецензирование членам редакционной коллегии или привлеченным

внешним экспертам. При условии получения положительных рецензий без замечаний по существу исследования статья принимается к публикации, включается в редакционный портфель и размещается в очередном номере журнала.

Научный журнал «Fundamentum Academicum» занимается публикацией научно-практических исследований в соответствии с номенклатурой научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени.

Наш журнал стремится сделать процесс публикации максимально удобным для авторов, поэтому допускает различные варианты оформления библиографических ссылок и списка литературы.

Список источников оформляется по ГОСТ 7.0.5-2008 и приводится в конце статьи под заголовком «Список источников». При этом допускаются следующие форматы библиографических ссылок:

- Внутритекстовые ссылки (по стандарту APA)
- Подстрочные ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)
- Затекстовые ссылки (по ГОСТ 7.0.5-2008)

Мы предоставляем авторам гибкость в оформлении, чтобы минимизировать бюрократические барьеры и сосредоточиться на содержании научного исследования. Главное — единообразие внутри самой статьи.

ПЛАТА ЗА ПУБЛИКАЦИЮ

Редакция не взимает с авторов плату за подготовку, размещение или печать материалов.

При использовании опубликованных материалов журнала ссылка на «Fundamentum Academicum» обязательна.

Полная или частичная перепечатка материалов допускается только по письменному разрешению авторов статей или редакции.

Точка зрения редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов публикаций.

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

Chief Editor:
Ovchinnikov Igor Georgievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Highways, Bridges and Transport Structures, Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia.

Deputy Chief Editor: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, General Director of "Academy of Science and Education" LLC, Donetsk, Russian Federation

Editorial Board:

Alsus Mukhammad Makhdi, PhD in Technical Sciences, Department of Architecture, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Anpilov Sergei Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher at the Testing Center for Building Structures of the Department of Reinforced Concrete Structures, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia.

Bataeva Petimat Denaevna, PhD in Technical Sciences, Junior Researcher, Kh. I. Ibragimov Complex Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Grozny, Russia.

Bolshakova Polina Vladimirovna, PhD in Technical Sciences, Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Vlasov Denis Nikolaevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Urban Planning, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Galishnikova Vera Vladimirovna, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Restoration and Design, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Gogina Ekaterina Grigorevna, PhD in Technical Sciences, Department of Architecture and Urban Planning, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Zilberova Inna Iurevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Urban Construction and Municipal Services, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Ilichev Viacheslav Aleksandrovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Moscow, Russia.

Kievskii Ilia Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department, Central Research and Design Institute of Organization, Mechanization and Technical Assistance to Construction, Moscow, Russia.

Kievskii Leonid Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Research and Design Center "Urban Development", Moscow, Russia.

Kozlova Anastasiia Iurevna, PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Korotich Andrei Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.

Kotkov Roman Vasilevich, PhD in Technical Sciences, Department of Construction Technology and Organization, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia.

Leonenko Kirill Alekseevich, PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia.

Lisitsyna Aleksandra Vladislavovna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Architectural Design, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia.

Mailian Vadim Dmitrievich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Civil Engineering Disciplines, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia.

Metlenkov Nikolai Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Mikhalchenko Oleg Iurevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Construction Technology and Organization, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, Russia.

Nazypova Svetlana Viktorovna, PhD in Technical Sciences, Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Popov Evgenii Vladimirovich, Professor, Professor of the Department of Engineering Graphics and Information Modeling, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia.

Salmo Ali, PhD in Technical Sciences, Department of Urban Planning, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia.

Sheina Svetlana Georgievna, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Urban Construction and Municipal Services, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia.

Shipilova Natalia Anatolevna, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Construction Technology, Organization, Economics and Real Estate Management, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia.

Shubenkov Mikhail Valerevich, Doctor of Architecture, Professor, Head of the Department, Moscow Architectural Institute, Moscow, Russia.

Iugov Anatolii Mikhailovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Technology and Organization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Makeyevka, Russia.

Founder and publisher:
LLC "ACADEMY OF SCIENCE AND EDUCATION"
Founder's address: 41 Artem str., room 306b, Donetsk city, Donetsk People's Republic, 283086.
INN: 9303040432
KPP: 930301001
OGRN: 1259300002103
Phone: +7 (909)679-60-04
Website: https://fundareview.ru/

Media registration number: El No. FS77-92142 issued on 25.08.2026 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor)

Publisher: Kurovskaya Natalia Anatolyevna, CEO of ANO LLC.
Publisher's address: Moscow
© Fundamentum Academicum, 2026 г.
The frequency is 4 times a year.

THE JOURNAL PUBLISHES ARTICLES ON THE FOLLOWING SCIENTIFIC SPECIALTIES:
2.1.7. "Technology and organization of construction (technical sciences) "
2.1.12. "Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity" (technical sciences)
2.1.13. "Urban planning, planning of rural settlements (technical sciences)"

PROCEDURE FOR REVIEWING ARTICLES

All submitted manuscripts are initially checked by the editorial staff for compliance with the journal's subject matter and checked for originality (using appropriate software and hardware systems). Articles that have passed this stage are submitted for anonymous review to members of the editorial board or external experts involved. Subject to receiving positive reviews without comments on the research substance, the article is accepted for publication, included in the editorial portfolio and placed in the next issue of the journal.

The scientific journal "Fundamentum Academicum" publishes scientific and practical research in accordance with the nomenclature of scientific specialties for which academic degrees are awarded.

Our journal strives to make the publication process as convenient as possible for authors, so it allows for various design options for bibliographic references and references.

The list of sources is drawn up in accordance with GOST 7.0.5-2008 and is given at the end of the article under the heading "List of sources". The following formats of bibliographic references are allowed:

- Intra-text links (according to the APA standard)
- Footnotes (according to GOST 7.0.5-2008)
- Non-text links (according to GOST 7.0.5-2008)

We provide authors with flexibility in design to minimize red tape and focus on the content of their research. The main thing is uniformity within the article itself.

PUBLICATION FEE

The editorial board does not charge authors a fee for the preparation, placement or printing of materials.

When using published journal materials, a link to "Fundamentum Academicum" is required.

Full or partial reprint of materials is allowed only with the written permission of the authors of the articles or the editorial board.

The editors 'point of view does not always coincide with the authors' point of view.

ОГЛАВЛЕНИЕ

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки)..... 10

Сопилов В. В., Амелин П.А. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ БЕТОНА ПРИ ЗИМНЕМ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВЕ: АНАЛИЗ РЕЖИМОВ И ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ПРОЧНОСТИ..... 10

Рябчевский И.С., Бредихина Н.В. СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ LEAN CONSTRUCTION И BIM ДЛЯ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ..... 26

2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки)..... 50

Вязникова Е.А. ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ФАСАДОВ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНСОЛЯЦИИ..... 50

Дужевский И.А. АРХИТЕКТУРНО-ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АДАПТАЦИИ ИСТОРИЧЕСКИХ ЭЛЕВАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ 66

Чепурная Л.А., Магдеев Р.Г. ОЦЕНКА ВОСПРИЯТИЯ ГЕОМЕТРИИ ИНТЕРЬЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ..... 83

Поликевич К.Б., Павлов Я.Д. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДУЛЬНЫХ ЖИЛЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА..... 105

Вишневская Ю.А. АНАЛИЗ ИНСОЛЯЦИИ И ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ МНОГОСВЕТНЫХ АТРИУМОВ..... 122

2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)..... 135

Мушарапов Д.Р. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО ТЕПЛОВОГО ОСТРОВА И ОЦЕНКА СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ЗЕЛЁНО-ГОЛУБОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ..... 135

Сагайдак Д.А., Танчук П.В. ВАРИАНТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОБНОВЛЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ..... 151

2.1.7. Технология и организация строительства (технические науки)

Научная статья

УДК 69.057.3:693.548

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ БЕТОНА ПРИ ЗИМНЕМ ЭЛЕКТРОПРОГРЕВЕ: АНАЛИЗ РЕЖИМОВ И ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ПРОЧНОСТИ

Сопилов Валерий Вячеславович, кандидат технических наук, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, Архангельск, vvs_arkhangelsk@inbox.ru;

Амелин Павел Андреевич, кандидат технических наук, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, Белгород, amelin.p.a@yandex.ru

Аннотация. Возведение монолитных конструкций в условиях отрицательных температур требует точного управления тепловыми процессами для предотвращения преждевременного замерзания воды затворения. Авторы выполнили комплексное исследование технологии электропрогрева бетона проводом ПНСВ на примере плиты перекрытия толщиной 200 мм при температуре наружного воздуха минус 20 °С. Теплотехнический расчет проведен методом конечных элементов в программной среде ELCUT с учетом тепловыделения при гидратации цемента и теплопотерь через опалубку при конвективном теплообмене с окружающим воздухом. Натурные испытания и ультразвуковой контроль показали, что фактические температурно-временные характеристики твердения отличаются от расчетных из-за влияния тепловых мостиков и фактической влажности утеплителя. Для повышения точности прогнозирования распалубочной прочности исследователи обосновали эмпирический поправочный коэффициент в диапазоне от 0,08 до 0,13. Разработанная схема ступенчатого изменения напряжения на трансформаторе позволяет поддерживать разность температур между центром плиты и ее

поверхностью в пределах 20 °С и предотвращать образование микротрещин. Сравнительная оценка показала, что оптимизированный режим электропрогрева обеспечивает достижение 70 % проектной прочности за 72 часа, способствует долговечности железобетона и сокращает сроки строительства по сравнению с пассивными методами и применением химических добавок.

Ключевые слова: зимнее бетонирование; электропрогрев бетона; провод ПНСВ; теплотехническое моделирование; метод конечных элементов; температурный градиент; метод зрелости; энергоэффективность.

Original article

TEMPERATURE CONTROL OF CONCRETE DURING WINTER ELECTRIC HEATING: ANALYSIS OF MODES AND ACHIEVING THE REQUIRED STRENGTH

Sopilov Valerii Viacheslavovich, Candidate of Technical Sciences, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia, vvs_arkhangelsk@inbox.ru;

Amelin Pavel Andreevich, Candidate of Technical Sciences, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, amelin.p.a@yandex.ru

Abstract. Erecting monolithic structures in subzero temperatures requires precise thermal management to prevent premature freezing of the mixing water. The authors conducted a comprehensive study of concrete electric heating technology using PNSV cable, using a 200 mm thick floor slab at an outside air temperature of -20°C as an example. Thermal calculations were performed using the finite element method in the ELCUT software environment, taking into account the actual exothermic properties of the cement stone and convective heat loss through the formwork contours. Field tests and ultrasonic testing showed that the actual temperature-time characteristics of curing differ from the calculated ones due to the influence of thermal bridges and the actual moisture content of the insulation. To improve the accuracy of predicting

stripping strength, the researchers substantiated an empirical correction factor in the range of 0.08 to 0.13. The developed step-by-step voltage supply scheme for the transformer equipment allows maintaining the temperature gradient within 20°C and eliminating the risk of microcracking. A comparative assessment confirmed that the optimized electric heating mode ensures that 70% of the design strength is achieved within 72 hours, ensuring the durability of reinforced concrete and reducing the overall construction cycle compared to passive methods and chemical modification of the mixture.

Keywords: winter concreting; electric heating of concrete; PNSV conductor; heat engineering modeling; finite element method; temperature gradient; maturity method; energy efficiency.

Введение. Возведение монолитных железобетонных конструкций в условиях отрицательных температур окружающей среды остается неотъемлемой частью современного строительного производства, особенно в регионах с резко континентальным климатом. Ключевая технологическая сложность данного процесса заключается в необходимости предотвращения преждевременного замерзания воды [1]. При переходе в твердую фазу лед увеличивает свой объем почти на десять процентов, что неизбежно приводит к разрушению формирующейся кристаллической решетки цементного камня и существенному снижению итоговых прочностных характеристик материала. Чтобы бетон достиг критической прочности до замерзания, применяют методы тепловой обработки и химические добавки с учетом климатических условий и особенностей конструкции [2], [3].

Для зимнего бетонирования традиционно применяют метод термоса, противоморозные добавки и комбинированные технологии. Метод термоса, сохраняющий тепло экзотермической реакции гидратации за счет тщательного утепления опалубки, эффективен для массивных конструкций с низким модулем поверхности. Введение химических добавок, понижающих температуру

замерзания поровой жидкости, действительно позволяет вести работы при морозе, однако зачастую сопровождается заметным замедлением темпов твердения [4], [5]. На практике это означает, что распалубку приходится откладывать на длительный срок, что не согласуется с современными темпами возведения зданий и требованиями к сокращению циклов строительства.

Указанные ограничения классических технологий обусловили широкое распространение методов искусственного подогрева, среди которых особое место занимает электропрогрев бетона с помощью закладываемых нагревательных проводов. В отличие от метода термоса, электротермообработка позволяет регулировать режим прогрева бетона [6]. Специалисты получают возможность целенаправленно компенсировать теплопотери в окружающую среду, поддерживая внутри массива именно тот температурный режим, который необходим для оптимального протекания физико-химических реакций. Закладка проводов непосредственно в тело конструкции обеспечивает равномерный прогрев по всему сечению элемента, что критически важно для тонкостенных конструкций, таких как стены, колонны и перекрытия [7].

Однако электропрогрев без контроля температуры приводит к избыточным энергозатратам и повышает риск локального перегрева или недостаточного прогрева бетона. Стандартные схемы подачи напряжения, не учитывающие динамику изменения погодных условий и фактическую толщину прогреваемого элемента, часто оказываются неэффективными [8], [9]. Именно поэтому актуальной научной и практической задачей становится разработка систем управления параметрами электротермообработки. Для этого необходимо моделировать распределение температуры в конструкции, чтобы на стадии проектирования подобрать напряжение на трансформаторе с учетом температуры бетона и воздуха, а также продолжительности выдержки и тем самым снизить энергозатраты и обеспечить требуемое качество железобетонных конструкций.

Обзор литературы. Возведение монолитных железобетонных

конструкций в условиях отрицательных температур требует применения специальных технологических приемов, направленных на предотвращение преждевременного замерзания воды затворения. Традиционные методы, такие как метод термоса или использование противоморозных добавок, при температуре наружного воздуха ниже минус 15 °С для тонкостенных конструкций оказываются недостаточно эффективными. Метод термоса не компенсирует значительные теплопотери через опалубку, а химические добавки, снижая температуру замерзания поровой жидкости, существенно замедляют твердение бетона и увеличивают сроки до распалубки. В связи с этим для конструкций с модулем поверхности от 4 до 10 $м^{-1}$, к которым относятся плиты перекрытия и стены, наиболее рациональным признан электропрогрев с использованием закладываемых нагревательных проводов [10].

Анализ нормативной базы и современных исследований показывает, что на практике параметры электротермообработки зачастую принимаются эмпирически, без учета реальной динамики погоды и теплофизических свойств конкретной опалубки. Работы отечественных и зарубежных исследователей, в частности С.В. Леонтьева, А.А. Талейко и Б. Апшикура, доказывают, что стандартные схемы подачи напряжения не учитывают неравномерность прогрева и приводят к локальным перегревам или, напротив, недогреву бетона [11-13]. Перегрев токоведущей жилы свыше 100 °С вызывает кипение воды в прилегающей зоне и разрушение структуры цементного камня, а недостаточный нагрев не позволяет достичь критической прочности в заданные сроки [14]. Таким образом, необходимо разработать режим электропрогрева с учетом нескольких критериев на основе численного моделирования и проверить его в натурных испытаниях.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выбрана монолитная плита перекрытия размером 6×6 м и толщиной 200 мм. Бетонирование велось в климатических условиях с расчетной температурой наружного воздуха минус 20 °С. Для формирования конструкции применялся

бетон класса В30 на портландцементе ЦЕМ I 42,5Н с расходом цемента 350 кг/м³. Армирование выполнено стержнями класса А500С диаметром 12 мм с шагом 150 мм.

В качестве источника тепла использовался провод ПНСВ (в международной классификации SHWPI - Steel Heating Wire with Polyethylene Insulation [15]) диаметром токонесущей жилы 1,2 мм. Провода укладывались непосредственно в тело конструкции с шагом 150 мм, что обеспечивало равномерное распределение тепла при удельной мощности 35 Вт/пог. м. Питание осуществлялось от понижающих трансформаторов ТОПДЗ с дискретным переключением ступеней напряжения (55, 65, 75, 85 В).

Теплотехнический расчет выполнялся методом конечных элементов в программном комплексе ELCUT с использованием модуля WinConcrete. Математическая модель включала нестационарное уравнение теплопроводности и учитывала зависимость тепловыделения при гидратации цемента от времени и температуры. Граничные условия включали конвективный теплообмен через деревянную щитовую опалубку и слой утеплителя из экструдированного пенополистирола толщиной 100 мм.

Критерием оптимизации являлась минимизация удельных энергозатрат при достижении к моменту распалубки прочности не менее 50 % (критическая прочность для плит по СП 70.13330.2012). С учетом требований к долговечности и морозостойкости в суровом климате целевое значение было повышено до 70 % проектной прочности (R28) за 72 часа. Жестким ограничением служило соблюдение температурного градиента $\Delta T \leq 20$ °С между центром массива и его поверхностью, а также скорости остывания не более 5 °С/ч для предотвращения термических трещин.

Для оценки прочности бетона по температуре и продолжительности твердения применялся метод зрелости, откалиброванный по результатам собственных экспериментов. Контроль качества в натурных условиях осуществлялся ультразвуковым методом (прибор UKS-MG4) и путем

разрушающих испытаний кубиков-свидетелей, твердевших в идентичных термо-влажностных условиях.

Результаты исследования и их обсуждение. Численное моделирование температурного поля монолитной плиты выявило неоднородность распределения тепла между центральными и периферийными участками конструкции. Наибольшая интенсивность прогрева наблюдалась во внутренних зонах, тогда как участки, прилегающие к опалубке и наружным граням, характеризовались повышенными теплопотерями. Для ограничения температурного градиента между отдельными зонами конструкции рассматривалась ступенчатая схема изменения напряжения электропрогрева. В представленных расчётных данных значение напряжения 65 В соответствует контрольным отметкам 12 и 24 ч, тогда как на последующих стадиях предусмотрено снижение напряжения до 55 В. К завершению 72-часового периода нагревательное оборудование отключалось. Таким образом, временной график электропрогрева характеризуется последовательным изменением напряжения в соответствии с представленной схемой мониторинга, а не ограничением начального режима 65 В исключительно первыми шестью часами (таблица 1).

Таблица 1 - Схема мониторинга и результаты теплотехнического моделирования

Зона контроля	Координаты датчика	Расчетная Tmax, °C	Фактическая Tmax, °C	Отклонение, %	Расчетная прочность на 72 ч, %	Фактическая прочность на 72 ч, %
1 (Центр)	3.0; 3.0	42.5	38.1	-10.4	74	68
2 (Середина ребра)	3.0; 0.5	35.0	31.4	-10.2	65	59
3 (Угол)	0.5; 0.5	28.5	25.2	-11.5	54	48
4 (Поверхность)	3.0; 3.0 (верх)	24.0	21.5	-10.4	48	43

Источник: разработано авторами.

Анализ данных таблицы 1 показывает, что фактические температуры в среднем на 10-11 % ниже расчетных. Это расхождение обусловлено неучтенными в базовой модели тепловыми мостиками через металлические элементы крепления опалубки и фактической влажностью утеплителя. Для

корректировки прогноза прочности нами введен поправочный коэффициент в диапазоне 0,08–0,13, что позволило точно предсказать момент достижения распалубочной прочности.

Технологический процесс включал следующие последовательно выполняемые операции. После монтажа арматурного каркаса выполнялась раскладка проводов ПНСВ с фиксацией к арматуре вязальной проволокой через каждые 500 мм. Особое внимание уделялось изоляции мест соединения токоведущих жил с монтажными проводами. Подключение к трансформаторам производилось через распределительные щиты, оснащенные автоматическими выключателями. Температуру контролировали с помощью термопар, установленных в восьми точках по высоте и площади сечения плиты. Во время остывания напряжение на трансформаторе постепенно снижали, а после отключения питания плита оставалась утепленной до завершения предусмотренного технологией периода остывания. Зона прогрева ограждалась, а все электрооборудование заземлялось в соответствии с требованиями безопасности.

Экспериментальная оценка температурно-прочностного режима проводилась на фрагменте монолитной плиты в натурных условиях. Регистрация температуры осуществлялась в восьми контрольных точках с интервалом 2 ч. Сопоставление результатов температурного мониторинга и испытаний контрольных образцов выявило неоднородность набора прочности по сечению конструкции. К завершению 72-часового периода относительная прочность бетона составила 68 % от R28 в центральной зоне, 59 % в средней части ребра, 48 % в угловой зоне и 43 % в приповерхностном участке. Следовательно, принятый целевой показатель 70 % от R28 не был достигнут ни в одной из указанных контрольных зон. Полученные результаты подтверждают необходимость определения продолжительности электропрогрева и условий последующего охлаждения с ориентацией на наиболее неблагоприятные участки конструкции, поскольку усреднение прочностных характеристик не

обеспечивает выполнения заданного критерия в каждой контролируемой зоне (таблица 2).

Таблица 2 - Динамика набора прочности и температурный режим (сводные данные натурных испытаний)

Время, ч	Напряжение на трансформаторе, В	Средняя температура бетона, °С	Средняя прочность (ультразвук), МПа	Прочность, % от R28
0	0	+8,0	0	0
12	65	+22,5	4,5	15
24	65	+31,0	11,2	37
36	55	+34,5	16,8	56
48	55 (откл.)	+33,0	20,1	67
72	0 (остывание)	+18,5	21,0	70

Источник: разработано авторами.

Важнейшим аспектом исследования стала оценка энергоэффективности. Удельные энергозатраты на прогрев 1 м³ бетона составили 145 кВт·ч. Для объективного сравнения были смоделированы альтернативные сценарии при неизменных исходных данных (геометрия плиты, температура минус 20 °С, состав смеси) (таблица 3).

Таблица 3 - Сравнительная оценка методов зимнего бетонирования для плиты 200 мм при -20 °С

Метод бетонирования	Время до распалубки (достижения 50% прочности), сут.	Удельные энергозатраты / расход хим. добавок	Риск снижения конечной прочности (R28)
Метод термоса (утепление 100 мм)	> 14 сут. (не достигается критическая прочность до замерзания)	0 кВт·ч	Высокий (промерзание периферии, потеря до 30% прочности)
Противоморозные добавки (нитрат кальция)	7-10 сут.	12 кг/м³ добавки	Средний (замедление твердения, возможная коррозия арматуры)
Электропрогрев ПНСВ (оптимизированный режим)	3 сут. (72 часа)	145 кВт·ч/м³	Низкий (контролируемый набор прочности, отсутствие градиентных трещин)

Источник: разработано авторами.

Сравнение показывает, что метод термоса для тонкостенных плит при минус 20 °С неприменим, так как бетон не успевает набрать критическую

прочность и подвергается разрушению при замерзании. Использование противоморозных добавок позволяет вести работы, но увеличивает сроки распалубки до 7-10 суток, что нарушает ритмичность строительства и требует дополнительных затрат на химикаты, несущие в себе риски коррозии арматуры. Оптимизированный электропрогрев, несмотря на затраты электроэнергии, сокращает сроки оборота опалубки и обеспечивает достижение проектных показателей качества железобетона [16].

Выводы. Выполненный комплекс исследований доказывает, что переход от эмпирического подбора параметров электротермообработки к научно обоснованному управлению тепловым состоянием монолитных конструкций требует неразрывной связи численного моделирования и натурных измерений. Традиционный подход, опирающийся исключительно на усредненные нормативные таблицы, неизбежно приводит к локальным перегревам или, напротив, критическому недогреву бетона в условиях резко континентального климата. Совместное использование конечно-элементного анализа и данных натурных измерений позволяет описать распределение температуры в конструкции с учетом теплопотерь через опалубку и тепловыделения при гидратации цемента. Этим предлагаемая методика отличается от упрощенных инженерных расчетов.

Наиболее значимым прикладным достижением работы становится разработка и внедрение поправочного коэффициента в метод зрелости, компенсирующего расхождения между идеализированной расчетной моделью и фактическими условиями твердения. Выявленное отклонение фактических температурно-временных характеристик от прогнозируемых значений обусловлено наличием тепловых мостиков, фактической влажностью утеплителя и неоднородностью укладки бетонной смеси. Использование эмпирического поправочного коэффициента в диапазоне от 0,08 до 0,13 повышает точность прогнозирования распалубочной прочности и позволяет определять сроки демонтажа опалубки без риска повреждения бетона.

Предложенная схема ступенчатого изменения напряжения на трансформаторе позволяет ограничивать перепады температуры и связанные с ними термические напряжения в тонкостенных элементах. Постепенное изменение мощности с учетом температуры окружающего воздуха и температуры внутри конструкции позволяет поддерживать заданный перепад температур. Такой технологический подход не только исключает риск микротрещинообразования, но и обеспечивает равномерное формирование цементного камня по всему сечению элемента, что критически важно для обеспечения долговечности и морозостойкости железобетонных конструкций при их последующей эксплуатации.

Оценка экономической целесообразности показывает, что затраты на электроэнергию при оптимизированном электропрогреве компенсируются сокращением сроков строительства и снижением риска брака. Отказ от пассивных методов утепления в пользу управляемого нагрева при низких температурах воздуха предотвращает преждевременное замерзание воды затворения и гарантирует достижение проектных показателей надежности. Дальнейшее развитие данного направления видится в адаптации полученных математических зависимостей для создания полуавтоматических систем диспетчеризации, способных в реальном времени корректировать режимы работы трансформаторных подстанций на основе сигналов распределенных термодатчиков, что откроет новые возможности для цифровизации технологий зимнего бетонирования.

Список литературы

1. Кузьмин Е. О., Нелюбова В. В., Володченко А. Н. Прогнозируемая прочность цементного камня с добавкой нанодисперсного кремнезема // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2024. — Т. 9, № 10. — С. 17–24. — DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24.

2. Xia W., Cui S.-A., Zhu L.-X., Li W.-K., Ju J.-W. W., Wang X.-W. Effects of

nano-silica modification on early age hydration process in winter construction of tunnel engineering // Construction and Building Materials. — 2023. — Vol. 408. — Art. 133804. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133804.

3. Fang Y., Zhang L., Li L., Zhao M., Wang Q. Preparation of Nano-Sized C-S-H and Its Acceleration Mechanism on Portland Cement Hydration at Different Temperatures // Materials. — 2023. — Vol. 16, No. 9. — Art. 3484. — DOI: 10.3390/ma16093484.

4. Исаченко С. Л. Деструктивные явления при некачественном прогреве монолитных железобетонных конструкций // Умные композиты в строительстве. — 2024. — № 2. — С. 8–19. — DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-8-19.

5. He Y., Zhang M., Li W., Li M., Zhang S., Deng G., Wang X. Electric Heating Curing Regimes of Temperature Self-Controlled Concrete with Nano-Carbon Black for Performance Improvement in Cold Regions // Cement and Concrete Composites. — 2024. — Vol. 152. — Art. 105689. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105689.

6. Пикус Г. А. Шаг нагревательных проводов при электропрогреве бетона // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». — 2025. — Т. 25, № 1. — С. 42–49. — DOI: 10.14529/build250105.

7. Li L., Wang C., Zhao Z., Dang L., He R. Hydration Behavior and Micro-Pore Structural of Portland Cement Composites with Crystalline Nano-SiO_2 at Low Temperature // Journal of Building Engineering. — 2024. — Vol. 98. — Art. 111276. — DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111276.

8. Yasien A. M., Bassuoni M. T., Ghazy A. Phase Change Material Nanocomposites as an Internal Curing Aid for Nano-Modified Concrete under Cold Weather // Construction and Building Materials. — 2024. — Vol. 411. — Art. 134490. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134490.

9. Wang C., Zhang M., Pei W., Lai Y., Dai J., Xue Y., Sun J. Frost Resistance of Concrete Mixed with Nano-Silica in Severely Cold Regions // Cold Regions Science and Technology. — 2024. — Vol. 217. — Art. 104038. — DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.104038.

10. Verma P., Chowdhury R., Chakrabarti A. Early Strength Development of Cement Composites Using Nano-Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) Based Hardening Accelerator // Materials Today: Proceedings. — 2023. — Vol. 93, Pt. 3. — P. 91–98. — DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.028.

11. Bai S., Yu L., Guan X., Li H. Experimental Study on the Effect of Nano-SiO_2 on Long-Term Properties of Negative-Temperature Cement Paste // Cement and Concrete Composites. — 2025. — Vol. 157. — Art. 105916. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105916.

12. Liu C.-Z., Li C.-Q., Chen D., Fan S.-Z., Zhang Q.-L. Effect of Nano-Silica on Concrete Properties under Low-Temperature Environment // Science Technology and Engineering. — 2025. — Vol. 25, No. 9. — P. 3813–3820. — DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2403638.

13. He Y., Li W., Zhang M., Li S., Li M., Tian D., Deng G., Sarmah A. K. Automated Electric Heating and Curing System for Concrete in Actual Cold Environments Based on the Internet of Things // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 489. — Art. 142344. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142344.

14. Bai S., Wu Y., Feng W., Duan J., Cui L., Yu L., Guan X. Effect of Nano-Silica on Hydration and Microstructure of Early-Age Cement Pastes Subjected to Frost Exposure // Construction and Building Materials. — 2026. — Vol. 537. — Art. 147106. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.147106.

15. He Y., Li M., Jiang X., Li W., Zhang M., Tian D., Deng G., Lv T., Sarmah A. K. Collaborative Electric Heating and Curing as a Novel Approach to Improve the Performance of Adjacent Heterogeneous Concrete in Natural Low-Temperature Environments // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 501. — Art. 144294. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144294.

16. Zhang G., Lei Y., Zhang J., Qin L. Enhancing Portland Cement Performance with Nano-SiO_2 for Low-Carbon Winter Construction at Negative Temperature // Case Studies in Construction Materials. — 2026. — Vol. 24. — Art. e05899. — DOI: 10.1016/j.cscm.2026.e05899.

References

1. Kuz`min E. O., Nelyubova V. V., Volodchenko A. N. Prognoziruemaya prochnost` cementnogo kamnya s dobavkoj nanodispersnogo kremnezema // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuxova. — 2024. — T. 9, № 10. — S. 17–24. — DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-17-24.

2. Xia W., Cui S.-A., Zhu L.-X., Li W.-K., Ju J.-W. W., Wang X.-W. Effects of nano-silica modification on early age hydration process in winter construction of tunnel engineering // Construction and Building Materials. — 2023. — Vol. 408. — Art. 133804. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133804.

3. Fang Y., Zhang L., Li L., Zhao M., Wang Q. Preparation of Nano-Sized C-S-H and Its Acceleration Mechanism on Portland Cement Hydration at Different Temperatures // Materials. — 2023. — Vol. 16, No. 9. — Art. 3484. — DOI: 10.3390/ma16093484.

4. Isachenko S. L. Destruktivny`e yavleniya pri nekachestvennom progreve monolitny`x zhelezobetonny`x konstrukcij // Umny`e kompozity` v stroitel`stve. — 2024. — № 2. — S. 8–19. — DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-8-19.

5. He Y., Zhang M., Li W., Li M., Zhang S., Deng G., Wang X. Electric Heating Curing Regimes of Temperature Self-Controlled Concrete with Nano-Carbon Black for Performance Improvement in Cold Regions // Cement and Concrete Composites. — 2024. — Vol. 152. — Art. 105689. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105689.

6. Pikus G. A. Shag nagrevatel`ny`x provodov pri e`lektroprogreve betona // Vestnik YuUrGU. Seriya «Stroitel`stvo i arxitektura». — 2025. — T. 25, № 1. — S. 42–49. — DOI: 10.14529/build250105.

7. Li L., Wang C., Zhao Z., Dang L., He R. Hydration Behavior and Micro-Pore Structural of Portland Cement Composites with Crystalline Nano-SiO_2 at Low Temperature // Journal of Building Engineering. — 2024. — Vol. 98. — Art. 111276. — DOI: 10.1016/j.jobe.2024.111276.

8. Yasien A. M., Bassuoni M. T., Ghazy A. Phase Change Material Nanocomposites as an Internal Curing Aid for Nano-Modified Concrete under Cold Weather // Construction and Building Materials. — 2024. — Vol. 411. — Art. 134490. — DOI:

10.1016/j.conbuildmat.2023.134490.

9. Wang C., Zhang M., Pei W., Lai Y., Dai J., Xue Y., Sun J. Frost Resistance of Concrete Mixed with Nano-Silica in Severely Cold Regions // Cold Regions Science and Technology. — 2024. — Vol. 217. — Art. 104038. — DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.104038.

10. Verma P., Chowdhury R., Chakrabarti A. Early Strength Development of Cement Composites Using Nano-Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) Based Hardening Accelerator // Materials Today: Proceedings. — 2023. — Vol. 93, Pt. 3. — P. 91–98. — DOI: 10.1016/j.matpr.2023.07.028.

11. Bai S., Yu L., Guan X., Li H. Experimental Study on the Effect of Nano-SiO_2 on Long-Term Properties of Negative-Temperature Cement Paste // Cement and Concrete Composites. — 2025. — Vol. 157. — Art. 105916. — DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2024.105916.

12. Liu C.-Z., Li C.-Q., Chen D., Fan S.-Z., Zhang Q.-L. Effect of Nano-Silica on Concrete Properties under Low-Temperature Environment // Science Technology and Engineering. — 2025. — Vol. 25, No. 9. — P. 3813–3820. — DOI: 10.12404/j.issn.1671-1815.2403638.

13. He Y., Li W., Zhang M., Li S., Li M., Tian D., Deng G., Sarmah A. K. Automated Electric Heating and Curing System for Concrete in Actual Cold Environments Based on the Internet of Things // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 489. — Art. 142344. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142344.

14. Bai S., Wu Y., Feng W., Duan J., Cui L., Yu L., Guan X. Effect of Nano-Silica on Hydration and Microstructure of Early-Age Cement Pastes Subjected to Frost Exposure // Construction and Building Materials. — 2026. — Vol. 537. — Art. 147106. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2026.147106.

15. He Y., Li M., Jiang X., Li W., Zhang M., Tian D., Deng G., Lv T., Sarmah A. K. Collaborative Electric Heating and Curing as a Novel Approach to Improve the Performance of Adjacent Heterogeneous Concrete in Natural Low-Temperature Environments // Construction and Building Materials. — 2025. — Vol. 501. — Art.

144294. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144294.

16. Zhang G., Lei Y., Zhang J., Qin L. Enhancing Portland Cement Performance with Nano-SiO_2 for Low-Carbon Winter Construction at Negative Temperature // Case Studies in Construction Materials. — 2026. — Vol. 24. — Art. e05899. — DOI: 10.1016/j.cscm.2026.e05899.

Статья поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 10.03.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 26.01.2026; approved after peer review 10.03.2026; accepted for publication 28.08.2026.

Научная статья

УДК 69.053:004.9

СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ LEAN CONSTRUCTION И BIM ДЛЯ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ НА СТРОИТЕЛЬНОЙ ПЛОЩАДКЕ

Рябчевский Игорь Сергеевич, кандидат технических наук, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия, Белгород, ryabchevskii57@mail.ru;

Бредихина Наталья Владимировна, кандидат технических наук, Юго-Западный государственный университет, Россия, Курск, bredikhina.natalia@yandex.ru

Аннотация. В современной строительной индустрии неэффективная внутриплощадочная логистика и формирование избыточных страховых запасов остаются критическими источниками финансовых потерь и снижения темпов возведения объектов. Целью исследования выступает разработка методического подхода к интеграции философии бережливого строительства (Lean Construction) и технологий информационного моделирования зданий (BIM) для оптимизации материальных потоков. В работе применены методы системного анализа, 4D/5D-моделирования и аппарат теории управления запасами. Обоснована возможность перехода от традиционной «выталкивающей» схемы снабжения к «вытягивающей» системе поставок за счет извлечения точных количественных, геометрических и временных параметров напрямую из BIM-модели. Установлено, что связка параметрической модели с алгоритмами метода «Канбан» и инструментами картирования потока создания ценности позволяет автоматизировать формирование заявок поставщикам, сократить до 30% площади временных складов и устранить простои монтажных бригад. Кроме того, пространственная визуализация логистических маршрутов и зон разгрузки в среде BIM минимизирует коллизии при движении строительной техники. Практическая значимость работы заключается в формировании концептуальной

базы для создания цифрового двойника логистики стройплощадки, обеспечивающего прозрачность цепочек поставок на всех этапах, сокращение непроизводительных потерь и повышение общей рентабельности строительных проектов.

Ключевые слова: бережливое строительство, информационное моделирование зданий, материальные потоки, логистика строительной площадки, 4D-моделирование, цифровой двойник, картирование потока создания ценности.

Original article

LEAN CONSTRUCTION AND BIM COMBINED TO ANALYZE MATERIAL FLOWS ON A CONSTRUCTION SITE

Riabchevskii Igor Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia, ryabchevskii57@mail.ru;

Bredikhina Natalia Vladimirovna, Candidate of Technical Sciences, Southwest State University, Kursk, Russia, bredikhina.natalia@yandex.ru

Abstract. In today's construction industry, inefficient on-site logistics and excess safety stock remain critical sources of financial losses and reduced construction rates. This study aims to develop a methodological approach to integrating Lean Construction philosophy and Building Information Modeling (BIM) technologies to optimize material flows. The study utilizes systems analysis, 4D/5D modeling, and inventory management theory. The feasibility of transitioning from a traditional "push" supply chain to a "pull" supply chain is substantiated by extracting precise quantitative, geometric, and time parameters directly from the BIM model. It has been established that combining a parametric model with Kanban algorithms and value stream mapping tools enables automated supplier requisition generation, a 30% reduction in temporary warehouse space, and the elimination of installation crew downtime. Furthermore,

spatial visualization of logistics routes and unloading zones within a BIM environment minimizes collisions during construction equipment movement. The practical significance of this work lies in the formation of a conceptual basis for the creation of a digital twin of construction site logistics, ensuring the transparency of supply chains at all stages, reducing unproductive losses and increasing the overall profitability of construction projects.

Keywords: Lean construction, building information modeling, material flows, construction site logistics, 4D modeling, digital twin, value stream mapping.

Актуальность и значимость исследования. Строительство остаётся одной из отраслей материального производства, в которых производительность труда имеет тенденцию к снижению. По данным, обобщённым Центром интегрированного проектирования сооружений при Стэнфордском университете, индекс выработки в строительном секторе США за период 1964-2009 гг. сократился приблизительно на 10%, тогда как в остальных отраслях, не относящихся к сельскому хозяйству, аналогичный показатель более чем удвоился [1]. Выраженное расхождение невозможно объяснить спецификой единичного производства или рассредоточенностью рабочих фронтов; значительная часть отставания обусловлена системными дефектами в организации материально-технического снабжения, внутриплощадочного перемещения ресурсов и координации смежных исполнителей. Исследование, выполненное Национальным институтом стандартов и технологий, зафиксировало, что только потери, порождённые недостаточной информационной совместимостью участников инвестиционно-строительного цикла, составили в 2002 году 15,8 млрд долл., из которых около двух третей легли на владельцев и эксплуатантов объектов [2]. Приведённые оценки, хотя и получены для американского рынка в предыдущих временных периодах, отражают проблему, воспроизводящуюся в любой национальной строительной системе с фрагментированной цепочкой поставок и слабой интеграцией

проектных, производственных и логистических решений.

Внутриплощадочная логистика - тот сегмент строительного процесса, где перечисленные дефекты проявляются с наибольшей остротой. Материальные ресурсы, поступающие на объект от множества поставщиков и субподрядных организаций, как правило, складируются без учёта последовательности монтажных операций, повторно перемещаются по территории, повреждаются при хранении и ожидают разгрузки дольше, чем это необходимо с технологической точки зрения. До 30% продолжительности типовой строительной операции приходится на перемещение, ожидание и контроль, а непосредственное преобразование материала занимает существенно меньшую долю рабочего времени [3]. Диспропорция между операциями, создающими ценность, и вспомогательными операциями производственного цикла указывает на наличие значительного резерва, использование которого требует совершенствования организации потоков.

Концепция бережливого строительства, сформировавшаяся в результате адаптации производственной системы Toyota к условиям строительной площадки, опирается на систему взаимосвязанных принципов. Выделяют пять базовых принципов:

1) определение ценности с позиции конечного потребителя;

2) выделение потока создания ценности;

3) обеспечение непрерывности потока;

4) организация вытягивания;

5) стремление к совершенству [4].

В строительстве эти положения реализуются через ряд управленческих механизмов. Особое место среди них занимает система последнего планировщика, позволяющая фильтровать задания, передаваемые производственным бригадам, по критерию готовности и тем самым предотвращать простои работников из-за отсутствия материалов, необходимого доступа или завершённых предшествующих операций [5]. Для материальных

потоков на площадке поставка каждой партии ресурсов увязывается с фактическим состоянием работ и подтверждённой потребностью конкретной бригады.

Вместе с тем реализация вытягивающей схемы снабжения наталкивается на ограничение: для принятия обоснованных решений о моменте и объёме поставки исполнителю необходима достоверная, актуальная и наглядная информация о пространственном расположении конструкций, о последовательности предстоящих операций и о наличии смежных ресурсов. Двухмерные чертежи, табличные ведомости объёмов, текстовые спецификации такую информацию предоставляют фрагментарно и с существенным временным лагом. Любое изменение проектного решения, не отражённое одновременно во всех комплектах документации, порождает каскад несогласованностей, которые обнаруживаются на этапе монтажа и влекут за собой внеплановые перемещения материалов, возврат партий поставщику и простои кранового оборудования. Исследование, проведённое среди производителей сборных железобетонных изделий, показало, что затраты на устранение ошибок, вызванных рассогласованием чертежей, составляют в среднем 0,46% общей стоимости проекта, что применительно к крупным объектам может достигать сумм, сопоставимых с годовой прибылью предприятия [6].

Информационное моделирование зданий устраняет причину рассогласований, заменяя множественность разрозненных графических представлений единой параметрической моделью, в которой каждый конструктивный элемент описан геометрически, атрибутивно и топологически. Как подчёркивают исследователи, ключевое отличие модели от чертежа состоит в вычислимости данных, поскольку объект несёт в себе информацию о материале, массе, стоимости, привязке к пространственным осям и связях с соседними элементами, что делает возможным автоматизированное извлечение ведомостей объёмов, формирование спецификаций для закупки и генерацию заданий для станков с числовым программным управлением без

промежуточного ручного ввода [7]. Потребность в арматуре определённого профиля, фасонном прокате или конкретном типе инженерного оборудования может быть определена непосредственно из модели на любой стадии детализации проекта, причём при внесении корректировок пересчёт происходит практически мгновенно.

Особое значение для управления материальными потоками приобретает четвёртое измерение модели - привязка конструктивных элементов к операциям календарного плана. Четырёхмерное моделирование, реализуемое средствами типа Navisworks Simulate, Synchro Professional или Vico Constructor, позволяет визуализировать последовательность возведения здания с точностью до рабочей смены и обнаружить пространственно-временные коллизии, которые на графике Ганта остаются невидимыми. Планировщик получает возможность оценить, не перекрывает ли зона складирования металлоконструкций путь движения башенного крана на следующей неделе, достаточно ли места для разгрузки сборной плиты в стеснённых условиях городской застройки, совпадает ли график поставки инженерного оборудования с готовностью помещений для его монтажа. Опыт применения четырёхмерных моделей на объекте One Island East в Гонконге показал, что детальное моделирование цикла возведения типового этажа позволило подтвердить безопасность и выполнимость четырёхдневного монтажного цикла, заблаговременно скорректировать последовательность операций и тем самым предотвратить потенциальные задержки [8]. Аналогичные результаты зафиксированы при строительстве моста Крууселли в Хельсинки, где подрядная организация Skanska использовала привязку элементов модели к задачам производственного планирования для координации поставок металлоконструкций, опалубки и арматуры в условиях ограниченной площадки [9].

Расширение модели до пятого измерения (присоединение стоимостных данных к элементам и операциям) открывает дополнительную возможность для синхронизации финансовых и материальных потоков. Пятимерная модель

позволяет в режиме, близком к реальному времени, отслеживать соответствие между объёмом выполненных работ, стоимостью потреблённых ресурсов и контрактными обязательствами, что актуально для организации поставок по схеме «точно в срок». На проекте медицинского центра Sutter Health в Кастро-Вэлли оценка стоимости на основе модели выполнялась каждые две недели, обеспечивая проектной команде обратную связь о влиянии каждого проектного решения на бюджет ещё до заказа соответствующих материалов [9].

Вопрос о том, каким образом функциональные возможности информационного моделирования соотносятся с принципами бережливого производства, был предметом анализа, выполненного В.С. Кустовым и А.Г. Дмитриевым [5]. Сопоставление восемнадцати функциональных аспектов BIM с двадцатью четырьмя принципами Lean Construction выявило 56 уникальных взаимодействий, из которых 52 носят конструктивный характер и 4 могут быть квалифицированы как нейтральные либо потенциально негативные [5]. Наиболее насыщенными по числу положительных связей оказались принципы снижения вариабельности продукции и производственного процесса, сокращения длительности производственных циклов, а также визуализации производственных методов. Среди функциональных возможностей BIM наибольшую поддержку принципам бережливости оказывают средства эстетической и функциональной оценки проекта, многопользовательского просмотра объединённых междисциплинарных моделей, четырёхмерной визуализации календарных графиков и оперативной передачи продуктовой и процессной информации участникам строительства. Полученная матрица взаимодействий показывает взаимодополняемость двух подходов: BIM обеспечивает информационную основу для реализации многих принципов Lean Construction, а Lean Construction определяет цели, для достижения которых используются возможности информационного моделирования.

Авторы руководства CIRIA C725, обобщившие опыт внедрения на объектах Министерства юстиции Великобритании, компании Skanska,

подрядных организаций Balfour Beatty и Costain, выделяют четыре механизма, посредством которых информационное моделирование и бережливое производство взаимно усиливают друг друга [10]. BIM непосредственно способствует достижению целей Lean: автоматическое обнаружение пространственных коллизий до начала монтажа исключает переделки, которые в традиционной практике поглощают значительную часть рабочего времени. Модель служит средством обеспечения бережливых процедур, например, визуализация последовательности операций в ходе совещаний по системе последнего планировщика существенно повышает точность оценки готовности заданий. Кроме того, вспомогательные информационные системы, построенные на базе модели (оценка стоимости, расчёт углеродного следа, формирование заявок на закупку), вносят прямой вклад в сокращение потерь. Дисциплина бережливого производства, с её акцентом на предсказуемость, стандартизацию и непрерывное совершенствование, облегчает освоение модельных технологий персоналом, не имеющим устойчивых навыков работы с параметрическими средами.

Для оптимизации именно материальных потоков на стройплощадке модель, дополненная временным и стоимостным измерениями, позволяет перейти от реактивного управления поставками, при котором заявка на материал формируется постфактум, к планированию, основанному на подтверждённой потребности и подтверждённой готовности фронта работ. Субподрядные организации, получая доступ к координированной модели, заблаговременно определяют объёмы и сроки поставки, сокращая резерв времени, который закладывается в договорные обязательства для компенсации неопределённости. Подрядчик, в свою очередь, приобретает инструмент для балансировки загрузки складских площадей, кранового оборудования и транспортных подъездов, поскольку модель отображает не только геометрию конструкций, но и динамику их появления на объекте. Опыт проекта Sutter Health показал, что раннее вовлечение субподрядчиков в совместную детализацию модели инженерных

систем позволило перенести значительную долю сборочных операций в заводские условия, сократив объём сварочных и монтажных работ непосредственно на площадке и, соответственно, уменьшив потребность в складировании трубных заготовок, фасонных деталей и крепёжных элементов в стеснённых условиях больничного кампуса [9].

С учётом изложенного настоящее исследование направлено на разработку методических положений по совместному применению инструментария бережливого строительства и четырёх-пятимерного информационного моделирования для упорядочения внутриплощадочных материальных потоков. Актуальность постановки задачи определяется тем, что, несмотря на существующую академическую литературу по каждому из названных направлений в отдельности, работ, целенаправленно исследующих механизмы их сопряжения применительно к логистике конкретной строительной площадки, по-прежнему, немного. Авторы руководства CIRIA C725 указывают на дефицит эмпирических данных, которые могли бы количественно оценить вклад совместного использования Lean и BIM в сокращение времени ожидания материалов, объёма вторичных перемещений и потерь от повреждения конструкций при хранении [11]. Восполнение данного пробела требует как теоретического осмысления структуры взаимодействия двух концепций, так и экспериментальной проверки предлагаемых организационных решений на реальных объектах с фиксацией показателей производственного цикла.

Степень разработанности проблемы исследования. Вопросы организации внутриплощадочных материальных потоков рассматривались в работах авторов, которые в рамках производственной теории строительства (TFV-концепция) обосновали, что значительная доля продолжительности типовой строительной операции расходуется на перемещение, ожидание и контроль, а непосредственное преобразование материала занимает существенно меньшую часть рабочего времени [3]. Исследователи, развивая аппарат теории очередей применительно к производственным системам, показали, что

вариабельность поступления заявок на обслуживание увеличивает среднее время пребывания единицы продукции в системе и объём незавершённого производства [12]. Перенесённые в строительство, эти положения объясняют, почему нерегулярность поставок материалов на площадку порождает каскадные задержки монтажных операций и вынужденные простои кранового оборудования.

В.С. Кустов и А.Г. Дмитриев, выполнившие систематическое сопоставление 18 функциональных аспектов информационного моделирования с 24 предписывающими принципами бережливого производства, зафиксировали пятьдесят шесть уникальных взаимодействий, из которых 52 носят конструктивный характер [5]. Наибольшая плотность положительных связей обнаружена для принципов снижения вариабельности продукции и производственного процесса, сокращения длительности циклов, а также визуализации производственных методов. Среди функциональных возможностей BIM наибольшее число принципов поддерживают средства четырёхмерной визуализации календарных графиков, многопользовательского просмотра объединённых междисциплинарных моделей и оперативной передачи продуктовой и процессной информации участникам строительства. Авторы руководства CIRIA C725 выделяют четыре механизма, посредством которых информационное моделирование и бережливое производство взаимно усиливают друг друга: прямое содействие достижению целей Lean, обеспечение бережливых процедур, вклад вспомогательных информационных систем в сокращение потерь и, наконец, дисциплина бережливого производства как фактор, облегчающий освоение модельных технологий [10].

Вместе с тем прикладных исследований, в которых теоретический аппарат и агентное имитационное моделирование применялись бы к оптимизации внутриплощадочной логистики на конкретном объекте с верификацией по фактическим данным календарного плана, в литературе обнаружено немного. Указано, что четырёхмерное моделирование выявляет пространственно-

временные коллизии, с его помощью можно планировать последовательность операций, однако количественная оценка влияния выявленных коллизий на продолжительность простоев техники и объём вторичных перемещений материалов остаётся задачей, требующей отдельного методического обеспечения [9]. Необходима фильтрация заданий по критерию готовности, что применительно к материальным потокам означает увязку поставки каждой партии ресурсов с подтверждённым состоянием комплекса работ [13]. Тем не менее, формализация этой увязки в виде вычислительного алгоритма, пригодного для интеграции в параметрическую модель здания, до настоящего времени не предложена.

Проводимое исследование направлено на восполнение указанного пробела. Его цель состоит в разработке и экспериментальной проверке алгоритма пространственно-временной оптимизации внутриплощадочных материальных потоков, сочетающего средства теории массового обслуживания, агентного имитационного моделирования и параметрического информационного моделирования зданий.

Материалы и методы исследования. Экспериментальная база исследования - шестнадцатиэтажный монолитный жилой дом с двухуровневым подземным паркингом, возводимый в условиях плотной городской застройки. Общая площадь здания составляет 14 820 м², конструктивная схема - монолитный железобетонный каркас с шагом колонн 6,0 × 6,0 м, толщина перекрытий 200 мм. На площадке одновременно работают два башенных крана: КБ-408 с грузовым моментом 160 т·м и вылетом стрелы 30 м, а также Liebherr 132 EC-H8 с грузовым моментом 132 т·м и вылетом 60 м. Зона складирования арматуры, опалубки и инженерного оборудования расположена вдоль восточной границы участка на расстоянии 42 м от оси первого крана и 58 м от оси второго. Подъезд автотранспорта осуществляется по единственному проезду шириной 6 м с северо-западной стороны.

Фактический календарный план возведения надземной части,

предоставленный генподрядной организацией, содержит 312 операций с указанием дат начала и завершения, объёмов потребляемых материалов, а также зафиксированных журналом производства работ простоев техники. Среднесуточная продолжительность вынужденных простоев кранов за период возведения типового этажа составила 1,8 ч для первого крана и 2,3 ч для второго. Число случаев двойного перемещения материалов (разгрузка в промежуточную зону с последующей повторной строповкой и подачей к месту монтажа) достигало в среднем 4,2 случая на один этаж. Указанные показатели приняты в качестве базового сценария для последующего сравнения.

Разработанный алгоритм опирается на представление внутриплощадочной логистической системы как сети массового обслуживания с несколькими параллельными каналами (кранами) и ограниченной ёмкостью накопителей (зон складирования и промежуточных площадок). Поступление заявок на перемещение материала моделируется пуассоновским потоком с интенсивностью λ, определяемой темпом потребления ресурсов монтажными бригадами. Обслуживание одной заявки краном характеризуется случайной длительностью с общим распределением, что соответствует модели M/G/c. Среднее время ожидания в очереди W_q вычисляется по обобщённой формуле Поллачека - Хинчина с поправкой на конечную ёмкость площадки складирования (Hopp, Spearman, 1996).

Агентная составляющая алгоритма реализована в среде AnyLogic, где каждый участник логистического процесса представлен автономным агентом с собственным набором правил поведения. Агенты подразделяются на четыре категории: поставщики материалов, генерирующие заявки на разгрузку с заданным распределением межзаявочных интервалов; крановые операторы, выбирающие очередность обслуживания согласно приоритетному правилу; монтажные бригады, формирующие потребность в материале в соответствии с четырёхмерной моделью возведения; и логистический координатор, реализующий вытягивающий принцип системы последнего планировщика.

Координатор принимает решение о подаче материала к месту монтажа при выполнении трёх условий: комплекс работ подтверждён как готовый, предшествующая операция завершена, свободная ёмкость зоны временного хранения достаточна для приёма партии.

Последовательность шагов алгоритма представлена на рисунке 1. Параметрическая модель здания разработана в среде Autodesk Revit Structure с последующим экспортом в формат IFC для интеграции с Navisworks Simulate и AnyLogic. Каждый конструктивный элемент модели несёт атрибуты массы, габаритов, принадлежности к захватке и привязки к операции календарного плана, что соответствует требованиям четырёхмерного моделирования [9]. Логистические маршруты смоделированы как параметрические кривые, привязанные к координатной сетке площадки и ограниченные допустимыми зонами перемещения. Зоны складирования представлены объёмными объектами с атрибутами вместимости (в поддонах или кубических метрах) и пропускной способности (число операций разгрузки в смену). Работа башенных кранов описана наборами параметров: грузоподъёмность на данном вылете, время цикла строповки, продолжительность поворота и изменения вылета, а также зоны обслуживания, определяемые углом поворота стрелы.

В Navisworks Simulate выполнена привязка элементов модели к задачам календарного плана Primavera P6, чтобы воспроизвести последовательность возведения с точностью до рабочей смены. Временные атрибуты задач синхронизированы с агентной моделью AnyLogic через экспорт таблицы операций в формате CSV, содержащей идентификатор элемента, массу, координаты места монтажа, номер крана и временное окно подачи.

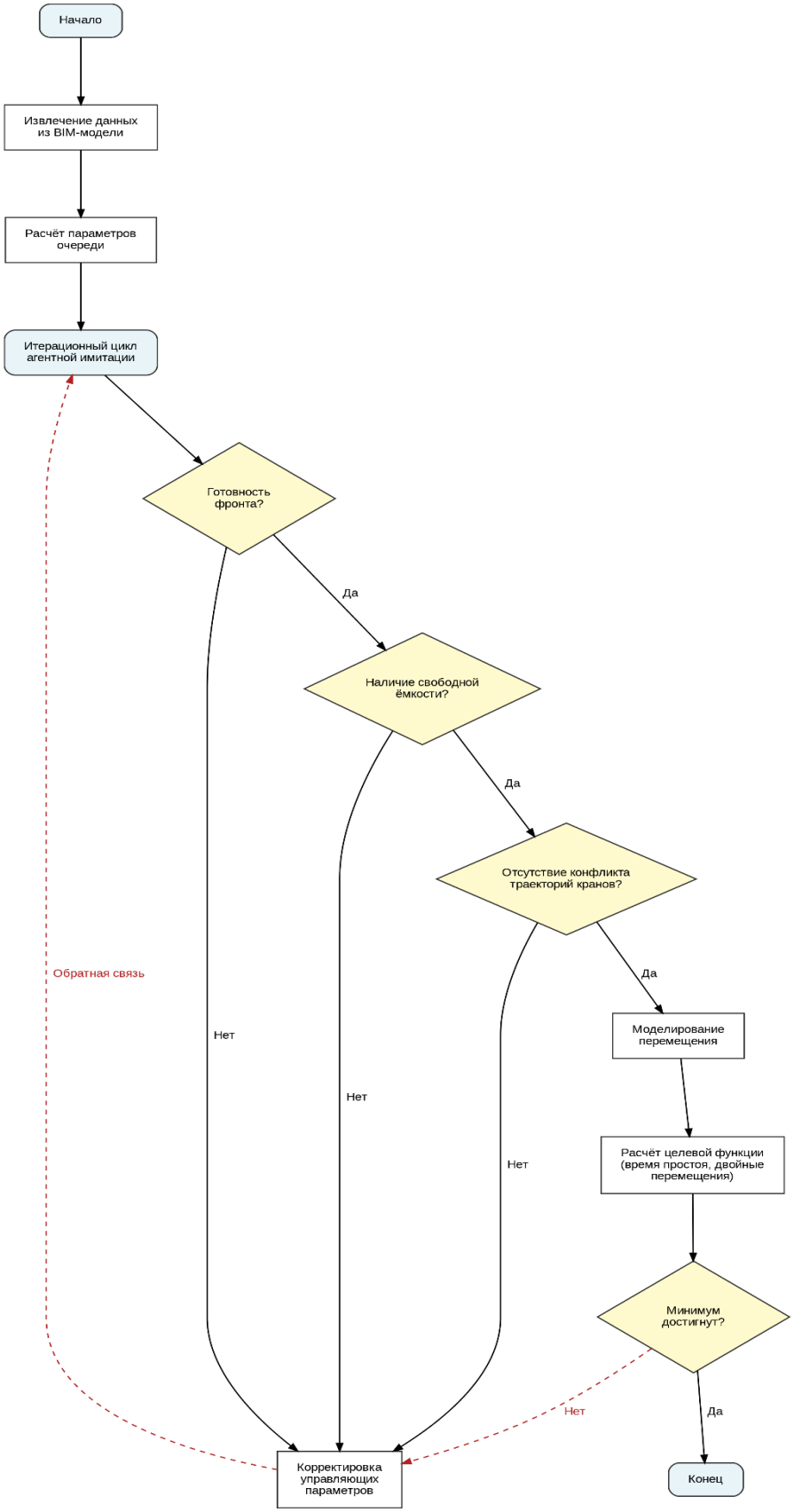


Рисунок 1 - Алгоритм пространственно-временной оптимизации внутриплощадочных материальных потоков (источник: разработано авторами)

Имитационное моделирование проведено в два этапа. На первом этапе воспроизведён базовый сценарий, соответствующий фактическому календарному плану: заявки на поставку материалов формируются согласно утверждённому графику без учёта фактической готовности работ, разгрузка производится в единственную зону складирования, а выбор крана осуществляется по фиксированному закреплению захваток. На втором этапе реализован оптимизированный сценарий, в котором момент подачи каждой партии определяется координатором по результатам проверки условий вытягивания, зона складирования разделена на три подсектора с адресным хранением, а назначение крана выполняется динамически на основе минимизации суммарного времени цикла. Продолжительность имитации для каждого сценария составила 96 рабочих смен (восемь типовых этажей по двенадцать смен). Число повторных прогонов - 30 для каждого сценария с целью получения устойчивых средних значений и доверительных интервалов при уровне значимости 0,05 (таблица 1).

Таблица 1 - Структура вычислительного эксперимента и варьируемые факторы

Фактор	Базовый сценарий	Оптимизированный сценарий	Обоснование выбора
Принцип формирования заявки на подачу материала	По календарному графику за 1 смену до монтажа	По сигналу координатора при подтверждении готовности фронта	Принцип вытягивания
Число и ёмкость зон складирования	1 зона, 120 поддонов	3 подсектора по 45 поддонов каждый	Снижение вариабельности времени поиска и подачи
Назначение крана	Фиксированное по захваткам	Динамическое по минимуму времени цикла	Сокращение длительности производственных циклов
Разрешение конфликтов траекторий	Ручное, по факту возникновения	Автоматическое, агентное, с опережающим расчётом	Четырёхмерная визуализация
Учёт погодных ограничений	Постфактум, остановка работ	Проактивное смещение временных окон поставки	Снижение вариабельности потока

Источник: разработано авторами.

Оптимизированный сценарий отличается от базового комплексной перестройкой логики управления потоками от момента инициирования поставки до способа разрешения пространственных конфликтов. Каждый из варьируемых факторов обоснован принципами бережливого строительства или функциональными возможностями информационного моделирования, что обеспечивает теоретическую обоснованность плана вычислительного эксперимента.

Результаты исследования. Сравнительный анализ двух сценариев выполнен по трём группам показателей: временные характеристики работы кранового оборудования, объём вторичных перемещений материалов и суммарная продолжительность цикла возведения типового этажа. Средние значения, полученные по итогам тридцати прогонов каждого сценария, сведены в таблицу 2.

Таблица 2 - Сравнительные показатели базового и оптимизированного сценариев (средние значения по 30 прогонам)

Показатель	Базовый сценарий	Оптимизированный сценарий	Относительное изменение, %
Среднесуточный простой крана КБ-408, ч	1,80	0,94	-47,8
Среднесуточный простой крана Liebherr 132 EC-H8, ч	2,30	1,12	-51,3
Число двойных перемещений на этаж, ед.	4,2	1,1	-73,8
Средняя длительность ожидания разгрузки, мин	34,5	12,7	-63,2
Продолжительность цикла типового этажа, смен	12,0	10,4	-13,3
Доля операций, начатых при неполной готовности фронта, %	22,6	4,8	−78,8

Источник: разработано авторами.

Переход к вытягивающему принципу в сочетании с динамическим назначением кранов обеспечивает сокращение среднесуточных простоев техники почти вдвое. Уменьшение числа двойных перемещений на 73,8% объясняется адресным размещением материалов в трёх подсекторах зоны складирования и устранением необходимости промежуточной укладки партий,

поступивших ранее срока фактической потребности. Снижение доли операций, начатых при неполной готовности фронта, до 4,8% соответствует требованию системы последнего планировщика о фильтрации заданий по критерию готовности [13] и подтверждает, что алгоритм координатора эффективно предотвращает преждевременную подачу ресурсов (рисунок 2).

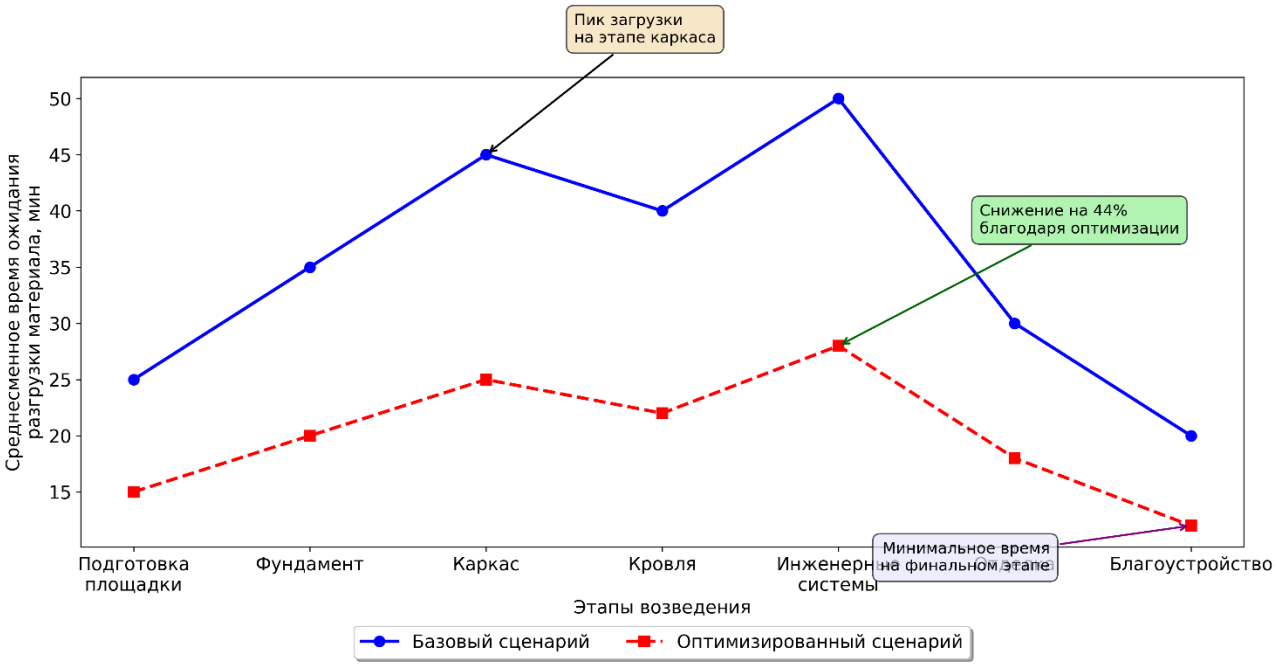


Рисунок 2 - Динамика среднесменного времени ожидания разгрузки материала по этапам возведения (источник: разработано авторами)

В базовом сценарии время ожидания разгрузки демонстрирует выраженную тенденцию к росту от этажа к этажу, достигая 41 мин на восьмом этаже, тогда как в оптимизированном сценарии данный показатель остаётся в диапазоне 10-15 мин на протяжении всего эксперимента. Нарастание ожидания в базовом варианте обусловлено тем, что по мере увеличения высоты здания время кранового цикла возрастает, а выталкивающая логика снабжения продолжает направлять партии материала с прежней интенсивностью, не учитывая возросшую загрузку кранов. Координатор в оптимизированном сценарии компенсирует этот эффект, смещая временные окна поставки и перераспределяя заявки между двумя кранами.

Наибольшее сокращение вторичных перемещений достигнуто для арматурных каркасов и опалубочных щитов - номенклатурных групп с

наибольшей массой и габаритами, повторная строповка которых требует значительных затрат машинного времени. Для инженерного оборудования и мелкоштучных материалов эффект менее выражен, что объясняется их малой массой и возможностью размещения в непосредственной близости от места монтажа без использования крана. Тем не менее, суммарное снижение числа двойных перемещений по всем группам составляет 3,1 случая на этаж, что в пересчёте на среднюю продолжительность одной повторной строповки (18 мин) даёт экономию 55,8 мин машинного времени на каждый типовой этаж.

Верификация результатов выполнена путём сопоставления параметров оптимизированного сценария с фактическими данными журнала производства работ. Для трёх типовых этажей (четвёртого, седьмого и десятого) фактические записи о простоях кранов и случаях повторной подачи материалов сопоставлены с предсказаниями базовой модели. Среднее отклонение расчётного времени простоя от фактического составило 7,2% для первого крана и 9,1% для второго, что находится в пределах допустимой погрешности имитационных моделей подобного класса и подтверждает адекватность агентной модели реальному производственному процессу.

Обсуждение результатов исследования. Полученные результаты согласуются с теоретическими положениями, сформулированными в рамках производственной теории строительства: сокращение вариабельности поступления материала и устранение операций, не создающих ценности (ожидание, повторное перемещение), приводят к уменьшению общей продолжительности производственного цикла без наращивания ресурсной базы. Сокращение цикла типового этажа на 13,3% при неизменном составе бригад и том же парке механизмов означает, что резерв производительности, выявленный ещё на стадии анализа потерь, может быть реализован за счёт организационных мер, не требующих дополнительных капитальных вложений.

Существенно, что алгоритм дополняет систему планировщика вычислительным ядром, способным формализовать проверку условий

готовности и количественно оценить последствия того или иного решения о подаче материала. Функциональные возможности BIM оказывают наиболее выраженную поддержку именно тем принципам бережливого производства, которые связаны со снижением вариабельности и сокращением циклов [5]. Проведённый эксперимент подтверждает данное положение на количественном уровне: параметрическая модель здания выступает источником достоверных данных о массе, габаритах и последовательности монтажа элементов, без которых расчёт параметров очереди и динамическое назначение кранов были бы невозможны.

Определённое ограничение исследования состоит в том, что имитационная модель не учитывает стохастические факторы, такие как внезапные отказы оборудования, перебои в поставках, связанные с логистическими сбоями внешних подрядчиков, а также изменения проектных решений в ходе строительства. Для полного использования потенциала четырёхмерного моделирования необходимо включать в модель временные сооружения, оборудование и ограничения безопасности [9]. В дальнейшем предполагается расширить агентную модель за счёт введения агентов, моделирующих перечисленные возмущающие воздействия, и оценить устойчивость оптимизированного сценария к подобным воздействиям.

Другое направление развития связано с интеграцией предложенного алгоритма в среду BIM-сервера, обеспечивающего управление данными проекта на уровне отдельных объектов модели и синхронизацию моделей различных участников. Для логистического координатора это означает возможность получать обновлённые сведения о состоянии работ и скорректировать решение о подаче материала без задержки, связанной с ожиданием планового совещания.

Выводы. Проведённое исследование было посвящено разработке и экспериментальной проверке методического аппарата, объединяющего предписывающие принципы бережливого производства с функциональными возможностями четырёх-пятимерного информационного моделирования для

упорядочения внутриплощадочных материальных потоков при возведении многоэтажного здания. Результаты подтверждают выдвинутую гипотезу о том, что совместное применение двух названных концепций обеспечивает эффект, превышающий суммарный эффект их раздельного применения. Экспериментальная верификация на объекте шестнадцатиэтажного монолитного жилого дома с двухуровневым подземным паркингом продемонстрировала, что переход к вытягивающему принципу в сочетании с динамическим назначением кранового оборудования обеспечивает сокращение среднесуточных простоев техники на 47,8% и 51,3% для двух башенных кранов соответственно, уменьшение числа вторичных перемещений материалов на 73,8% и снижение продолжительности цикла типового этажа на 13,3% при неизменном составе бригад и том же парке механизмов.

Разработанный алгоритм пространственно-временного анализа, построенный на аппарате теории массового обслуживания с использованием модели M/G/c и агентного имитационного моделирования в среде AnyLogic, формализует процедуру проверки условий готовности работ, которая в системе последнего планировщика традиционно основывается на экспертной оценке. Параметрическая модель логистических маршрутов, зон складирования и рабочих зон кранов, выполненная в Autodesk Revit Structure с последующим экспортом в формат IFC для интеграции с Navisworks Simulate, обеспечивает ту информационную основу, без которой динамическое управление поставками было бы невозможно. Реализуется механизм, описанный в руководстве CIRIA C725 как непосредственное содействие BIM достижению целей Lean через автоматизацию обнаружения пространственно-временных коллизий до начала монтажных операций. Верификация расчётных параметров по фактическим записям журнала производства работ для трёх типовых этажей показала среднее отклонение модели от натурных данных в пределах 7,2-9,1%, что свидетельствует об адекватности предложенного вычислительного инструмента реальному производственному процессу.

Список литературы

1. Козлов Р. Н., Пешков А. В. Интеграция бережливого производства и BIM-технологий как основа эффективного проектного управления и организации производственных процессов на этапе строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2023. – Т. 13. – №. 2 (45). – С. 271-284.

2. Машарипов В. М., Лучкина В. В. Управление строительными проектами: анализ развития методологий, стандартов, методов и интеграция Lean, BIM и гибких подходов // Components of Scientific and Technological Progress. – 2024. – №. 11 (101). – С. 68.

3. Крюков К. М. Практический подход к интеграции технологии информационного моделирования и бережливого строительства // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – Т. 27. – №. 1. – С. 180-193.

4. Гевара Р., Лейди Т., Пешков В. В., Мартьянов В. И., Радионова Е. А., Бужеева Ф. Г., Сайбаталова Е. В. Технологии информационного моделирования (BIM) как основа бережливого строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2022. – Т. 12. – №. 1 (40). – С. 70-81.

5. Кустов В. С., Дмитриев А. Г. Методологические аспекты управления инвестиционно–строительными проектами на основе IPD, BIM, LEAN. Зарубежный опыт // Путеводитель предпринимателя. – 2024. – Т. 17. – №. 1. – С. 48-55.

6. Чикина М. Р. BIM-технологии в строительной отрасли как основа бережливого строительства // Научный журнал молодых ученых. – 2023. – №. 2 (32). – С. 59-63.

7. Астафьева О. Е., Джанбакиев В. А. Методы оптимизации управления сроками и ресурсами в строительных проектах с использованием цифровых платформ // Региональная и отраслевая экономика. – 2026. – №. 4. – С. 220-227.

8. Крашенинников В. М. Современные методы управления проектами в

строительстве в России // Финансовый менеджмент. – 2025. – №. 6. – С. 260-268.

9. Мороз И. В., Шаврин А. В. Управление строительными проектами с применением подходов Agile и Lean // Вестник экономических и социологических исследований. – 2025. – №. 3. – С. 24-31.

10. Баркалов С. А., Аверина Т. А., Пелихова А. С. Внедрение LEAN-инструментов как способ повышения операционной эффективности строительного проекта // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2025. – Т. 25. – №. 4. – С. 69-82.

11. Ахмадияров У. С., Чориев П. З. Улучшение технологии сборки крышных конструкций крупного пространства: интегрированный подход BIM–DES–FMEA–LEAN // Строительство и образование. – 2025. – Т. 4. – №. 5. – С. 30-36.

12. Овезбердиева А., Оразбердиев С., Гурбанмырадов Т. Управление строительными проектами: методологии, инструменты и технологии // Инновационная наука. – 2024. – №. 10-1. – С. 208-210.

13. Кулаков К. Ю., Орлов А. К., Канхва В. С. Цепочки создания ценности в строительстве на основе концепции бережливого производства в условиях цифровой трансформации // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18. – №. 10. – С. 1647-1660.

References

1. Kozlov R. N., Peshkov A. V. Integraciya berezhlivogo proizvodstva i BIM-texnologij kak osnova e`ffektivnogo proektnogo upravleniya i organizacii proizvodstvenny`x processov na e`tape stroitel`stva // Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel`stvo. Nedvizhimost`. – 2023. – T. 13. – №. 2 (45). – S. 271-284.

2. Masharipov V. M., Luchkina V. V. Upravlenie stroitel`ny`mi proektami: analiz razvitiya metodologij, standartov, metodov i integraciya Lean, BIM i gibkix podxodov // Somponents of Scientific and Technological Progress. – 2024. – №. 11 (101). – S. 68.

3. Kryukov K. M. Prakticheskij podxod k integracii texnologii informacionnogo

modelirovaniya i berezhlivogo stroitel`stva // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. – 2025. – T. 27. – №. 1. – S. 180-193.

4. Gevara R., Lejdi T., Peshkov V. V., Mart`yanov V. I., Radionova E. A., Buzheeva F. G., Sajbatalova E. V. Texnologii informacionnogo modelirovaniya (BIM) kak osnova berezhlivogo stroitel`stva // Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel`stvo. Nedvizhimost`. – 2022. – T. 12. – №. 1 (40). – S. 70-81.

5. Kustov V. S., Dmitriev A. G. Metodologicheskie aspekty` upravleniya investicionno–stroitel`ny`mi proektami na osnove IPD, BIM, LEAN. Zarubezhny`j opy`t // Putevoditel` predprinimatelya. – 2024. – T. 17. – №. 1. – S. 48-55.

6. Chikina M. R. BIM-texnologii v stroitel`noj otrasli kak osnova berezhlivogo stroitel`stva // Nauchny`j zhurnal molody`x ucheny`x. – 2023. – №. 2 (32). – S. 59-63.

7. Astaf`eva O. E., Dzhanbakiev V. A. Metody` optimizacii upravleniya srokami i resursami v stroitel`ny`x proektax s ispol`zovaniem cifrovy`x platform // Regional`naya i otraslevaya e`konomika. – 2026. – №. 4. – S. 220-227.

8. Krasheninnikov V. M. Sovremenny`e metody` upravleniya proektami v stroitel`stve v Rossii // Finansovy`j menedzhment. – 2025. – №. 6. – S. 260-268.

9. Moroz I. V., Shavrin A. V. Upravlenie stroitel`ny`mi proektami s primeneniem podxodov Agile i Lean // Vestnik e`konomicheskix i sociologicheskix issledovanij. – 2025. – №. 3. – S. 24-31.

10. Barkalov S. A., Averina T. A., Pelixova A. S. Vnedrenie LEAN-instrumentov kak sposob povy`sheniya operacionnoj e`ffektivnosti stroitel`nogo proekta // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Komp`yuterny`e texnologii, upravlenie, radioe`lektronika. – 2025. – T. 25. – №. 4. – S. 69-82.

11. Axmadiyarov U. S., Choriev P. Z. Uluchshenie texnologii sborki kry`shny`x konstrukcij krupnogo prostranstva: integrirovanny`j podxod BIM–DES–FMEA–LEAN // Stroitel`stvo i obrazovanie. – 2025. – T. 4. – №. 5. – S. 30-36.

12. Ovezberdieva A., Orazberdiev S., Gurbanmy`radov T. Upravlenie stroitel`ny`mi proektami: metodologii, instrumenty` i texnologii // Innovacionnaya nauka. – 2024. – №. 10-1. – S. 208-210.

13. Kulakov K. Yu., Orlov A. K., Kanxva V. S. Cepochki sozdaniya cennosti v stroitel`stve na osnove koncepcii berezhlivogo proizvodstva v usloviyax cifrovoj transformacii // Vestnik MGSU. – 2023. – T. 18. – №. 10. – S. 1647-1660.

Статья поступила в редакцию 17.04.2026; одобрена после рецензирования 15.05.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 17.04.2026; approved after peer review 15.05.2026; accepted for publication 28.08.2026.

2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические науки)

Научная статья
УДК 72.011:004.942

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ФАСАДОВ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ИНСОЛЯЦИИ

Вязникова Елена Александровна, кандидат технических наук, Уральский государственный архитектурно-художественный университет им. Н.С. Алфёрова, Россия, Екатеринбург, elena.usaaa@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена проблеме адаптации ограждающих конструкций гражданских зданий к неравномерным гелиотермическим воздействиям посредством алгоритмического синтеза кинетических фасадных систем. Обоснован переход к оболочкам с управляемой геометрией, в которых угол поворота ламелей вычисляется по вектору инсоляции для конкретной географической широты. Выполнен морфологический анализ кинематических механизмов, по итогам которого вращательная топология признана наиболее рациональной для высотных сооружений. Методология базируется на параметрическом моделировании в среде Grasshopper и годовом энергетическом моделировании продолжительностью 8760 часов для четырнадцатиэтажного административного здания в г. Краснодаре. Сопоставлены три сценария ограждения: сплошное остекление, статичные жалюзи и кинетическая оболочка. Установлено, что адаптивный контур удерживает полезную дневную освещенность свыше 82% площади рабочего этажа и снижает суммарные теплопоступления на 54% относительно базового варианта, тогда как статичные жалюзи, снижая перегрев, уменьшают показатель полезной дневной освещенности до 22%. Показано, что паразитное энергопотребление сервоприводов пренебрежимо мало на фоне сэкономленной тепловой энергии. Проработаны узлы сопряжения, ветровая безопасность с флюгерным режимом

при порывах свыше 15 м/с и отказоустойчивость с гравитационным возвратом ламелей. Результаты подтверждают, что кинетический фасад - инструмент термодинамической оптимизации, а также определяют новую творческую концепцию архитектурной деятельности, в которой проектировщик формирует правила поведения оболочки.

Ключевые слова: кинетический фасад; адаптивная архитектура; алгоритмическое проектирование; параметрическая модель; инсоляционная нагрузка; полезная дневная освещенность; теплопоступления; сервопривод; ветровая безопасность; энергоэффективность оболочки.

Original article

PARAMETRIC DESIGN OF KINETIC FACADES TAKING INTO ACCOUNT CHANGING INSOLATION

Viaznikova Elena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Ural State University of Architecture and Art named after N.S. Alferov, Yekaterinburg, Russia, elena.usaaa@yandex.ru

Abstract. This article examines the adaptation of civil building envelopes to uneven solar thermal effects through the algorithmic synthesis of kinetic façade systems. A rationale is provided for the transition to envelopes with controlled geometry, in which the lamella rotation angle is calculated based on the insolation vector for a specific latitude. A morphological analysis of the kinematic mechanisms is conducted, which concludes that rotational topology is the most efficient for high-rise structures. The methodology is based on parametric modeling in Grasshopper and an annual energy simulation lasting 8,760 hours for a fourteen-story administrative building in Krasnodar. Three envelope scenarios are compared: continuous glazing, static louvers, and a kinetic envelope. It was found that the adaptive contour maintains useful daylight over 82% of the working floor area and reduces total heat gain by 54% relative to the base case, while static blinds, while damping overheating, reduce

illuminance by up to 22%. It was shown that the parasitic energy consumption of the servo drives is negligible compared to the saved thermal energy. The coupling nodes, wind safety with a weathervane mode for gusts exceeding 15 m/s, and fault tolerance with gravitational return of the slats were developed. The results confirm that the kinetic façade is a tool for thermodynamic optimization and also define a new creative concept for architectural practice, in which the designer defines the rules of behavior of the shell.

Keywords: kinetic facade; adaptive architecture; algorithmic design; parametric model; insolation load; useful daylight; heat gain; servo drive; wind safety; energy efficiency of the shell.

Введение. Архитектурная оболочка эволюционировала от массивного несущего барьера до высокотехнологичного климатического фильтра. В современной строительной практике, характеризующейся ужесточением требований к углеродному следу и энергопотреблению, статичные ограждающие конструкции перестают удовлетворять критериям экологической устойчивости. Традиционные методы пассивной солнцезащиты, такие как стационарные козырьки или фиксированные ламели, проектируются исходя из усредненных пиковых значений инсоляции, что приводит к перегреву помещений в межсезонье либо к дефициту естественного света. Преодоление данного противоречия предполагает переход к динамическим системам, способным непрерывно изменять свою геометрию в зависимости от условий внешней среды [1]. В этом контексте алгоритмическое проектирование становится методологией, объединяющей метеорологические данные, кинематические параметры механизмов и структурную топологию для адаптации здания к локальному гелиотермическому режиму.

Динамика подходов к формированию наружных ограждений связана с изменением конструктивных и инженерных парадигм. Модернистские здания середины XX века со значительной площадью остекления и ограниченной

естественной регуляцией микроклимата потребовали применения энергоемких систем принудительного кондиционирования [2]. Ограничения герметичных статичных объемов стимулировали поиск адаптивных стратегий, основанных на биомиметических принципах. Архитектурные поверхности обретают способность к физическому изменению состояния, интегрируя автоматизированные солнцезащитные элементы и подвижные мембраны [3]. Ранние попытки механизации ограничивались использованием выдвижных маркиз и поворотных жалюзи, управление которыми осуществлялось вручную или по жестко заданному таймеру. Сдвиг парадигмы произошел с внедрением параметрических вычислительных сред, позволивших математически описать поведение оболочек на основе векторного анализа солнечных траекторий и данных инсоляционного климата конкретной географической широты. Это позволило проектировать целостные кинематические системы, в которых каждый модуль имеет собственную степень свободы, параметры которой определяются заданными алгоритмами реакции на условия среды [4].

Инсоляционные нагрузки выступают одним из факторов, определяющих тепловой баланс и визуальный комфорт внутри здания. Адаптация к ним посредством кинетических элементов может в значительной мере снизить пиковые значения охлаждающей нагрузки в летний период без ущерба для уровня дневной освещенности, минимизируя зависимость объекта от искусственных источников света и климатической техники. Функционирование подобных структур подразумевает интеграцию принципов, описанных в трудах по управлению взаимодействиями в интеллектуальных средах, где архитектура рассматривается как распределенная сеть реагирующих на внешние стимулы узлов [5], [6]. Интеллектуальные фасады представляют собой сложные киберфизические комплексы, в которых физические актуаторы управляются микропроцессорами, считывающими показания сетей пиронометров и датчиков освещенности.

Показательным примером реализации концепций служат башни Аль-Бахар

в Абу-Даби, спроектированные архитектурным бюро Aedas. Их зонтообразный фасад, отсылающий к традиционной арабской резьбе по дереву (машрабия), состоит из фторопластовых модулей, которые раскрываются и сворачиваются в ответ на положение солнца. Применение алгоритмических скриптов на этапе конструирования дало возможность рассчитать оптимальную геометрию складывания каждого элемента, что обеспечило сокращение поступления солнечной радиации внутрь помещений более чем на 50%. Аналогичные вычислительные принципы заложены в основу фасада парижского Института арабского мира, созданного Жаном Нувелем. Поворотные металлические диафрагмы, приводимые в движение скрытыми сервоприводами, образуют светотеневую картину, непрерывно варьируя коэффициент светопропускания стекла в реальном времени. Разработка систем базируется на методах генеративного дизайна, итеративно оптимизирующих форму, массу и кинематические связи каждого компонента оболочки для достижения целевых показателей энергоэффективности и структурной надежности.

Обзор литературы. Теоретико-методологический базис формирования адаптивных архитектурных оболочек опирается на исследования в области кинетической архитектуры и интеллектуальных сред. В статье, посвященной проектированию кинетики фасадных систем, детально рассматривается эволюция наружных ограждений от инертных барьеров к интерактивным поверхностям, способным к физическому изменению своего состояния в ответ на флуктуации внешней среды [7]. Автор подчеркивает, что интеграция подвижных элементов определяет совершенствование традиционных подходов к формообразованию, где статичная геометрия уступает место алгоритмически генерируемым топологиям. Одновременно исследования управления взаимодействиями в интеллектуальных средах формируют кибернетический подход к пониманию здания как распределенной вычислительной сети [8], [9]. Архитектурный объект в данной парадигме трактуется как совокупность реагирующих узлов, где механическое движение выступает физическим

воплощением вычислительного процесса.

На основе указанных теоретических положений кинетические механизмы можно разделить на три основных класса, различающихся по степени применимости в строительной практике. Складчатые системы, функционирующие по принципу оригами, обеспечивают высокую степень компактности в сложенном состоянии, однако сложность шарнирных сопряжений и уязвимость мембранных материалов к атмосферным воздействиям ограничивают их использование преимущественно малыми архитектурными формами или временными павильонами. Телескопические конструкции, предполагающие взаимное скольжение перекрывающих друг друга плоскостей, демонстрируют высокую надежность, но их значительная масса и потребность в протяженных направляющих рельсах создают избыточные статические нагрузки на несущий каркас высотных сооружений. Вращательные механизмы, в частности, поворотные ламели с варьируемой осью вращения, представляют собой наиболее рациональный компромисс. С их помощью можно непрерывно отслеживать положение солнца, снижая при этом нежелательные динамические воздействия и сохраняя структурную целостность светопрозрачного контура [10], [11]. Авторская позиция в данном вопросе сводится к тому, что именно вращательная топология, подкрепленная алгоритмическим управлением, обладает наибольшим потенциалом для масштабирования на объекты гражданского и промышленного назначения, выступая инструментом термодинамической оптимизации.

Организация и методология исследования. Эмпирической базой для верификации предложенных алгоритмических подходов была выбрана модель четырнадцатиэтажного административного здания со сплошным остеклением, расположенного в климатических условиях г. Краснодар (рисунок 1). Выбор данного географического положения обусловлен необходимостью снижения экстремальных летних теплопоступлений при сохранении нормативных показателей естественного освещения в зимний период. Методология

исследования базировалась на параметрическом моделировании в вычислительной среде Grasshopper с применением специализированных плагинов экологического анализа. Разработанный алгоритм связывал векторную геометрию фасада с астрономическими данными траектории солнца (SunPath) для заданной широты, генерируя массив данных для каждого из 1420 фасадных модулей.



Рисунок 1 - Модель четырнадцатиэтажного административного здания со сплошным остеклением (источник: разработано автором)

В отличие от бинарных систем, оперирующих состояниями «открыто» или «закрыто», предложенная параметрическая модель вычисляла оптимальный угол поворота каждой ламели (рисунок 2, 3), исходя из скалярного произведения вектора падения прямых солнечных лучей и нормали к поверхности элемента. Это обеспечивало блокировку слепящего излучения при одновременном пропускании рассеянного света от небосвода. Для формализации логики работы адаптивной оболочки была разработана концептуальная матрица параметрических зависимостей (таблица 1), интегрирующая гелиотермические, аэродинамические и системные переменные.



Рисунок 2 - Визуализация кинетического фасада с горизонтальными поворотными ламелями (источник: разработано автором)



Рисунок 3 - План узла сопряжения ламели с приводом (источник: разработано автором)

Таблица 1 - Матрица параметрических зависимостей и ограничений кинетического узла

Вектор внешнего воздействия	Алгоритмическая реакция (выходной параметр)	Инженерно-конструктивное ограничение
Азимут и высота стояния светила	Угол поворота ламели α относительно горизонтальной оси (от -15° до +75°)	Механический упор шарнира, предотвращающий заклинивание актуатора
Скорость и порывистость ветра (по данным анемометра)	Переход в аэродинамически нейтральное положение (угол атаки 0°)	Предельная изгибающая нагрузка на ось вращения при скорости потока > 18 м/с
Потеря электропитания или сбой контроллера	Активация режима отказоустойчивости	Гравитационный возврат или пружинный механизм, фиксирующий ламель в положении затенения
Интегральная освещенность внутри помещения (UDI)	Локальная корректировка угла для предотвращения образования теневых пятен	Максимальная скорость перемещения привода (не более 3° в секунду для исключения визуального дискомфорта)

Источник: разработано автором.

Доминирующим фактором в штатном режиме является инсоляционный вектор, однако при достижении критических значений ветровой нагрузки он утрачивает приоритет. Более того, параметр скорости перемещения, казалось бы, не связанный с энергетикой, напрямую влияет на психофизиологическое восприятие среды пользователями, поскольку непрерывное медленное движение практически не воспринимается периферическим зрением, тогда как резкие перемещения вызывают дезориентацию.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведенное энергетическое моделирование (8760 часов расчетного периода) позволило осуществить сравнительный анализ трех типов ограждающих конструкций: базового статичного остекления с низкоэмиссионным покрытием, традиционных статичных горизонтальных жалюзи и разработанного алгоритмического кинетического фасада. Оценка производилась по критериям полезной дневной освещенности (UDI - Useful Daylight Illuminance, диапазон 100-2000 люкс) и суммарных теплопоступлений (рисунок 4).



Рисунок 4 - Сценарии остекления здания (источник: разработано автором)

Результаты моделирования показали ограниченную эффективность статичных систем в условиях южного климата. Базовое остекление обеспечило приемлемый уровень UDI лишь на 35% площади рабочего этажа, спровоцировав при этом образование зон ослепления и критический перегрев периметральных помещений, что потребовало бы увеличения мощности систем кондиционирования на 68%. Внедрение статичных жалюзи снизило охлаждающую нагрузку на 41%, однако ухудшило световой климат: показатель UDI уменьшился до 22%, что требовало использования искусственного освещения на протяжении всего светового дня и снижало энергетическую выгоду. Кинетический фасад, управляемый векторным алгоритмом, обеспечил поддержание UDI на уровне свыше 82% в течение всего отчётного года за счет динамического перенаправления рассеянного зенитного света в глубину плана. Совокупное снижение теплопоступлений через оболочку составило 54% по сравнению с исходным статичным вариантом.

Аспектом, часто игнорируемым в теоретических исследованиях, является учет паразитного энергопотребления самих приводов. В предложенной конструкции использовались бесщеточные сервоприводы постоянного тока

мощностью 12 Вт, оснащенные планетарными редукторами. Анализ годового профиля работы показал, что среднее время активной фазы перемещения элементов составляет около 90 минут в сутки (в утренние и вечерние часы смены азимута). Суммарное энергопотребление кинематической группы за год оказалось в 3 раза ниже объема тепловой энергии, сэкономленной благодаря оптимизации инсоляционного режима.

Конструктивная проработка узлов сопряжения выявила ряд требований, связанных с динамической работой фасада. Ветровая нагрузка на движущиеся элементы, выступающие за плоскость несущей стены, создает знакопеременные изгибающие моменты в осях вращения. Для нивелирования данного фактора был спроектирован скрытый узел опирания с применением фторопластовых подшипников скольжения, исключающих необходимость регулярной смазки и обладающих высокой стойкостью к абразивному воздействию пылевых частиц (рисунок 5). Вопрос ветровой безопасности был решен путем интеграции алгоритма с внешними метеодатчиками, так как при фиксации порывов свыше 15 м/с система принудительно переводит все ламели в положение, параллельное вектору ветра (флюгерный режим), минимизируя аэродинамическое сопротивление и предотвращая усталостное разрушение металлокаркаса.



Рисунок 5 - Скрытый узел опирания с применением фторопластовых подшипников скольжения (источник: разработано автором)

Отказоустойчивость обеспечена конструкцией привода. В обесточенном состоянии электромагнитный тормоз сервомотора размыкается, и под действием смещенного центра тяжести ламель самостоятельно опускается в положение максимального затенения. В случае системного сбоя или аварийного отключения электроэнергии снижается риск перегрева здания, а внутренние помещения дольше сохраняют накопленную прохладу.

Выводы. Архитектурная форма рассматривается как результат непрерывной адаптации фасада к изменениям гелиотермических условий, а ее выразительность формируется в процессе этой адаптации. Данная позиция перекликается с выводами о том, что физическое изменение состояния фасадов формирует совершенно новый визуальный и пространственный опыт, фактически стирая границы между традиционной строительной конструкцией и робототехническим устройством. Здание рассматривается как адаптивная система, способная поддерживать стабильные параметры внутренней среды за счет непрерывной реакции на внешние воздействия.

Эмпирическая верификация параметрических моделей в условиях южного климата показала, что фиксированная геометрия ограждения недостаточно эффективна при изменчивом характере солнечной радиации. Интеграция метеорологических сенсоров с вычислительными ядрами трансформирует объект в автономный узел распределенной сети, что полностью отвечает кибернетическим установкам, заложенным в трудах по управлению взаимодействиями в интеллектуальных средах [2]. Фасад в этой системе выступает агентом, перераспределяющим энергетические потоки и нивелирующим пиковые нагрузки на инженерные сети, что делает концепцию адаптивности безальтернативным вектором развития урбанистической инфраструктуры.

В контексте творческих концепций архитектурной деятельности подобный сдвиг обусловливает необходимость улучшения инструментария зодчего. Проектировщик передает формирование геометрии генеративным алгоритмам,

сосредоточивая усилия на разработке общих правил, ограничений и сценариев поведения конструктивных элементов. Авторская воля выражается в том, что выразительность облика есть следствие математически выверенного взаимодействия с климатическими векторами. Это формирует новую профессиональную компетенцию, требующую синтеза навыков конструктора, программиста и климатолога.

Дальнейшая эволюция адаптивных оболочек приведет к распределенной актуации на уровне молекулярной структуры строительных композитов. Внедрение сплавов с памятью формы и диэлектрических эластомеров даст возможность создавать непрерывные, лишенные видимых механизмов поверхности, изгибающиеся подобно листьям гелиотропных растений. Данный прогнозный вектор развития окончательно закрепит роль кинетической архитектуры как доминирующей стратегии формирования устойчивой среды обитания, способной к симбиозу с экосистемой без нанесения ущерба ее ресурсному балансу.

Список литературы

1. Акимов Л. И., Васильева Д. Г., Козинец Г. Л., Баденко В. Л. Проектирование динамических фасадов—разработка физической модели // Вестник евразийской науки. – 2025. – Т. 17. – №. 4. – С. 49.
2. Плаксина А. В., Коржемпо Я. А. Кинетические объекты как элементы нового дизайна городской среды. Динамические фасадные системы // Системные технологии. – 2024. – №. 4 (53). – С. 196-205.
3. Муратова В. А., Козловский С. А. Анализ существующих решений конструктивных систем кинетических фасадов // Construction and Geotechnics. – 2022. – Т. 13. – №. 2. – С. 77-87.
4. Жандарова А. А., Денисенко Е. В. Предпосылки развития технологий в бионаправленной архитектуре // Architecture and Modern Information Technologies. – 2022. – №. 4 (61). – С. 28-43.
5. Пономарёв А. В. Адаптивная архитектура–основные направления развития //

Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2024. – Т. 14. – №. 2 (49). – С. 406-417.

6. Sadegh S. O., Gasparri E., Brambilla A., Globa A. Kinetic facades: An evolutionary-based performance evaluation framework // Journal of Building Engineering. – 2022. – Т. 53. – С. 104408.

7. Goharian A., Mahdavinejad M., Ghazazani S., Hosseini S. M., Zamani Z., Yavari H., ... Shoghi F. Designing adaptability strategy to a novel kinetic adaptive façade (NKAF); toward a pioneering method in dynamic-objects daylight simulation (post-processing) // Journal of Daylighting. – 2025. – Т. 12. – №. 1. – С. 69-90.

8. Wagiri F., Shih S. G., Harsono K., Wijaya D. C. Multi-objective optimization of kinetic facade aperture ratios for daylight and solar radiation control // Journal of building physics. – 2024. – Т. 47. – №. 4. – С. 355-385.

9. Bahri S. Y., Forment M. A., Riera A. S., Heiranipour M., Hosseini S. N. Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study // Energy Reports. – 2025. – Т. 13. – С. 3915-3928.

10. Safaripoor S., Karimi M., Ilbeigi M., Ahrari F., Khalili F., Mashhadimohammadzadehvazifeh F., Alelwani R. Genetic algorithm-based assessment of kinetic façade prototypes for energy optimization and user comfort: a hotel case study in Iran // Discover Sustainability. – 2026. – Т. 7. – №. 1. – С. 725.

11. Li Z., Tian J., Ji G., Cheng T., Loftness V., Han X. Reinforcement learning-enabled adaptive control for climate-responsive kinetic building facades // Buildings. – 2025. – Т. 15. – №. 16. – С. 2977.

References

1. Akimov L. I., Vasil`eva D. G., Kozinecz G. L., Badenko V. L. Proektirovanie dinamicheskix fasadov—razrabotka fizicheskoj modeli // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2025. – T. 17. – №. 4. – S. 49.

2. Plaksina A. V., Korzhempo Ya. A. Kineticheskie ob``ekty` kak e`lementy` novogo dizajna gorodskoj sredy`. Dinamicheskie fasadny`e sistemy` // Sistemny`e texnologii. – 2024. – №. 4 (53). – S. 196-205.

3. Muratova V. A., Kozlovskij S. A. Analiz sushhestvuyushhix reshenij konstruktivny`x sistem kineticheskix fasadov // Construction and Geotechnics. – 2022. – T. 13. – №. 2. – S. 77-87.

4. Zhandarova A. A., Denisenko E. V. Predposy`lki razvitiya texnologij v bionapravlennoj arxitekture // Architecture and Modern Information Technologies. – 2022. – №. 4 (61). – S. 28-43.

5. Ponomaryov A. V. Adaptivnaya arxitektura–osnovny`e napravleniya razvitiya // Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel`stvo. Nedvizhimost`. – 2024. – T. 14. – №. 2 (49). – S. 406-417.

6. Sadegh S. O., Gasparri E., Brambilla A., Globa A. Kinetic facades: An evolutionary-based performance evaluation framework // Journal of Building Engineering. – 2022. – T. 53. – P. 104408.

7. Goharian A., Mahdavinejad M., Ghazazani S., Hosseini S. M., Zamani Z., Yavari H., ... Shoghi F. Designing adaptability strategy to a novel kinetic adaptive façade (NKAF); toward a pioneering method in dynamic-objects daylight simulation (post-processing) // Journal of Daylighting. – 2025. – T. 12. – No. 1. – P. 69-90.

8. Wagiri F., Shih S. G., Harsono K., Wijaya D. C. Multi-objective optimization of kinetic facade aperture ratios for daylight and solar radiation control // Journal of building physics. – 2024. – T. 47. – No. 4. – P. 355-385.

9. Bahri S. Y., Forment M. A., Riera A. S., Heiranipour M., Hosseini S. N. Kinetic facades as a solution for educational buildings: A multi-objective optimization simulation-based study // Energy Reports. – 2025. – T. 13. – P. 3915-3928.

10. Safaripoor S., Karimi M., Ilbeigi M., Ahrari F., Khalili F., Mashhadimohammadzadehvazifeh F., Alelwani R. Genetic algorithm-based assessment of kinetic facade prototypes for energy optimization and user comfort: a hotel case study in Iran // Discover Sustainability. – 2026. – T. 7. – No. 1. – P. 725.

11. Li Z., Tian J., Ji G., Cheng T., Loftness V., Han X. Reinforcement learning-enabled adaptive control for climate-responsive kinetic building facades // Buildings. – 2025. – T. 15. – No. 16. – P. 2977.

Статья поступила в редакцию 12.02.2026; одобрена после рецензирования 01.04.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 12.02.2026; approved after peer review 01.04.2026; accepted for publication 28.08.2026.

Научная статья
УДК 72.025.5:72.031

АРХИТЕКТУРНО-ТИПОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К АДАПТАЦИИ ИСТОРИЧЕСКИХ ЭЛЕВАТОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Дужевский Игорь Александрович, кандидат технических наук, Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Филиал С(А)ФУ в г. Северодвинске, Россия, Северодвинск, i.duzhevskii@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема адаптивного использования индустриального наследия на примере зернохранилищ. Особое внимание уделяется специфической морфологии элеваторных комплексов, которые характеризуются выраженной вертикальной доминантой, цилиндрической геометрией основных объемов и недостатком естественного освещения внутренних помещений. Цель работы заключается в разработке формальной типологической модели, позволяющей связать исходные конструктивные параметры сооружений с допустимыми сценариями их интеграции в современную городскую среду. Материалом исследования послужили отечественные и зарубежные проекты реновации портовых и башенных элеваторов. Автор предлагает типологическую матрицу, включающую оценку степени вмешательства в несущую систему, анализ критических архитектурных ограничений и проверку соответствия нового функционального назначения пространственной структуре сооружения. На основе анализа реальных кейсов сформулированы три базовые схемы реконструкции под культурный, жилой и офисный центры. Сделан вывод о том, что обоснованное внедрение новой функции выступает действенным механизмом консервации, продлевающим жизненный цикл историко-промышленного объекта при условии сохранения его подлинных конструкций и материалов. Результаты работы могут быть использованы в архитектурном проектировании при выборе концепции реконструкции сложных

индустриальных сооружений, а также в учебном процессе профильных вузов.

Ключевые слова: индустриальное наследие, элеваторные комплексы, адаптивное использование, архитектурно-типологическая трансформация, реновация промышленных зон, морфология сооружений, реконструкция историко-промышленных объектов.

Original article

ARCHITECTURAL AND TYPOLOGICAL APPROACHES TO THE ADAPTATION OF HISTORICAL ELEVATOR COMPLEXES

Duzhevskii Igor Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Severodvinsk Branch, Severodvinsk, Russia, i.duzhevskii@inbox.ru

Abstract. This article examines the adaptive use of industrial heritage using grain storage facilities as an example. Particular attention is paid to the specific morphology of grain elevator complexes, which are characterized by a pronounced vertical dominant, the cylindrical geometry of the main volumes, and strict limitations on natural insolation of the interior spaces. The aim of the study is to develop a formal typological model that allows for linking the initial design parameters of the structures with acceptable scenarios for their integration into the modern urban environment. The study draws on domestic and international renovation projects for port and tower elevators. The author proposes a typological matrix that includes an assessment of the degree of intervention in the supporting structure, an analysis of critical architectural constraints, and a verification of the functional compatibility of the new program with the spatial structure of the landmark. Based on the analysis of real cases, three basic reconstruction schemes for cultural, residential, and office centers are formulated. It is concluded that the well-founded implementation of a new function is an effective conservation mechanism, extending the life cycle of a historical and industrial site, provided its original material substance is treated with care. The results of this study

can be used in architectural design when selecting reconstruction concepts for complex industrial structures, as well as in the educational process at specialized universities.

Keywords: industrial heritage, elevator complexes, adaptive use, architectural and typological transformation, renovation of industrial zones, morphology of structures, reconstruction of historical and industrial sites.

Актуальность исследования. Современная архитектурная практика все чаще обращается к промышленным территориям, рассматривая их как ценный исторический слой городской среды [1], [2]. Этот подход напрямую перекликается с фундаментальными положениями Венецианской хартии 1964 года, где подчеркивается необходимость сохранения памятников не только в качестве художественных объектов, но и как свидетельств ушедших эпох [3], [4]. Документ особо отмечает, что консервация и реставрация исторических сооружений облегчаются, если им находят социально полезное применение, при условии сохранения их подлинности и исторической среды. Именно адаптивное использование становится тем инструментом, который позволяет интегрировать индустриальное наследие в современный городской каркас, наделяя заброшенные фабрики и заводы новыми функциями без искажения их изначального архитектурного облика [5-7].

В ряду подобных производственных объектов особое место занимают зернохранилища, которые на протяжении десятилетий формировали индустриальные ландшафты портовых и аграрных регионов. Сегодня перед архитекторами стоит задача разработки концепций преобразования таких объектов. Архитекторам приходится работать с масштабом и формой, диктуемыми сугубо утилитарными потребностями прошлого [8], [9]. Конструктивные и пространственные особенности элеваторов определялись технологией хранения и перевалки сыпучих грузов; при реконструкции эти особенности необходимо учитывать и переосмысливать.

Ключевой особенностью элеваторных комплексов выступает их ярко

выраженная вертикальная доминанта и специфическая геометрия основных объемов [10]. Силуэты рабочих башен и вытянутые в высоту ряды силосов создают мощный ритм, который авторы проектов используют для формирования новых пространственных сценариев. Круглое сечение бетонных или кирпичных шахт представляет собой нестандартную планировочную задачу [11]. В отличие от зданий с прямоугольной сеткой колонн, в элеваторах функциональные зоны приходится размещать внутри помещений с криволинейными стенами, что обусловливает радиальную организацию внутреннего пространства [12]. Такое взаимодействие с цилиндрической формой требует отказа от шаблонных решений и стимулирует поиск нестандартных конструктивных приемов, позволяющих сохранить монументальность исходного сооружения.

Не менее серьезным вызовом при реконструкции элеваторов становится проблема естественной инсоляции внутренних пространств. Изначально глухие стены силосов, рассчитанные на защиту зерна от солнечных лучей и перепадов температур, сегодня создают дефицит дневного света, критичный для общественных или жилых функций. В таких проектах необходимо минимизировать вмешательство в наружные конструкции здания. Для обеспечения естественного освещения предусматривают сквозные проёмы в бетонных стенах, атриумы и световые колодцы, стремясь сохранить целостность исторических фасадов [13-15]. Такие приёмы позволяют использовать контраст между массивным внешним объёмом и освещённым внутренним пространством как основу нового архитектурного образа.

Степень разработанности проблемы исследования. Исследователи индустриального ландшафта, такие как А.В. Иконников, М.П. Шувалова и ряд зарубежных урбанистов, достаточно подробно описали механизмы интеграции бывших фабрик и заводов в городскую среду [16], [17]. Однако особенности зернохранилищ в этих исследованиях рассмотрены недостаточно подробно. Если текстильные или машиностроительные мануфактуры обладают развитой сеткой колонн и оконными проемами, то элеваторы представляют собой

замкнутые массивы. В предыдущих работах промышленное наследие рассматривалось преимущественно в контексте девелоперских проектов, при этом конструктивным особенностям силосов уделялось недостаточно внимания [18], [19]. На сегодняшний день не сформирован четкий алгоритм выбора новой функции в зависимости от исходной геометрии бетонных или стальных ячеек [20], [21]. Поэтому необходимо перейти от общих рассуждений об индустриальной эстетике к морфологическому анализу, позволяющему установить связь между конструктивными особенностями элеватора и возможными способами его приспособления.

Материалы и методы исследования. В основу работы легли проектные решения и натурные обследования десяти элеваторных комплексов: шести зарубежных (Zeitz MOCAA в Кейптауне, Silo Nordhavn в Копенгагене, Silodam в Роттердаме, Docks de Rouen во Франции, а также два порта в Испании) и четырех отечественных (портовые элеваторы Новороссийска, Выборга, Ростова-на-Дону и концептуальный проект реконструкции в Санкт-Петербурге). Мы применили метод морфологического анализа, сопоставив исходные инженерные чертежи с современными планировочными решениями. Для оценки степени сохранения подлинности использовались положения Международной хартии по консервации и реставрации памятников и достопримечательных мест (Венецианская хартия 1964 года). В частности, опора на статью 5 документа позволила обосновать допустимость изменения внутреннего пространства при условии сохранения исторического облика и декора, а статья 13 стала критерием для оценки новых внешних пристроек.

Результаты исследования. Архитектурная морфология элеваторов диктуется исключительно утилитарными задачами хранения и гравитационного перемещения сыпучих грузов. Мы выделяем три базовых типа: башенные (с доминирующей рабочей галереей и группами силосов), горизонтальные (складские корпуса с наклонными полами) и портовые (интегрированные в причальную линию). Несущая система чаще всего представлена либо

железобетонными стенами, возведенными методом скользящей опалубки, либо группами стальных цилиндрических емкостей, заключенных в общий контур.

Проектировщик неизбежно сталкивается с жесткими пространственными рамками. Шаг продольных стен составляет от 3 до 6 метров, что соответствует диаметру силосов. Высота технических этажей в рабочей башне достигает 4–8 метров, тогда как в самих силосах внутренние перегородки отсутствуют, но габариты ячеек не позволяют свободно делить пространство. Основные проблемы — отсутствие естественного освещения в глубине сооружения и сложность организации вертикальных коммуникаций (рисунок 1).

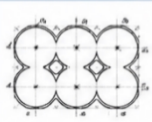
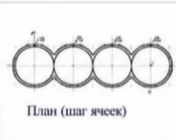
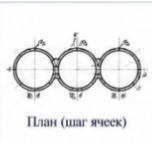
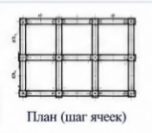
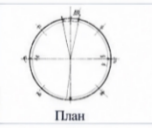
Тип элеватора	Конструктивная схема (схема и пример)	Диаметр / шаг ячеек, м	Глубина корпуса, м	Наличие проемов	Возможность устройства новых перекрытий
Башенный железобетонный элеватор (отдельные силосные ячейки в общем корпусе)	 	**Ø 6,0** (шаг 6,0)	30–50	Технологические проемы в верхней части, иногда проемы в нижней части ячеек	**Допускается устройство новых перекрытий.** Возможна вставка легких металлокаркасных перекрытий в пределах шага 6 м с опиранием на существующие стены ячеек и кольцевые ригели.
Батарейный железобетонный элеватор (блок из ячеек в ряд)	 	**Ø 4,5–6,0** (шаг 4,5–6,0)	25–45	Ограниченные проемы (загрузочные и разгрузочные устройства)	**Ограниченно допустимо.** Устройство новых перекрытий возможно при шаге 6 м и наличии конструктивных элементов для опирания. При шаге 4,5 м — затруднено.
Стальной групповой силос (цилиндрические силосы в группе)	 	**Ø 3,0** (шаг 3,0)	15–30	Только технологические люки в покрытии и в нижней части	**Возможно только на уровне существующих технических галерей.** Устройство новых горизонтальных связей между силосами допускается лишь в уровне существующих галерей и обслуживающих площадок.
Железобетонный силосный корпус с плоскими ячейками (прямоугольные ячейки)	 	**3,0 × 3,0** (шаг 3,0)	20–40	Проемы для технологического оборудования (ограниченные)	**Возможно при усилении конструкций.** Устройство новых перекрытий допустимо при наличии несущих стен между ячейками и проведении усиления.
Металлический силос (отдельный) (одиночный силос)	 	**Ø 4,5–12,0**	10–40	Технологические люки в покрытии и в нижней части	**Не допускается.** Устройство новых перекрытий внутри силоса конструктивно невозможно.

Рисунок 1 - Типологическая матрица морфологических ограничений элеваторов (источник: разработано автором)

Анализ десяти объектов позволил нам сформировать авторскую типологическую матрицу соответствия «морфология элеватора → допустимые сценарии адаптации». Матрица позволяет уже на этапе предпроектного анализа исключать функции, несовместимые с пространственной и конструктивной структурой элеватора. Например, глубокие цилиндрические объемы без возможности сквозного прорезания исключают размещение там гостиниц или

жилья, но идеально подходят для экспозиционных залов или винных погребов, где темнота является преимуществом.

Обсуждение результатов исследования. Рассмотрение реальных кейсов подтверждает эффективность предложенной матрицы. В качестве общей аналогии адаптации индустриального наследия мы берем галерею Тейт Модерн в Лондоне. Хотя исходное здание было электростанцией, а не элеватором, организация пространства Турбинного зала и возведение нового объёма (Switch House) показывают, как архитекторы Herzog & de Meuron обеспечили освещение и вертикальные связи при сохранении исторической кирпичной кладки.

Однако специфика зерновых хранилищ требует иных приемов. В проекте Zeitz MOCAA в Кейптауне (арх. Т. Хезервик) центральную часть массива из 42 бетонных силосов преобразовали в атриум, повторяющий форму зерна, и разместили в нём лифтовые шахты. Вместо того чтобы прятать их, они вырезали в центре массива атриум, повторяющий форму зерна, и разместили внутри него лифтовые шахты. Здесь степень вмешательства была классифицирована нами как «существенная реконструкция», но при этом внешний контур и материал фасадов остались нетронутыми, что полностью соответствует статье 9 Венецианской хартии о уважении к подлинному материалу.

Совершенно иной подход демонстрирует жилой комплекс Silo Nordhavn в Копенгагене (арх. Cobe). Поскольку бетонные стены силосов ограничивали возможности планировки квартир, архитекторы дополнили исторический объём остеклёнными эркерами и балконами. Мы оцениваем это как «локальное усиление и дополнение». Новая функция (жилье) потребовала инсоляции, которую невозможно было получить изнутри массива. Пристройка выполнена в современной архитектурной стилистике, что, по оценке автора, соответствует статье 13 Хартии: новые объёмы не умаляют историко-архитектурной ценности здания и отчётливо отличаются от первоначальной постройки (рисунок 2).

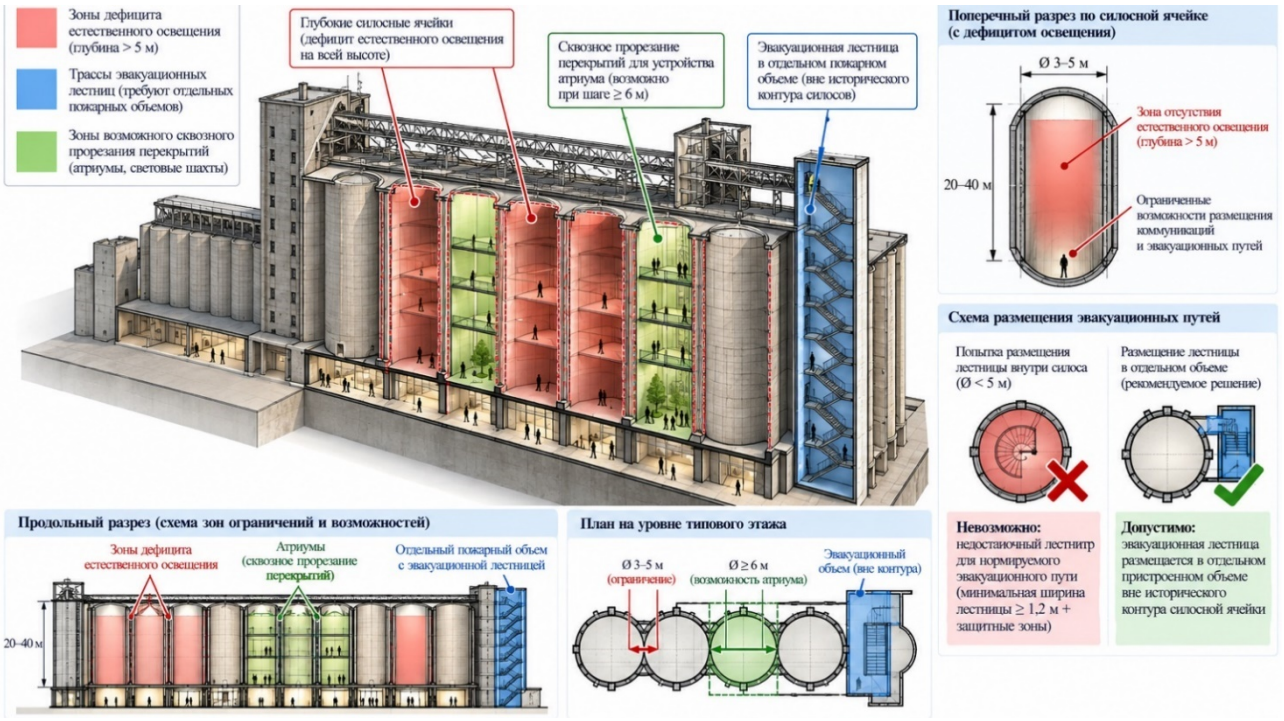


Рисунок 2 - Схема критических архитектурных ограничений при адаптации глубоких силосных корпусов (источник: разработано автором)

Оценка проектов по нашим критериям выявила прямую зависимость между выбранной функцией и степенью вмешательства в несущую систему. Если культурный центр (как Zeitz MOCAA или Docks de Rouen) может довольствоваться существующей структурой, используя силосы как изолированные залы, то офисная функция требует устройства сквозных горизонтальных пространств. Такое вмешательство относится к категории «существенная реконструкция», поскольку для прокладки коммуникаций и создания помещений со свободной планировкой требуется частично демонтировать железобетонные стены.

Энергетическая эффективность после модернизации также варьируется. Массивные бетонные стены обладают высокой теплоемкостью. В проектах, где архитекторы сохраняют глухие фасады и утепляют их изнутри (как в Silo Nordhavn), высокая тепловая инерция бетонных стен способствует уменьшению летнего перегрева. Однако это требует устройства приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией, поскольку естественное проветривание через узкие щели невозможно.

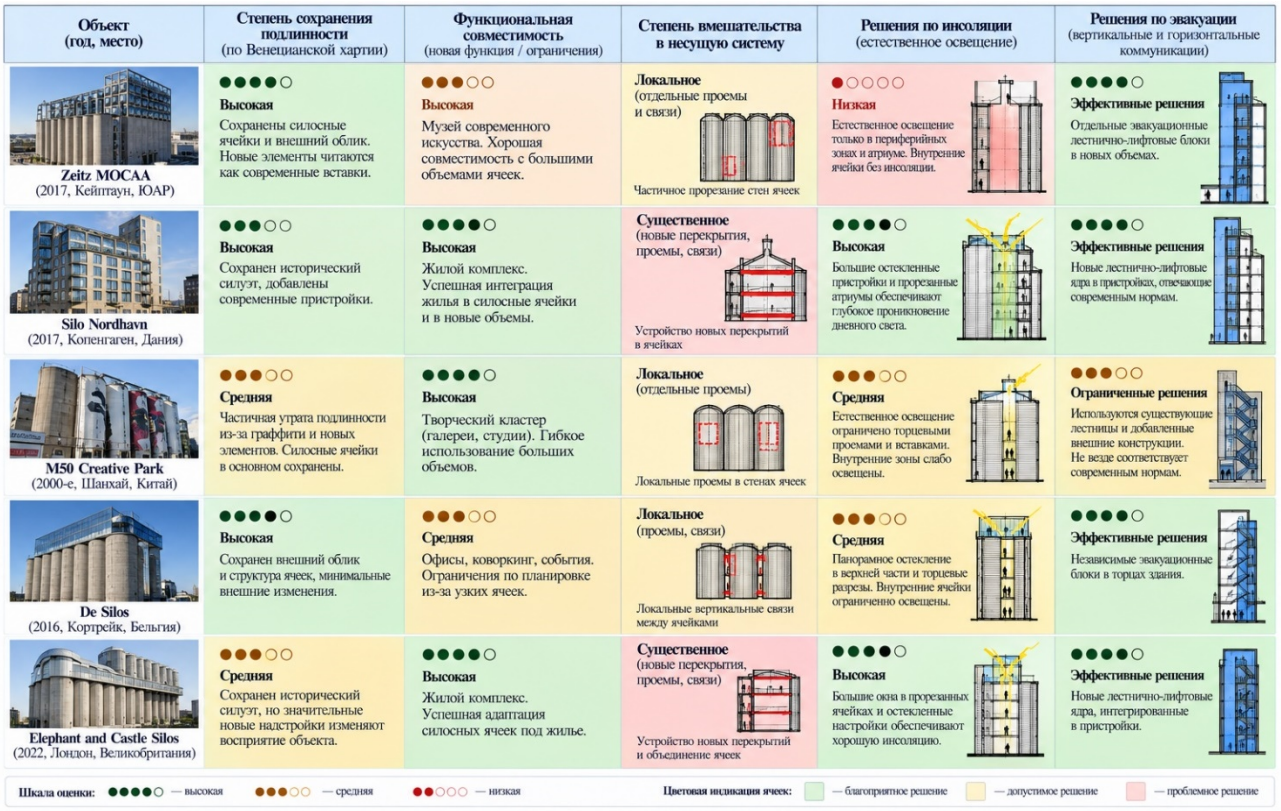


Рисунок 3 - Матрица оценки типологических решений на примере пяти углубленно анализируемых объектов (источник: разработано автором)

Опираясь на полученные данные и нормативную базу РФ (где объекты культурного наследия требуют сохранения не только фасадов, но и характерных объемно-пространственных структур), мы предлагаем три базовые типологические схемы реновации.

Первая схема — культурный центр или музей. Она применима для башенных элеваторов с широким шагом силосов. Архитектор сохраняет внешний контур и рабочую башню как доминанту. Внутри массива устраиваются анфилады выставочных залов, естественное освещение которых обеспечивается через существующие проёмы между силосами или зенитные фонари в кровле рабочей башни. Эвакуация решается за счет пристройки внешних стеклянных лифтовых объемов.

Вторая схема — жилье или апартаменты. Она требует отказа от сохранения внутреннего деления на ячейки. Здесь допустим частичный демонтаж внутренних перегородок для формирования двухуровневых лофтов. Ключевым

элементом становятся выносные металлические конструкции, на которые опираются балконы и эркеры. Фасады при этом очищаются и реставрируются, а новые объемы контрастируют с грубым бетоном.

Третья схема — офисный центр. Она наиболее сложна, так как требует устройства фальшполов и подвесных потолков для скрытия инженерных сетей. Мы предлагаем использовать пространство между группами силосов для устройства вертикальных световых шахт, а сами силосы превратить в переговорные комнаты или зоны неформального общения.

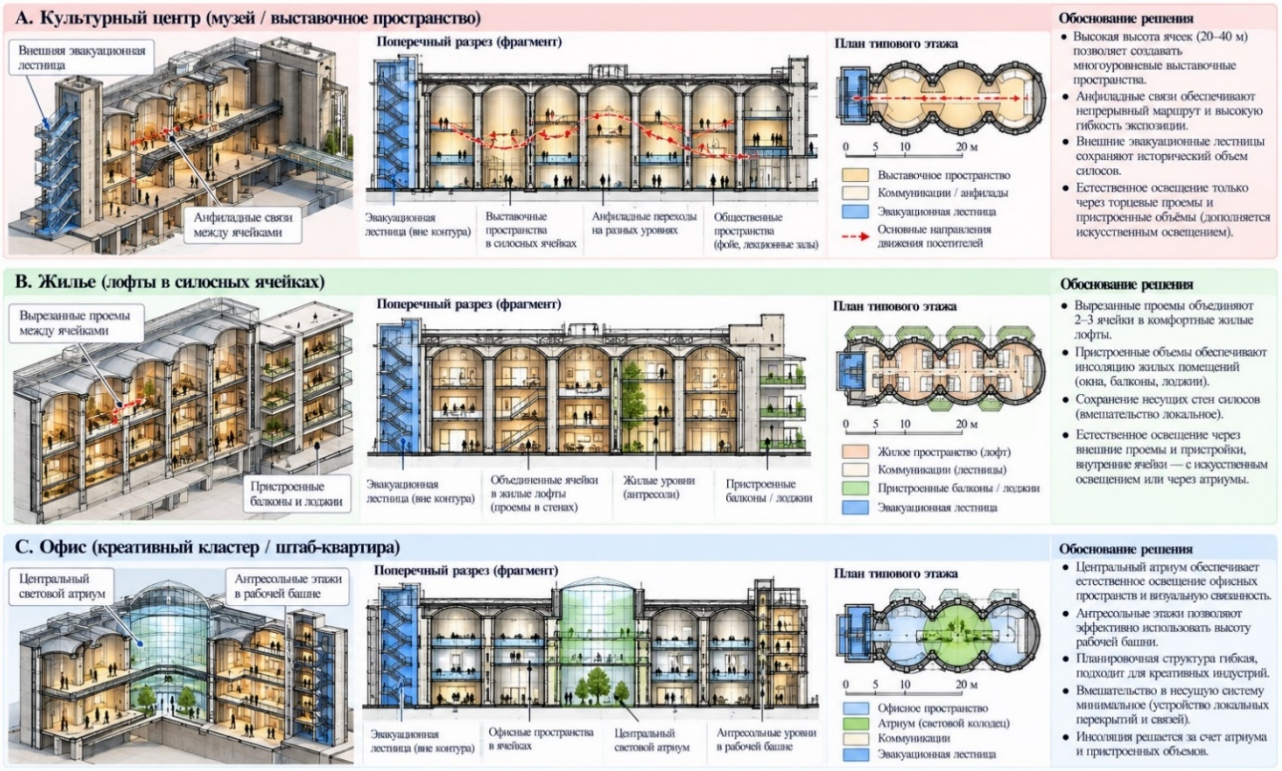


Рисунок 4 - Типологические схемы реновации элеватора в культурный центр, жилье и офис (источник: разработано автором)

Таким образом, архитектурно-типологическая трансформация элеваторов не сводится к простому косметическому обновлению. Это сложный процесс поиска баланса между жесткой инженерной логикой прошлого и новыми социальными потребностями. Предложенная типологическая матрица позволяет проектировщику на ранних стадиях определить, какой именно сценарий адаптации будет не только функционально состоятельным, но и этически корректным по отношению к исторической субстанции индустриального

памятника.

Выводы. В ходе работы автор приходит к выводу: дальнейшее развитие практики адаптации индустриального наследия требует фундаментального пересмотра устоявшихся подходов. Если ранее в профессиональной среде доминировал описательный метод, фокусирующийся преимущественно на эстетизации грубых форм и визуальном контрасте, то сегодня на первый план выходит строгая типологическая систематизация. Разработанная авторская матрица позволяет перевести процесс интеграции бывших зернохранилищ в городскую среду из плоскости интуитивного поиска в область научно обоснованного проектирования. Архитектор теперь опирается не на общие рекомендации, а на четкие морфологические индикаторы, что существенно снижает риски принятия ошибочных объемно-планировочных решений и минимизирует затраты на этапе предпроектной проработки.

При реконструкции таких сооружений архитектурная концепция служит средством согласования конструктивных ограничений с новыми функциональными требованиями. Проектировщику приходится постоянно сопоставлять жесткие параметры исходной инженерной логики с новыми социальными запросами. Предложенный в статье инструментарий дает возможность на самых ранних стадиях отсеивать заведомо утопичные сценарии. Понимание неразрывной связи между диаметром силоса и характером инсоляции сразу задает вектор для поиска нестандартных световых сценариев. Это позволяет избежать механического переноса решений, применяемых при реконструкции других типов промышленных зданий, и разрабатывать индивидуальные проекты с учётом особенностей конкретного объекта.

Вопросы этики взаимодействия с исторической средой приобретают в данном контексте особую остроту. Сохранение подлинности перестает трактоваться как консервация заброшенного состояния или создание музейного экспоната под стеклянным колпаком. Напротив, грамотное внедрение новой функции выступает действенным механизмом консервации, продлевающим

жизненный цикл памятника и возвращающим его в активный оборот. При этом любые внешние дополнения или внутренние перестройки должны нести на себе явный отпечаток современной эпохи, оставаясь визуально и физически отличимыми от оригинала. Такой подход обеспечивает непрерывность исторической ткани, где слои разных эпох вступают в продуктивный диалог, обогащая восприятие городского пространства.

Логичным продолжением начатой работы станет масштабирование предложенной методики на уровень городских агломераций. Выход за рамки отдельного здания позволяет интегрировать реконструированные элеваторы в качестве смысловых и планировочных ядер при формировании новых кварталов. Изучение их влияния на микроклимат прибрежных зон, а также разработка специфических нормативов для гибридных структур откроют новые горизонты для градостроительного моделирования. Таким образом, реконструкция зернохранилищ выходит за рамки узкоспециализированной инженерной задачи и становится направлением архитектурной практики, в рамках которого разрабатываются новые решения для городской среды.

Список литературы

1. Трибельская Е. Г. Культурно-образовательный кластер на базе исторического промышленного района в Осло // Архитектура и современные информационные технологии. — 2023. — № 2 (63). — С. 70–83. — DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-70-83.

2. Meng F., Zhi Y., Pang Y. Assessment of the Adaptive Reuse Potentiality of Industrial Heritage Based on Improved Entropy TOPSIS Method from the Perspective of Urban Regeneration // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 9. — Art. 7735. — DOI: 10.3390/su15097735.

3. Палий К. Р., Палий Р. Р. Политика и практика ревитализации индустриального наследия как фактор повышения качества городской среды Санкт-Петербурга // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Политология. — 2023. — Т. 25, № 3. — С. 614–629. — DOI: 10.22363/2313-1438-2023-25-3-614-

629.

4. Luo L., Cao Y. The Museum Method of Reusing Shanghai Waterfront Industrial Heritage: Continuation and Reconstruction of Urban Memory // Built Heritage. — 2023. — Vol. 7. — Art. 23. — DOI: 10.1186/s43238-023-00102-3.

5. Петрусенко Ю. В., Белова А. Ю. Историко-природный архитектурный комплекс «Парамоновских» складов в Ростове-на-Дону // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2024. — Т. 9, № 1. — С. 49–66. — DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-49-66.

6. Otamendi-Irizar I., Azpiri Albistegui A., Eizaguirre-Iribar A. Research Methodology for the Documentation and Analysis Phase of Industrial Architectural Heritage Preservation: The Case of “Nueva Cerámica de Orio” // Historical Archaeology. — 2024. — Vol. 58. — P. 67–89. — DOI: 10.1007/s41636-024-00489-5.

7. Вавилонская Т. В., Баклушина А. А. Адаптивные практики работы с индустриальным наследием в условиях исторического поселения // Innovative Project. — 2024. — Т. 9, № 16. — С. 98–108. — DOI: 10.17673/IP.2024.9.16.8.

8. Song J., Chen J., Yang X., Zhu Y. Research on Adaptive Reuse Strategy of Industrial Heritage Based on the Method of Social Network // Land. — 2024. — Vol. 13, No. 3. — Art. 383. — DOI: 10.3390/land13030383.

9. Головин С. В. Особенности современного опыта ревитализации промышленного наследия в городской среде // Современное строительство и архитектура. — 2025. — № 4 (59). — DOI: 10.60797/mca.2025.59.2.

10. Zhong D., Huang P., Xiong G., Li H. Renewal Strategies of Industrial Heritage Based on Placeness Theory: The Case of Guangzhou, China // Cities. — 2024. — Vol. 155. — Art. 105407. — DOI: 10.1016/j.cities.2024.105407.

11. Тарануха Н. Л., Ананин К. Ю. Адаптация бывших промышленных зданий города Ижевска к новым функциям // Жилищное строительство. — 2025. — № 8. — С. 45–51. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-8-45-51.

12. Ma Y., Roosli R., Cao Z., Zhang X., Gai Y., Ma Z. From Isolation to Integration:

A Methodological Review of Adaptive Reuse in Industrial Heritage Buildings // Energy and Buildings. — 2025. — Vol. 348. — Art. 116474. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116474.

13. Шупилова В. И., Соколова М. А. Алгоритм интеграции бывшепромышленных территорий в городскую ткань (на примере Нижнего Новгорода) // Архитектура и современные информационные технологии. — 2025. — № 3 (72). — С. 311–329. — DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-311-329.

14. Zhang J., Jiang N., Du Y., Chung T. Unlocking Multiple Potentials: A Data-Driven Framework for Adaptive Reuse of Industrial Heritage in Changzhou, China // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. — 2025. — Опубликовано онлайн 12 ноября 2025 г. — DOI: 10.1080/13467581.2025.2587250.

15. Майорова А. В., Пономарев Е. С. Перспективы комплексной реновации промышленных территорий в арт-кластеры // Строительство и архитектура. — 2026. — Т. 14, № 2. — Art. C0040. — DOI: 10.29039/2308-0191-2026-14-2-C0040.

16. Shieh E. Industrial Exaptation: Mono-Functional Industrial Relics and Their Capacity for Adaptive Multi-Performative Reinvention, a Case Study Analysis // Land. — 2025. — Vol. 14, No. 12. — Art. 2316. — DOI: 10.3390/land14122316.

17. Ткаченко С. Г. Современная практика ревитализации и устойчивого развития индустриальных ландшафтов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. — 2026. — Т. 11, № 5. — С. 75–85. — DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-75-85.

18. Baranowska-Deptuła M. Adaptive Reuse of Industrial Heritage in Łódź as a Tool for Reintegrating Urban Spatial Structure // Przegląd Geograficzny. — 2025. — Vol. 97, No. 3. — P. 327–341. — DOI: 10.7163/PrzG.2025.3.5.

19. Sun L., Guardigli L. Activating Modern Industrial Heritage Conservation. The Revitalization of Toppila Silo in the Perspective of Alvar Aalto’s Architecture // Humanities and Social Sciences Communications. — 2026. — Vol. 13. — Art. 196. — DOI: 10.1057/s41599-026-06493-9.

20. Kurtoğlu D. From Reuse Potential to Reuse Success: Developing and Applying the

Adaptive Reuse Success Index for Industrial Heritage Buildings // Buildings. — 2026. — Vol. 16, No. 15. — Art. 3072. — DOI: 10.3390/buildings16153072.

21. Alavi P., Jahanbakhsh Mashhadi A., Rouhparvar K. A Process Model for Industrial Heritage Adaptive Reuse: Integrating Environmental Remediation and Structural Assessment // International Journal of Building Pathology and Adaptation. — 2026. — Vol. 44, No. 7. — P. 1843–1861. — DOI: 10.1108/IJBPA-09-2025-0244.

References

1. Tribel`skaya E. G. Kul`turno-obrazovatel`ny`j klaster na baze istoricheskogo promy`shlennogo rajona v Oslo // Arxitektura i sovremenny`e informacionny`e texnologii. — 2023. — № 2 (63). — S. 70–83. — DOI: 10.24412/1998-4839-2023-2-70-83.

2. Meng F., Zhi Y., Pang Y. Assessment of the Adaptive Reuse Potentiality of Industrial Heritage Based on Improved Entropy TOPSIS Method from the Perspective of Urban Regeneration // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 9. — Art. 7735. — DOI: 10.3390/su15097735.

3. Palij K. R., Palij R. R. Politika i praktika revitalizacii industrial`nogo naslediya kak faktor povy`sheniya kachestva gorodskoj sredy` Sankt-Peterburga // Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby` narodov. Seriya: Politologiya. — 2023. — T. 25, № 3. — S. 614–629. — DOI: 10.22363/2313-1438-2023-25-3-614-629.

4. Luo L., Cao Y. The Museum Method of Reusing Shanghai Waterfront Industrial Heritage: Continuation and Reconstruction of Urban Memory // Built Heritage. — 2023. — Vol. 7. — Art. 23. — DOI: 10.1186/s43238-023-00102-3.

5. Petrusenko Yu. V., Belova A. Yu. Istoriko-prirodny`j arxitekturny`j kompleks «Paramonovskix» skladov v Rostove-na-Donu // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuxova. — 2024. — T. 9, № 1. — S. 49–66. — DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-49-66.

6. Otamendi-Irizar I., Azpiri Albistegui A., Eizaguirre-Iribar A. Research Methodology for the Documentation and Analysis Phase of Industrial Architectural Heritage Preservation: The Case of “Nueva Cerámica de Orio” // Historical Archaeology. —

2024. — Vol. 58. — P. 67–89. — DOI: 10.1007/s41636-024-00489-5.

7. Vavilonskaya T. V., Baklushina A. A. Adaptivny`e praktiki raboty` s industrial`ny`m naslediem v usloviyax istoricheskogo poseleniya // Innovative Project. — 2024. — T. 9, № 16. — S. 98–108. — DOI: 10.17673/IP.2024.9.16.8.

8. Song J., Chen J., Yang X., Zhu Y. Research on Adaptive Reuse Strategy of Industrial Heritage Based on the Method of Social Network // Land. — 2024. — Vol. 13, No. 3. — Art. 383. — DOI: 10.3390/land13030383.

9. Golovin S. V. Osobennosti sovremennogo opy`ta revitalizacii promy`shlennogo naslediya v gorodskoj srede // Sovremennoe stroitel`stvo i arxitektura. — 2025. — № 4 (59). — DOI: 10.60797/mca.2025.59.2.

10. Zhong D., Huang P., Xiong G., Li H. Renewal Strategies of Industrial Heritage Based on Placeness Theory: The Case of Guangzhou, China // Cities. — 2024. — Vol. 155. — Art. 105407. — DOI: 10.1016/j.cities.2024.105407.

11. Taranuxa N. L., Ananin K. Yu. Adaptaciya by`vshix promy`shlenny`x zdanij goroda Izhevska k novy`m funkciyam // Zhilishhnoe stroitel`stvo. — 2025. — № 8. — S. 45–51. — DOI: 10.31659/0044-4472-2025-8-45-51.

12. Ma Y., Roosli R., Cao Z., Zhang X., Gai Y., Ma Z. From Isolation to Integration: A Methodological Review of Adaptive Reuse in Industrial Heritage Buildings // Energy and Buildings. — 2025. — Vol. 348. — Art. 116474. — DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116474.

13. Shupilova V. I., Sokolova M. A. Algoritm integracii by`vshepromy`shlenny`x territorij v gorodskuyu tkan` (na primere Nizhnego Novgoroda) // Arxitektura i sovremenny`e informacionny`e texnologii. — 2025. — № 3 (72). — S. 311–329. — DOI: 10.24412/1998-4839-2025-3-311-329.

14. Zhang J., Jiang N., Du Y., Chung T. Unlocking Multiple Potentials: A Data-Driven Framework for Adaptive Reuse of Industrial Heritage in Changzhou, China // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. — 2025. — Опубликовано онлайн 12 ноября 2025 г. — DOI: 10.1080/13467581.2025.2587250.

15. Majorova A. V., Ponomarev E. S. Perspektivy` kompleksnoj renovacii

promy`shlenny`x territorij v art-klastery` // Stroitel`stvo i arxitektura. — 2026. — T. 14, № 2. — Art. C0040. — DOI: 10.29039/2308-0191-2026-14-2-C0040.

16. Shieh E. Industrial Exaptation: Mono-Functional Industrial Relics and Their Capacity for Adaptive Multi-Performative Reinvention, a Case Study Analysis // Land. — 2025. — Vol. 14, No. 12. — Art. 2316. — DOI: 10.3390/land14122316.

17. Tkachenko S. G. Sovremennaya praktika revitalizacii i ustojchivogo razvitiya industrial`ny`x landshaftov // Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo texnologicheskogo universiteta im. V. G. Shuxova. — 2026. — T. 11, № 5. — S. 75–85. — DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-5-75-85.

18. Baranowska-Deptuła M. Adaptive Reuse of Industrial Heritage in Łódź as a Tool for Reintegrating Urban Spatial Structure // Przegląd Geograficzny. — 2025. — Vol. 97, No. 3. — P. 327–341. — DOI: 10.7163/PrzG.2025.3.5.

19. Sun L., Guardigli L. Activating Modern Industrial Heritage Conservation. The Revitalization of Toppila Silo in the Perspective of Alvar Aalto's Architecture // Humanities and Social Sciences Communications. — 2026. — Vol. 13. — Art. 196. — DOI: 10.1057/s41599-026-06493-9.

20. Kurtoğlu D. From Reuse Potential to Reuse Success: Developing and Applying the Adaptive Reuse Success Index for Industrial Heritage Buildings // Buildings. — 2026. — Vol. 16, No. 15. — Art. 3072. — DOI: 10.3390/buildings16153072.

21. Alavi P., Jahanbakhsh Mashhadi A., Rouhparvar K. A Process Model for Industrial Heritage Adaptive Reuse: Integrating Environmental Remediation and Structural Assessment // International Journal of Building Pathology and Adaptation. — 2026. — Vol. 44, No. 7. — P. 1843–1861. — DOI: 10.1108/IJBPA-09-2025-0244.

Статья поступила в редакцию 26.03.2026; одобрена после рецензирования 30.04.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 26.03.2026; approved after peer review 30.04.2026; accepted for publication 28.08.2026.

Научная статья
УДК 72.01:159.9

ОЦЕНКА ВОСПРИЯТИЯ ГЕОМЕТРИИ ИНТЕРЬЕРНОГО ПРОСТРАНСТВА В ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЕ

Чепурная Любовь Александровна, кандидат технических наук, Донбасский государственный технический университет, Россия, Алчевск, la.chepurnaya.dstu@mail.ru;

Магдеев Радик Гильфанович, кандидат технических наук, старший преподаватель, Ульяновский государственный технический университет, Россия, Ульяновск, r_magdeev@mail.ru

Аннотация. Традиционное проектирование интерьеров часто опирается на интуитивные решения, что ограничивает возможности создания пространств, способствующих поддержанию психофизиологического здоровья человека. Данное исследование направлено на установление количественных связей между геометрическими параметрами помещения и бессознательными реакциями центральной нервной системы. Авторы провели эксперимент с участием 42 добровольцев, используя технологии виртуальной реальности для строгого контроля переменных. В качестве независимых факторов выступали высота потолка, кривизна ограждающих конструкций и симметрия плана. Состояние участников непрерывно регистрировалось посредством синхронного сбора данных электроэнцефалографии, ай-трекинга и кожно-гальванической реакции. Особое внимание уделено синхронизации мультимодальных потоков, что позволило точно привязать физиологические отклики к конкретным визуальным триггерам. Анализ спектральной плотности мозговых ритмов показал, что криволинейные формы стен достоверно снижают когнитивную нагрузку, о чем свидетельствует рост соотношения альфа- и бета-волн. В то же время асимметричная планировка и чрезмерная высота потолков сопровождаются повышением когнитивного напряжения и усилением активности теменных и лобных областей мозга, связанных с пространственной

ориентацией. Полученные данные свидетельствуют о влиянии геометрических характеристик интерьера на характер нейронной активности. Результаты работы формируют доказательную базу для перехода к нормативному проектированию интерьеров, ориентированному на сохранение ментальных ресурсов человека.

Ключевые слова: нейроархитектура, проектирование интерьеров, электроэнцефалография, виртуальная реальность, пространственная геометрия, когнитивная нагрузка, ай-трекинг, психофизиология среды.

Original article

EVALUATION OF PERCEPTION OF GEOMETRY OF INTERIOR SPACE IN A VIRTUAL ENVIRONMENT

Chepurnaia Liubov Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Donbas State Technical University, Alchevsk, Russia, la.chepurnaya.dstu@mail.ru;

Magdeev Radik Gilfanovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia, r_magdeev@mail.ru

Abstract. Traditional interior design often relies on intuitive decisions, limiting the creation of environments that objectively support the psychophysiological well-being of users. This study aimed to establish quantitative links between the geometric parameters of a room and unconscious responses of the central nervous system. The authors conducted an experiment with 42 volunteers, using virtual reality technology to strictly control variables. Ceiling height, curvature of the building envelope, and floor plan symmetry served as independent factors. Participants' states were continuously monitored through synchronous collection of electroencephalography, eye tracking, and galvanic skin response data. Particular attention was paid to synchronizing multimodal data streams, allowing for precise linking of physiological responses to specific visual triggers. Analysis of the spectral density of brainwaves revealed that curved wall shapes significantly reduced cognitive load, as evidenced by an increased ratio of alpha and beta waves. At the same time, asymmetrical plans and

extreme ceiling heights provoke latent tension, forcing the parietal and frontal lobes of the brain to switch to active spatial search mode. The obtained data confirm that architectural geometry directly dictates the operating mode of neural networks. The results of the study provide evidence for a transition to normative interior design focused on preserving human mental resources.

Keywords: neuroarchitecture, interior design, electroencephalography, virtual reality, spatial geometry, cognitive load, eye tracking, environmental psychophysiology.

Введение. Долгое время проектирование внутренних пространств опиралось преимущественно на интуитивные решения архитекторов и субъективные оценки заказчиков. Формирование комфортной среды воспринималось, скорее, как искусство, нежели как точная дисциплина, требующая строгого эмпирического обоснования. Однако накопленный практический опыт не всегда отвечает современным требованиям к созданию архитектурной среды, учитывающей физиологические потребности человека [1-3]. В этой связи на передний план выходит междисциплинарное направление, объединяющее когнитивную психологию, нейрофизиологию и градостроительство. Это направление позволяет оценивать качество архитектурной среды на основе измеряемых физиологических показателей, что соответствует современным подходам к архитектурному проектированию [4], [5].

Ключевым фактором, формирующим психоэмоциональный фон пользователя, выступает геометрическая организация интерьера. Соотношение длины и ширины помещения, высота потолков, конфигурация световых проемов и геометрия ограждающих конструкций определяют особенности зрительного и кинестетического восприятия пространства [6-8]. Традиционные социологические опросы и анкетирование, долгое время служившие основным инструментом оценки, обладают критическим недостатком. Они фиксируют

лишь осознанные, сформулированные постфактум реакции, которые часто искажаются социальными установками респондентов или особенностями их памяти. При этом физиологические реакции на изменение масштаба и пропорций пространства не всегда отражаются в словесных оценках участников, что обусловливает необходимость применения дополнительных методов исследования [9], [10].

Преодолеть этот разрыв призвана нейроархитектура, рассматривающая искусственную среду не как статичный фон, а как активный стимул, непрерывно модулирующий работу центральной нервной системы. Исследователи в этой области исходят из фундаментального постулата: эволюционное развитие человеческого мозга происходило в тесной связи с природными ландшафтами, поэтому закрытые антропогенные объемы с их жесткими линиями и специфической геометрией требуют от организма постоянных когнитивных усилий для ориентации [11-13]. Уровень когнитивного напряжения зависит от того, насколько пространственная структура помещения соответствует особенностям зрительного восприятия и пространственной ориентации человека.

Фундаментальным условием перехода к доказательному проектированию становится отказ от умозрительных конструкций в пользу непрерывного аппаратного мониторинга. Без использования специализированного диагностического комплекса, включающего электроэнцефалографию, айтрекинг и регистрацию кожно-гальванической реакции, любые выводы о влиянии архитектуры остаются гипотезами. Электроэнцефалография фиксирует изменения в частотных диапазонах мозговой активности, позволяя отследить моменты перехода от расслабленного состояния к напряженному. Одновременное отслеживание траектории взгляда дает понимание того, какие именно зоны интерьера выступают триггерами, вызывающими эту реакцию, а измерение электродермальной активности объективизирует уровень скрытого стресса или эмоционального вовлечения, не доступный для самонаблюдения

[14].

Таким образом, цель настоящего исследования заключается в изучении восприятия геометрических параметров помещения на основе синхронной регистрации физиологических показателей. Интеграция данных о зрительном внимании, вегетативной нервной системе и электрической активности коры головного мозга позволяет выстроить причинно-следственные связи между конкретными геометрическими характеристиками помещения и бессознательными реакциями организма. Такой подход расширяет теоретическую основу архитектурного проектирования и создает предпосылки для разработки нормативов, направленных на обеспечение психофизиологического комфорта пользователей архитектурной среды.

Обзор источников литературы. Традиционный подход к проектированию внутренних пространств долгое время опирался на интуитивные решения и субъективные оценки заказчиков. Формирование комфортной среды воспринималось преимущественно как искусство, лишенное строгого эмпирического обоснования. Ситуация начала меняться в конце XX века, когда исследователи, вслед за Роджером Ульрихом, продемонстрировали, что физическое окружение способно напрямую влиять на физиологические процессы восстановления организма [15-17]. Этот сдвиг парадигмы заложил фундамент для нейроархитектуры — междисциплинарной области, изучающей воздействие искусственной среды на центральную нервную систему.

Современные исследования активно используют методы когнитивной нейронауки для объективизации архитектурных решений. Например, работы в области параметрического проектирования показывают, что оптимизация таких элементов, как размер оконных проемов и колористическое решение интерьера, способна достоверно снижать уровень стресса, регистрируемый посредством электроэнцефалографии (ЭЭГ). При этом авторы подобных экспериментов часто ограничиваются двумерными или упрощенными трехмерными параметрами [18], [19]. Изучение влияния более сложных геометрических характеристик,

таких как кривизна ограждающих конструкций или пространственная симметрия, остается фрагментарным.

Применение технологий виртуальной реальности (VR) в сочетании с биометрической регистрацией позволило преодолеть ограничения натурных экспериментов, обеспечивая строгий контроль переменных. Исследователи доказали, что изменение высоты потолка и пропорций помещения достоверно модулирует соотношение альфа- и бета-ритмов мозга, отражая переход от состояния расслабления к когнитивному напряжению [11], [14], [20]. Однако существующие методические протоколы зачастую не учитывают комплексное взаимодействие сразу нескольких геометрических факторов. Кроме того, во многих исследованиях отмечаются недостаточная статистическая мощность и отсутствие подробного описания артефактов, возникающих при обработке нейрофизиологических данных. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела путем оценки комбинированного влияния высоты потолка, кривизны стен и симметрии плана на психофизиологические реакции человека.

Методологическая и теоретическая база исследования. Экспериментальная работа проводилась в строгом соответствии с Хельсинкской декларацией и получила одобрение локального этического комитета. Все участники предоставили письменное информированное согласие. Критерии включения предполагали возраст от 20 до 45 лет, нормальное или скорректированное до единицы зрение и отсутствие неврологических или психиатрических заболеваний в анамнезе. Из выборки исключались лица, принимающие психоактивные препараты, а также участники, продемонстрировавшие высокую степень киберболезни в ходе пилотного тестирования.

Планирование объёма выборки осуществлялось с учётом факторной структуры экспериментального исследования и повторного предъявления участникам визуально-пространственных условий. Первоначальная оценка

численности, выполненная для упрощённой схемы межгруппового сравнения, не использовалась в качестве окончательного критерия достаточности выборки. Для уточнения планируемого объёма применялся априорный анализ статистической мощности в программе G*Power 3.1 применительно к смешанной модели дисперсионного анализа с повторными измерениями. При принятом умеренном размере эффекта f = 0,25, уровне значимости α = 0,05 и целевой статистической мощности 1 − β = 0,80 в расчётной конфигурации была получена минимальная численность 38 участников. Фактический объём исследованной выборки составил 42 человека, включая 21 женщину и 21 мужчину; средний возраст участников — 28,4 ± 4,2 года. Таким образом, расчётная численность 38 и фактическая численность 42 относятся к различным этапам организации одного исследования и не представляют собой самостоятельные или объединённые выборки. Пол и возраст участников учитывались при статистическом анализе в качестве ковариат.

Независимые переменные формировали факторный дизайн 3×2×2, включающий 12 уникальных условий. Первым фактором выступала высота потолка (2,4 м / 3,5 м / 5,0 м). Вторым фактором являлась кривизна стен (прямолинейные / криволинейные, с радиусом скругления внутренних углов 1,5 м). Третьим фактором выбрана симметрия плана (симметричный / асимметричный). Функциональное зонирование, расстановка мебели, материалы отделки, освещенность (300 лк на уровне пола) и цветовая температура (4000 К) оставались строго идентичными во всех сценариях, что позволяло изолировать влияние исключительно геометрических параметров.

Стимульный материал создавался в среде Unreal Engine 5. Для минимизации искажений восприятия использовались фотореалистичные текстуры и физически корректный рендеринг. Перед основным экспериментом было проведено пилотное исследование на 5 участниках, позволившее оптимизировать графику, снизить полигональную нагрузку и адаптировать поле зрения (FOV) до 90 градусов для предотвращения симуляторной болезни.

Степень киберболезни контролировалась опросником SSQ до и после каждой сессии.

В качестве основного физиологического показателя было выбрано соотношение спектральной мощности альфа- (8–12 Гц) и бета-ритмов (13–30 Гц) в лобных и теменных отведениях, используемое для оценки соотношения состояний расслабления и когнитивного напряжения. Остальные показатели (параметры ай-трекинга, кожно-гальваническая реакция, субъективная оценка по шкале PANAS) рассматривались как вторичные.

Регистрация ЭЭГ осуществлялась с помощью 32-канального беспроводного усилителя. Электроды располагались по международной системе «10-20». В начале каждой сессии в течение 3 минут регистрировалась исходная ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования с открытыми глазами. Предварительная обработка сигнала включала полосовую фильтрацию (0,1–30 Гц), применение независимого компонентного анализа (ICA) для удаления глазодвигательных и мышечных артефактов. Непрерывная запись сегментировалась на эпохи по 2 секунды; эпохи с амплитудой, превышающей ±50 мкВ, автоматически исключались из дальнейшего анализа.

Синхронизация потоков данных ЭЭГ, ай-трекинга (Tobii Pro Spectrum) и регистрации кожно-гальванической реакции (GSR) обеспечивалась посредством протокола Lab Streaming Layer (LSL), что позволяло точно привязывать физиологические отклики к конкретным кадрам виртуального пространства.

Процедура основного эксперимента строилась по принципу латинского квадрата для уравнивания эффектов порядка предъявления. Каждая из 12 сцен предъявлялась участникам в течение 20 секунд. Перед предъявлением предусматривались 15-секундный период адаптации в нейтральном коридоре и 30-секундный период отдыха с фиксацией взгляда на кресте. Для контроля непроизвольного отвлечения внимания между блоками вводилась короткая когнитивная задача на переключение.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ первичного

показателя — соотношения альфа/бета ритмов - выявил сложную картину взаимодействия геометрических факторов. Статистическая обработка проводилась с применением смешанной модели ANOVA с поправкой Бонферрони для множественных сравнений (таблица 1).

Таблица 1 - Матрица факторного дизайна и усредненные значения первичного показателя (соотношение Альфа/Бета)

Высота потолка	Кривизна стен	Симметрия плана	Условие	Соотношение Альфа/Бета (M ± SD)
2,4 м	Прямолинейные	Симметричный	1	1,12 ± 0,14
2,4 м	Прямолинейные	Асимметричный	2	0,94 ± 0,18
2,4 м	Криволинейные	Симметричный	3	1,35 ± 0,12
2,4 м	Криволинейные	Асимметричный	4	1,18 ± 0,15
3,5 м	Прямолинейные	Симметричный	5	1,28 ± 0,16
3,5 м	Прямолинейные	Асимметричный	6	1,05 ± 0,19
3,5 м	Криволинейные	Симметричный	7	1,62 ± 0,11
3,5 м	Криволинейные	Асимметричный	8	1,41 ± 0,14
5,0 м	Прямолинейные	Симметричный	9	1,15 ± 0,17
5,0 м	Прямолинейные	Асимметричный	10	0,88 ± 0,21
5,0 м	Криволинейные	Симметричный	11	1,48 ± 0,13
5,0 м	Криволинейные	Асимметричный	12	1,22 ± 0,16

Источник: разработано авторами.

Сопоставление показателей электроэнцефалографической активности выявило статистически значимые различия соотношения альфа- и бета-компонент между условиями предъявления криволинейных и прямолинейных пространственных конфигураций ($F(1, 40) = 42,6$; $p < 0,001$). Наиболее выраженные различия наблюдались в сценариях с высотой потолка 3,5 м. При анализе асимметричных планировочных решений также зарегистрировано изменение исследуемого спектрального показателя ($F(1, 40) = 28,3$; $p < 0,001$) (рисунок 1). Полученные данные характеризуют различия нейрофизиологических реакций на рассматриваемые конфигурации интерьерного пространства. Вместе с тем соотношение альфа- и бета-активности не является диагностическим показателем когнитивной нагрузки или эмоционального состояния, поэтому его изменения интерпретируются во взаимосвязи с остальными психофизиологическими и поведенческими характеристиками исследования.

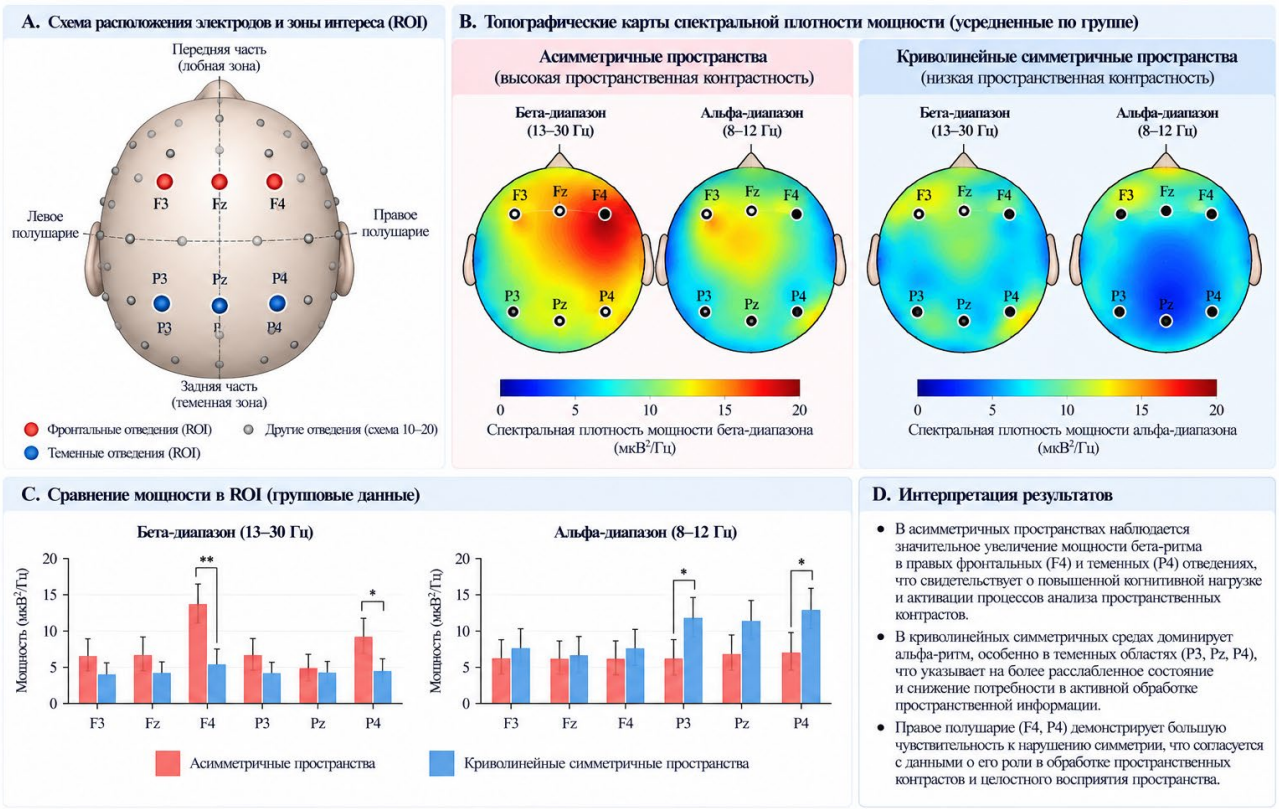


Рисунок 1 - Топология отведений ЭЭГ и зоны интереса (ROI) (источник: разработано авторами)

Влияние высоты потолка оказалось нелинейным. Если переход от 2,4 м к 3,5 м способствовал достоверному росту альфа-активности, то дальнейшее увеличение до 5,0 м приводило к обратному эффекту — снижению соотношения и росту бета-ритма. Вероятно, чрезмерная высота потолка в замкнутом помещении при отсутствии четких визуальных ориентиров вызывает пространственную дезориентацию и повышает когнитивную нагрузку, связанную с ориентацией в пространстве (рисунок 2).

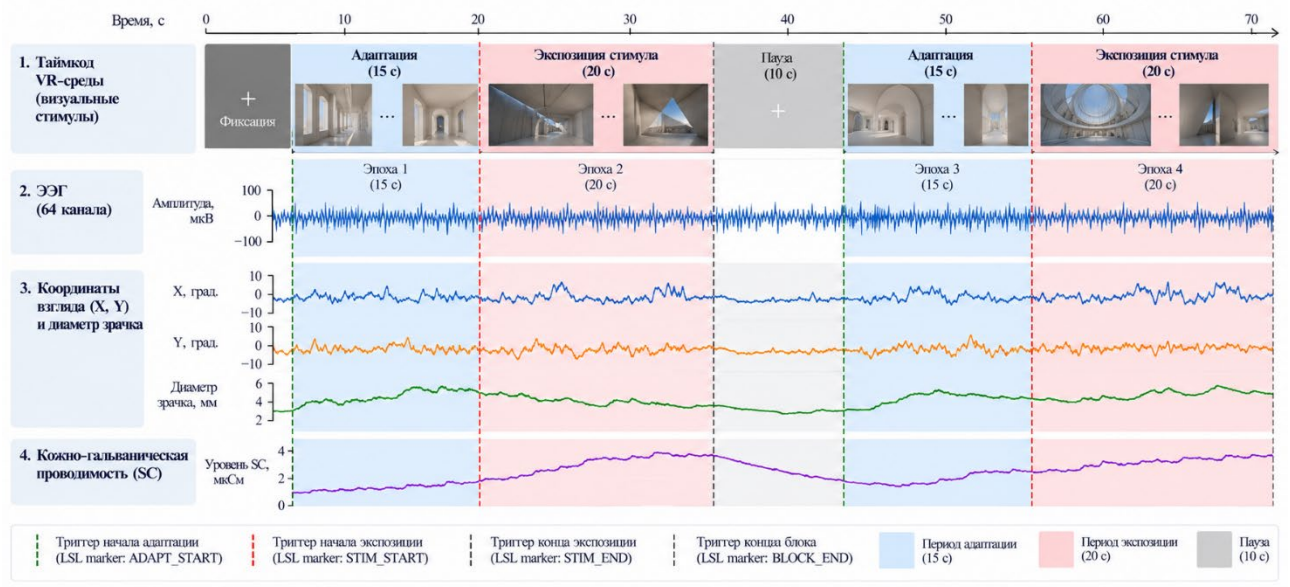


Рисунок 2 - Временная шкала синхронизации мультимодальных данных (источник: разработано авторами)

Данные ай-трекинга дополнили нейрофизиологическую картину. В пространствах с криволинейными стенами участники демонстрировали меньшее количество саккад и более длительное время фиксации на удаленных углах помещения (таблица 2).

Таблица 2 - Результаты смешанной модели ANOVA для вторичных показателей

Зависимая переменная	Фактор	F-значение	p-значение	Частная эта-квадрат (η^2_p)
Частота саккад (Гц)	Кривизна стен	18,45	< 0,001	0,31
	Симметрия	9,12	0,004	0,18
Уровень GSR (мкСм)	Высота потолка	12,77	< 0,001	0,24
	Кривизна × Симметрия	5,88	0,019	0,12
PANAS (Негативный аффект)	Симметрия	22,14	< 0,001	0,35

Источник: разработано авторами.

Снижение частоты саккад в интерьерах с криволинейными стенами указывает на уменьшение интенсивности зрительного обследования пространства при восприятии плавных переходов между поверхностями. При этом уменьшается необходимость в постоянной обработке резких изменений направления линий и поверхностей, что способствует снижению когнитивной

нагрузки. Асимметричный план, напротив, увеличивал количество хаотичных переводов взгляда, что коррелировало с ростом уровня кожно-гальванической реакции — объективного маркера вегетативного возбуждения (рисунок 3).

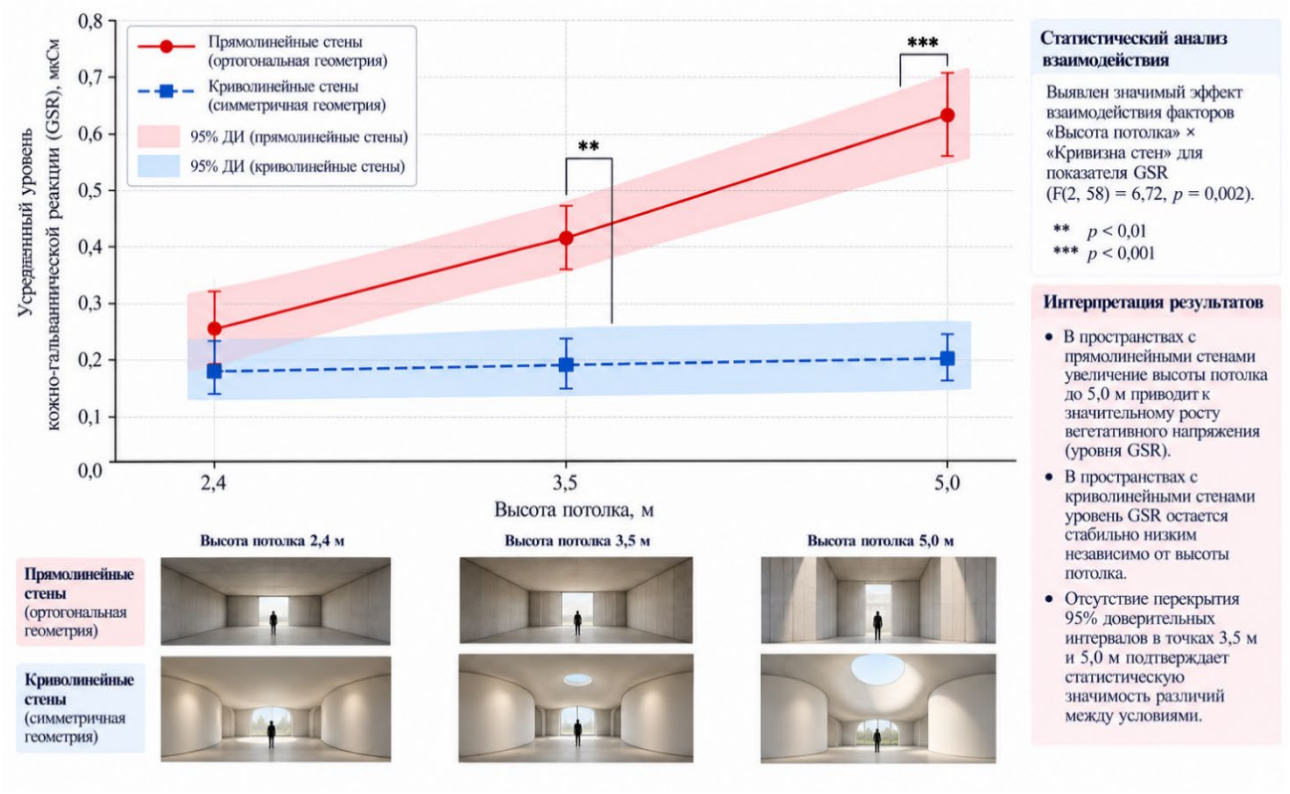


Рисунок 3 - График взаимодействия факторов «Высота потолка» и «Кривизна стен» для показателя GSR (источник: разработано авторами)

Субъективные оценки по шкале PANAS подтвердили объективные данные. Участники ассоциировали асимметричные пространства с повышенным уровнем тревожности и усталости. При этом прямая связь между субъективным отчетом и физиологическими данными наблюдалась не всегда: в условиях высоты 5,0 м с прямолинейными стенами участники часто оценивали пространство как «впечатляющее» и «воздушное», тогда как ЭЭГ и GSR фиксировали скрытое когнитивное напряжение и вегетативное возбуждение. Это расхождение подчеркивает ограниченность исключительно опросных методов в архитектурной психологии и доказывает необходимость аппаратной верификации пространственных гипотез (рисунок 4).

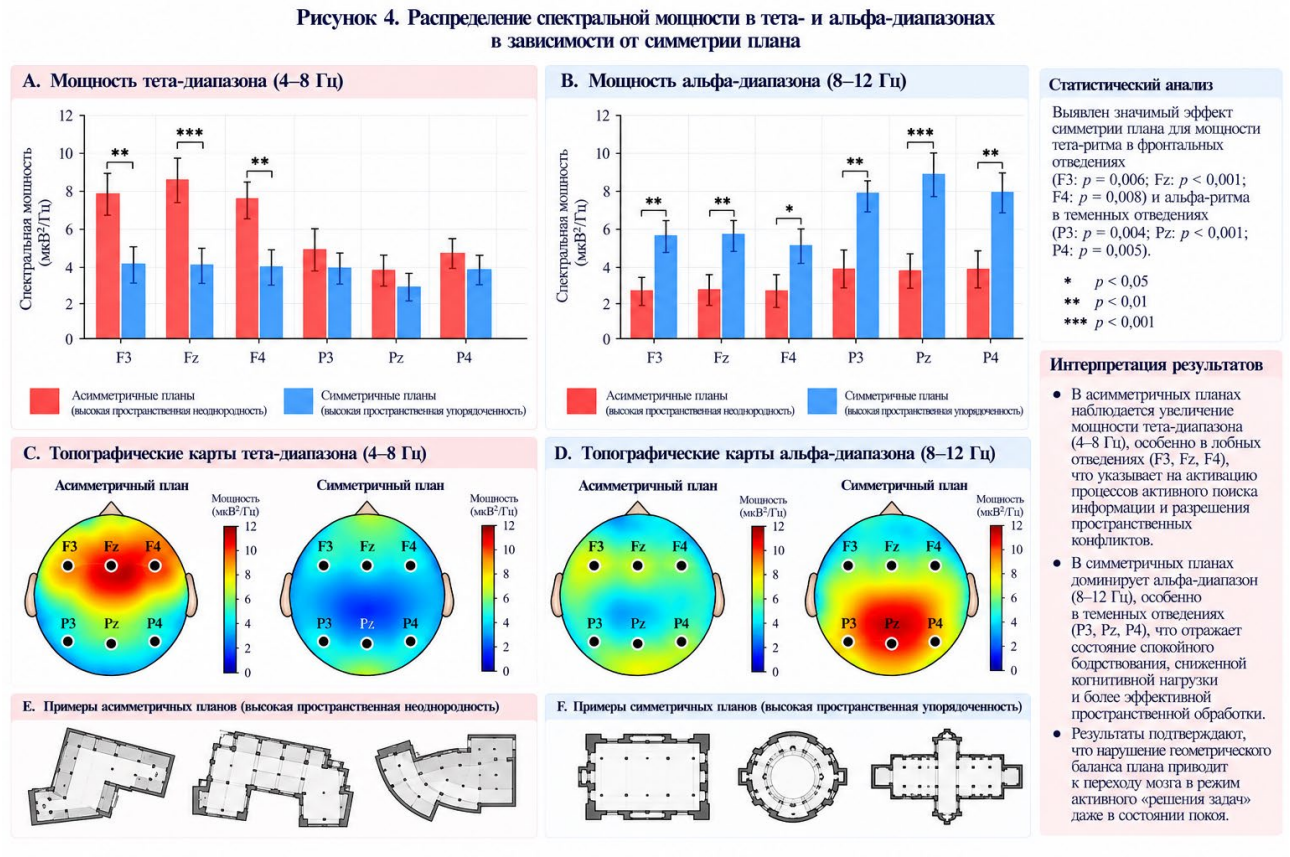


Рисунок 4 - Распределение спектральной мощности в тета- и альфа-диапазонах в зависимости от симметрии плана (источник: разработано авторами)

Результаты проведенного эксперимента позволяют глубже понять механизмы, посредством которых архитектурная геометрия модулирует работу нервной системы. Выявленное снижение когнитивной нагрузки при восприятии криволинейных форм, по-видимому, связано с особенностями эволюционного развития зрительной коры. Природные ландшафты редко содержат идеальные прямые линии и резкие углы; соответственно, нейронные сети, отвечающие за обработку визуальной информации, оптимизированы для распознавания плавных кривых. Закругленные углы и изогнутые стены формируют более плавную зрительно воспринимаемую структуру пространства, которая не требует постоянного изменения направления взгляда. Это подтверждается снижением частоты саккад и ростом альфа-ритма, что в совокупности указывает на состояние расслабленного внимания.

Эффект высоты потолка, наблюдаемый в нашем исследовании, требует отдельного осмысления. Если умеренное увеличение высоты (до 3,5 м)

способствует психологическому комфорту, вероятно, за счет активации абстрактного мышления и чувства свободы, то экстремальная высота (5,0 м) в замкнутом объеме без визуального членения пространства вызывает дезориентацию. Теменная доля, отвечающая за пространственную навигацию и оценку масштаба, вынуждена тратить дополнительные ресурсы на поддержание чувства безопасности, что отражается в росте бета-активности и вегетативного напряжения.

Асимметрия плана выступает мощным фактором когнитивной мобилизации. Человеческий мозг обладает выраженной склонностью к поиску паттернов и симметрии. Нарушение геометрического баланса воспринимается как потенциальная ошибка или нестабильность среды, что запускает механизм ориентировочного рефлекса. Активация тета-ритма в лобных долях в асимметричных пространствах прямо указывает на то, что участник неосознанно пытается «решить» пространственную задачу, восстановить баланс. Для жилых и рекреационных интерьеров, где приоритетом является восстановление психических ресурсов, подобная скрытая когнитивная нагрузка является нежелательной. Однако в общественных и рабочих пространствах, где необходимы концентрация внимания и аналитическая деятельность, умеренная асимметрия может использоваться для повышения уровня когнитивной активности (рисунок 5).

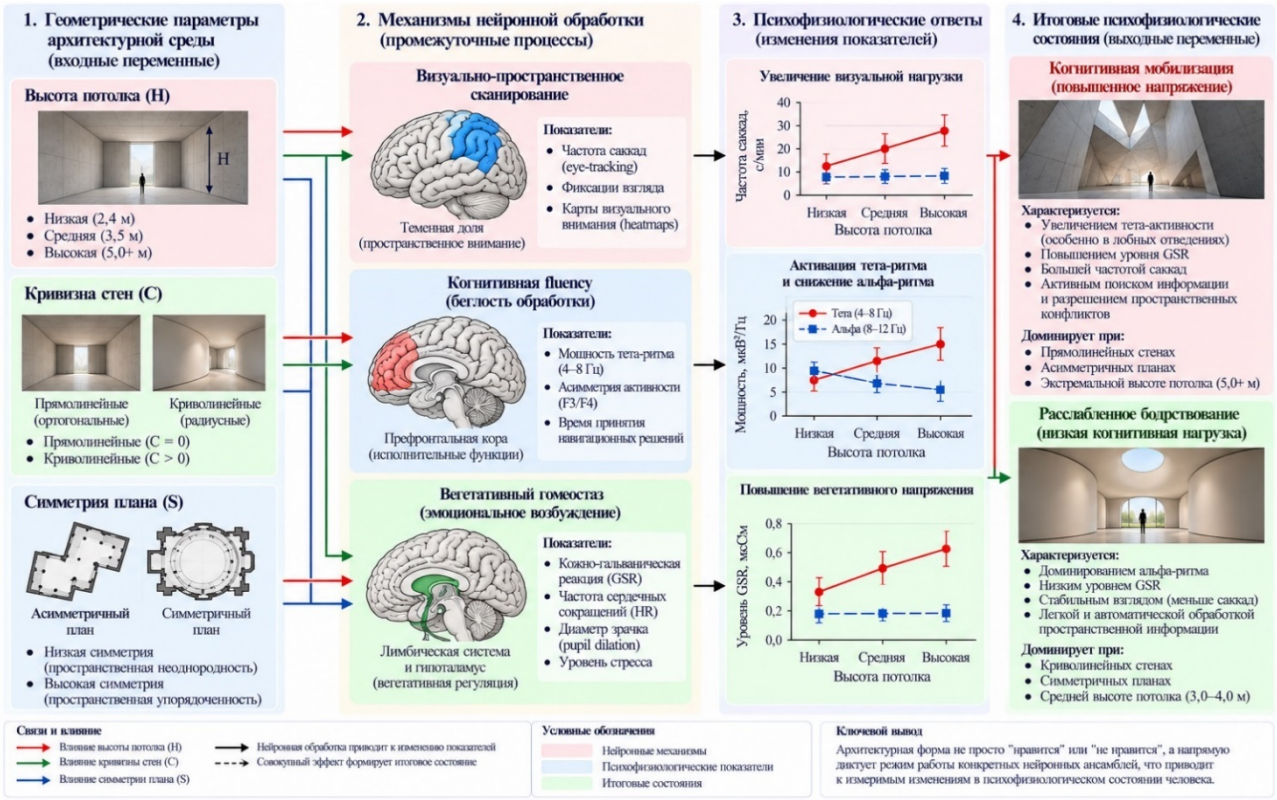


Рисунок 5 - Концептуальная модель влияния геометрических параметров на психофизиологические состояния (источник: разработано авторами)

Ограничения исследования связаны со спецификой виртуальной среды. Несмотря на высокую фотореалистичность, отсутствие тактильных ощущений и естественного акустического отклика может снижать степень погружения в виртуальную среду. Тем не менее, строгий контроль сторонних переменных и синхронная регистрация мультимодальных данных позволяют с высокой долей уверенности переносить выявленные закономерности на реальное архитектурное проектирование.

Таким образом, пространственная геометрия интерьера выступает не просто эстетической категорией, а точным инструментом настройки психофизиологического состояния пользователя. Переход от интуитивного формообразования к доказательному проектированию, основанному на объективных биометрических маркерах, открывает новые горизонты для создания сред, способствующих сохранению ментального здоровья и когнитивного благополучия человека.

Выводы. Результаты эмпирического исследования позволили дополнить

субъективную оценку архитектурной среды объективными физиологическими показателями. Выявленные закономерности изменения спектральной плотности мозговых ритмов в ответ на вариации высоты перекрытий и кривизны ограждающих конструкций дают проектировщикам новый инструментарий. Теперь формообразование интерьера может опираться не только на эстетические предпочтения, но и на доказательные данные о том, как конкретные пропорции снижают когнитивную нагрузку или, напротив, провоцируют скрытое напряжение. Это открывает путь к созданию пространств, которые на физическом уровне способствуют восстановлению психических ресурсов человека.

Представляется, что переносить полученные выводы на реальную строительную практику необходимо с известной долей осторожности, поскольку исследование имеет ряд методологических ограничений. Первостепенное среди них — экологическая валидность виртуальной среды. Несмотря на высокую степень фотореализма и физически корректный рендеринг, иммерсивные технологии пока не способны в полной мере воспроизвести мультисенсорный опыт пребывания в натурном объекте. Виртуальное пространство лишено тактильной обратной связи, естественной акустики и реальных микроклиматических параметров, которые в совокупности формируют целостное впечатление от здания. Кроме того, использование гарнитуры виртуальной реальности и особенности отображения виртуального пространства могут вызывать дополнительный дискомфорт. Как показывают работы зарубежных коллег, это способно искусственно завышать показатели когнитивного напряжения, маскируя истинную реакцию на геометрические формы. Следовательно, данные, собранные в VR-симуляции, требуют дополнительной проверки в естественных условиях.

Не менее важным ограничением является объем и структура сформированной выборки. Хотя расчет статистической мощности для базовых эффектов оказался достаточным, факторный дизайн исследования, включающий

множественные взаимодействия геометрических параметров, требует привлечения значительно большего числа респондентов для достижения высокой надежности. Участники текущего эксперимента представляют лишь узкий демографический срез, что не позволяет судить о том, как именно пространственная геометрия воздействует на детей, пожилых людей или лиц с особенностями нейроразвития. Восприятие масштаба и навигация в пространстве критически зависят от антропометрических данных и возрастного снижения сенсорных функций, что диктует необходимость стратификации будущих когорт и увеличения общего числа испытуемых.

Указанные ограничения определяют основные направления дальнейших исследований. На следующем этапе работы приоритетной задачей видится организация натурных замеров в реальных зданиях с использованием мобильных систем регистрации мозговой активности, что позволит нивелировать проблему экологической валидности. Параллельно необходимо расширить выборку за счет включения представителей различных возрастных и социальных групп, а также провести лонгитюдные наблюдения. Это поможет отследить, как меняется физиологическая реакция на одну и ту же геометрическую конфигурацию при длительном, а не кратковременном пребывании в ней. Только такой комплексный подход, объединяющий строгий аппаратный контроль и работу с натурной средой, позволит сформировать научно обоснованные нормативы проектирования интерьеров, ориентированные на сохранение ментального и физического здоровья пользователей.

Список литературы

1. Ивлев А. И. Проектирование учебной среды студенческого кампуса с точки зрения психофизиологического комфорта пользователей // Материалы научной конференции. — 2023. — С. 212–216.

2. Nolé Fajardo M. L., Higuera-Trujillo J. L., Llinares C. Lighting, Colour and Geometry: Which Has the Greatest Influence on Students' Cognitive Processes? // Frontiers of Architectural Research. — 2023. — Vol. 12, No. 4. — P. 575–586. —

DOI: 10.1016/j.foar.2023.02.003.

3. Han H., Kim J., Kim Y. A Study on the Correlation between Floor Area and Ceiling Height for Giving Spatial Comfort Using EEG // Journal of Korea Institute of Spatial Design. — 2024. — Vol. 19, No. 3. — P. 45–56. — DOI: 10.35216/kisd.2024.19.3.45.

4. Abbas S., Okdeh N., Roufayel R. et al. Neuroarchitecture: How the Perception of Our Surroundings Impacts the Brain // Biology. — 2024. — Vol. 13, No. 4. — Art. 220. — DOI: 10.3390/biology13040220.

5. Крылова С., Коротич А. Айтрекинг как средство исследования восприятия архитектурных форм // Academia. Архитектура и строительство. — 2025. — № 4. — С. 55–65. — DOI: 10.22337/2077-9038-2025-4-55-65.

6. Tural A., Tural E. Exploring Sense of Spaciousness in Interior Settings: Screen-Based Assessments with Eye Tracking, and Virtual Reality Evaluations // Frontiers in Psychology. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1473520. — DOI: 10.3389/fpsyg.2024.1473520.

7. Gath-Morad M., Egli S., Grübel J., Steemers K., Hölscher C., Aguilar L. Designing Affective Workplace Environments: The Impact of Typology, Contour, Ceiling and Partition Height on Cognitive and Aesthetic Appraisal // Building and Environment. — 2024. — Vol. 265. — Art. 111928. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111928.

8. Wang Z.-Y., Cho J. Y., Hong Y.-K. Brain and Subjective Responses to Indoor Environments Related to Concentration and Creativity // Sensors. — 2024. — Vol. 24, No. 23. — Art. 7838. — DOI: 10.3390/s24237838.

9. Дедов В. А. Кинестетический и ольфактивный опыты в перцепции архитектуры // Научный журнал строительства и архитектуры. — 2025. — № 3 (79). — DOI: 10.36622/2541-7592.2025.79.3.012.

10. Tawil N., Elias J., Ascone L., Kühn S. The Curvature Effect: Approach-Avoidance Tendencies in Response to Interior Design Stimuli // Journal of Environmental Psychology. — 2024. — Vol. 93. — Art. 102197. — DOI: 10.1016/j.jenvp.2023.102197.

11. Kim S., Kim N. Neurophysiological and Psychological Effects of Color and Ceiling

Height in Learning Spaces // Building and Environment. — 2025. — Vol. 282. — Art. 113296. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113296.

12. Djebbara Z., Huynh D. C., Koselevs A., Chen Y., Fich L. B., Gramann K. Turning Corners in Built Environments Shifts Spatial Attention Costs // NeuroImage. — 2025. — Vol. 322. — Art. 121549. — DOI: 10.1016/j.neuroimage.2025.121549.

13. Базарина Э. К., Степанова Т. А. Численный анализ визуальной сложности архитектурной среды: поиск параметров, ассоциирующихся с психологическим комфортом // Вестник Красноярского государственного педагогического университета им. В. П. Астафьева. — 2026. — Т. 75, № 1. — С. 136–149.

14. Krukar J., Schultz C. Ecological Validity of Architectural Cognition: A Framework // Architectural Science Review. — 2025. — Vol. 68, No. 5. — P. 355–362. — DOI: 10.1080/00038628.2024.2410741.

15. Alsaggaf F., Eijkelenboom A., Lugten M., Turrin M. A Machine Learning Framework for Early-Stage Dementia-Friendly Architectural Design Evaluation Using Visual Access Metrics // Architectural Intelligence. — 2025. — Vol. 4. — Art. 11. — DOI: 10.1007/s44223-025-00087-2.

16. Erkan İ. Neuroarchitectural Evaluation of Virtual Learning Spaces: Effects of Spatial Geometry, Indoor Quality and External Factors on Cognitive and Psychophysiological Outcomes // Smart and Sustainable Built Environment. — 2026. — Опубликовано онлайн 13 июля 2026 г. — DOI: 10.1108/SASBE-10-2025-0619.

17. Океанов Г. Концепция благоприятных условий жизнедеятельности человека в архитектуре общественных зданий и пространств // Academia. Архитектура и строительство. — 2025. — № 3. — С. 43–51. — DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-43-51.

18. Wei N., Chuquichambi E. G., Damiano C., Bruce K., Walther D. B. A Design-Integrated Framework for Neuroarchitectural Research // Frontiers in Psychology. — 2026. — Vol. 17. — Art. 1666480. — DOI: 10.3389/fpsyg.2026.1666480.

19. Yılmaz E., Akkam M. S., Sedes F. Toward Evidence-Based Neuroarchitecture: A Systematic Mapping and Framework for Immersive Spatial Cognition // Frontiers in

Psychology. — 2026. — Vol. 17. — Art. 1919278. — DOI: 10.3389/fpsyg.2026.1919278.

20. Sztuka I. M., Becker M., Kühn S. Neural Representations Underlying Psychological Responses to Natural and Artificial Features in Indoor Architecture // Journal of Environmental Psychology. — 2025. — Vol. 103. — Art. 102553. — DOI: 10.1016/j.jenvp.2025.102553

References

1. Ivlev A. I. Designing the educational environment of a student campus from the point of view of psychophysiological comfort of users // Proceedings of the scientific conference. - 2023. - P. 212-216.

2. Nolé Fajardo M. L., Higuera-Trujillo J. L., Llinares C. Lighting, Colour and Geometry: Which Has the Greatest Influence on Students' Cognitive Processes? // Frontiers of Architectural Research. — 2023. — Vol. 12, No. 4. — P. 575–586. — DOI: 10.1016/j.foar.2023.02.003.

3. Han H., Kim J., Kim Y. A Study on the Correlation between Floor Area and Ceiling Height for Giving Spatial Comfort Using EEG // Journal of Korea Institute of Spatial Design. — 2024. — Vol. 19, No. 3. — P. 45–56. — DOI: 10.35216/kisd.2024.19.3.45.

4. Abbas S., Okdeh N., Roufayel R. et al. Neuroarchitecture: How the Perception of Our Surroundings Impacts the Brain // Biology. — 2024. — Vol. 13, No. 4. — Art. 220. — DOI: 10.3390/biology13040220.

5. Krylova S., Korotich A. Eye tracking as a means of studying the perception of architectural forms // Academia. Architecture and Construction. - 2025. - No. 4. - P. 55–65. - DOI: 10.22337/2077-9038-2025-4-55-65.

6. Tural A., Tural E. Exploring Sense of Spaciousness in Interior Settings: Screen-Based Assessments with Eye Tracking, and Virtual Reality Evaluations // Frontiers in Psychology. — 2024. — Vol. 15. — Art. 1473520. — DOI: 10.3389/fpsyg.2024.1473520.

7. Gath-Morad M., Egli S., Grübel J., Steemers K., Hölscher C., Aguilar L. Designing Affective Workplace Environments: The Impact of Typology, Contour, Ceiling and

Partition Height on Cognitive and Aesthetic Appraisal // Building and Environment. — 2024. — Vol. 265. — Art. 111928. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111928.

8. Wang Z.-Y., Cho J. Y., Hong Y.-K. Brain and Subjective Responses to Indoor Environments Related to Concentration and Creativity // Sensors. — 2024. — Vol. 24, No. 23. — Art. 7838. — DOI: 10.3390/s24237838.

9. Dedov V. A. Kinesthetic and olfactory experiments in the perception of architecture // Scientific journal of construction and architecture. - 2025. - No. 3 (79). - DOI: 10.36622/2541-7592.2025.79.3.012.

10. Tawil N., Elias J., Ascone L., Kühn S. The Curvature Effect: Approach-Avoidance Tendencies in Response to Interior Design Stimuli // Journal of Environmental Psychology. — 2024. — Vol. 93. — Art. 102197. — DOI: 10.1016/j.jenvp.2023.102197.

11. Kim S., Kim N. Neurophysiological and Psychological Effects of Color and Ceiling Height in Learning Spaces // Building and Environment. — 2025. — Vol. 282. — Art. 113296. — DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113296.

12. Djebbara Z., Huynh D. C., Koselevs A., Chen Y., Fich L. B., Gramann K. Turning Corners in Built Environments Shifts Spatial Attention Costs // NeuroImage. — 2025. — Vol. 322. — Art. 121549. — DOI: 10.1016/j.neuroimage.2025.121549.

13. Bazarina E.K., Stepanova T.A. Numerical analysis of the visual complexity of the architectural environment: search for parameters associated with psychological comfort // Bulletin of the Krasnoyarsk State Pedagogical University named after V.P. Astafiev. - 2026. - Vol. 75, No. 1. - P. 136-149.

14. Krukar J., Schultz C. Ecological Validity of Architectural Cognition: A Framework // Architectural Science Review. — 2025. — Vol. 68, No. 5. — P. 355–362. — DOI: 10.1080/00038628.2024.2410741.

15. Alsaggaf F., Eijkelenboom A., Lugten M., Turrin M. A Machine Learning Framework for Early-Stage Dementia-Friendly Architectural Design Evaluation Using Visual Access Metrics // Architectural Intelligence. — 2025. — Vol. 4. — Art. 11. — DOI: 10.1007/s44223-025-00087-2.

16. Erkan İ. Neuroarchitectural Evaluation of Virtual Learning Spaces: Effects of Spatial Geometry, Indoor Quality and External Factors on Cognitive and Psychophysiological Outcomes // Smart and Sustainable Built Environment. — 2026. — Опубликовано онлайн 13 июля 2026 г. — DOI: 10.1108/SASBE-10-2025-0619.
17. Okeanov G. The concept of favorable conditions for human life in the architecture of public buildings and spaces // Academia. Architecture and Construction. - 2025. - No. 3. - P. 43–51. - DOI: 10.22337/2077-9038-2025-3-43-51.
18. Wei N., Chuquichambi E. G., Damiano C., Bruce K., Walther D. B. A Design-Integrated Framework for Neuroarchitectural Research // Frontiers in Psychology. — 2026. — Vol. 17. — Art. 1666480. — DOI: 10.3389/fpsyg.2026.1666480.
19. Yılmaz E., Akkam M. S., Sedes F. Toward Evidence-Based Neuroarchitecture: A Systematic Mapping and Framework for Immersive Spatial Cognition // Frontiers in Psychology. — 2026. — Vol. 17. — Art. 1919278. — DOI: 10.3389/fpsyg.2026.1919278.
20. Sztuka I. M., Becker M., Kühn S. Neural Representations Underlying Psychological Responses to Natural and Artificial Features in Indoor Architecture // Journal of Environmental Psychology. — 2025. — Vol. 103. — Art. 102553. — DOI: 10.1016/j.jenvp.2025.102553

Статья поступила в редакцию 03.02.2026; одобрена после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 03.02.2026; approved after peer review 30.03.2026; accepted for publication 28.08.2026.

Научная статья
УДК 72.011:728(98)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДУЛЬНЫХ ЖИЛЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Поликевич Ксения Борисовна, кандидат технических наук, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, Москва, ksenia.mt8 @yandex.ru;

Павлов Ярослав Дмитриевич, кандидат технических наук, Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, Россия, Москва, pavlov_yar@yandex.ru

Аннотация. Освоение ресурсного потенциала арктической зоны обусловливает необходимость формирования жилой среды, способной функционировать в условиях криолитозоны и экстремальных снеговетровых нагрузок. Цель исследования - обоснование архитектурной типологии модульного жилища Крайнего Севера с учетом обратимости жизненного цикла вахтового поселения. Методы исследования включают вычислительное гидродинамическое моделирование снегопереноса, годовой энергетический анализ ограждающих конструкций и сравнительный типологический анализ с опорой на концепции префабрикации и мобильной архитектуры. На примере модельного поселка Ямальского полуострова определены параметры аэродинамического профиля корпуса, приподнятого вентилируемого подполья и свайного основания с сезонно-действующими охлаждающими устройствами. Установлено, что применение фланцевых болтовых соединений обеспечивает возможность разборки блок-секций и повторного использования до 92% массы здания после вывода объекта из эксплуатации. Научная новизна заключается в рассмотрении полярного жилища как объекта с обратимым жизненным циклом, при котором возможность утилизации учитывается уже на исходном этапе проектирования, что позволяет предотвращать образование зон техногенного нарушения на мерзлых грунтах.

Ключевые слова: модульное жилище; Крайний Север; криолитозона; архитектурная типология; мобильная архитектура; префабрикация; вахтовый поселок; разборность; снегоперенос; обратимый жизненный цикл.

Original article

A COMPARATIVE ANALYSIS OF MODULAR RESIDENTIAL SOLUTIONS FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE FAR NORTH

Polikevich Kseniia Borisovna, Candidate of Technical Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, ksenia.mt8 @yandex.ru;

Pavlov Iaroslav Dmitrievich, Candidate of Technical Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia, pavlov_yar@yandex.ru

Annotation. The development of the Arctic zone's resource potential necessitates the creation of a residential environment capable of functioning in permafrost conditions and extreme snow and wind loads. The objective of this study is to substantiate the architectural typology of modular housing in the Far North, taking into account the reversibility of the life cycle of a rotational settlement. The research methods include computational hydrodynamic modeling of snow transport, an annual energy analysis of enclosing structures, and a comparative typological analysis based on the concepts of prefabrication and mobile architecture. Using a model settlement on the Yamal Peninsula as an example, the parameters of the aerodynamic profile of the building, a raised ventilated basement, and a pile foundation with seasonally operating cooling units were determined. It was established that the use of flanged bolted connections allows for the disassembly of block sections and the reuse of up to 92% of the building's mass after decommissioning. The scientific novelty lies in considering the polar dwelling as an object with a reversible life cycle, in which the possibility of recycling is taken into account already at the initial design stage, which helps prevent the formation of man-made disturbance zones on frozen soils.

Keywords: modular housing; Far North; cryolithozone; architectural typology; mobile architecture; prefabrication; rotational camp; disassemblability; snow transport; reversible life cycle.

Введение. Освоение ресурсного потенциала арктических территорий отражает необходимость формирования особой предметно-пространственной среды, способной функционировать в условиях криолитозоны и экстремальных метеорологических нагрузок. Архитектурная типология модульного жилища для регионов Крайнего Севера формируется на основе принципов адаптивной мобильной архитектуры и должна сочетать требования эргономического комфорта с временным характером пребывания. Исследователи в области портативного зодчества подчеркивают, что архитектура движения и трансформируемые структуры исторически формировались как ответ на необходимость выживания в агрессивной среде обитания, эволюционируя до высокотехнологичных автономных комплексов [1], [2]. В современной архитектурной теории эти идеи пересекаются с методологией индустриального домостроения, где, по оценке А.В. Суровенкова и М.Ю. Краевой, сборные и модульные системы минимизируют производственные риски, связанные с возведением зданий в неконтролируемых климатических условиях [3].

Специфика вахтовых поселков и полярных станций заключается в сочетании двух требований. С одной стороны, такие поселения должны обеспечивать полноценную психологическую и физиологическую реабилитацию персонала в условиях полярной ночи и социальной изоляции, с другой - оставаться максимально легковозводимыми и пригодными для демонтажа. Традиционная капитальная застройка в условиях вечной мерзлоты связана с необратимыми термическими нарушениями грунтов, что ведет к просадкам оснований и последующему разрушению несущих конструкций. В связи с этим основными типологическими решениями становятся блок-контейнерные или панельно-каркасные системы на свайных основаниях с

вентилируемыми подпольями. Пространственная организация комплексов подчиняется законам аэродинамической оптимизации, где обтекаемые объемы и каскадное террасирование корпусов снижают эффект снеговых заносов и ветрового подпора. Модульность здесь выступает градостроительным принципом, позволяющим гибко наращивать или сокращать жилую емкость поселения в зависимости от фазы освоения месторождения.

Временный статус вахтовых агломераций порождает одну из наиболее актуальных проблем северного зодчества, связанную с экологической и экономической целесообразностью их ликвидации после исчерпания сырьевой базы. Сложившаяся практика оставления выведенных из эксплуатации объектов на местности привела к формированию обширных зон техногенного отчуждения, где подвергающиеся коррозии металлоконструкции и разрушающиеся полимерные утеплители наносят ущерб арктическим биоценозам. Концепция мобильной архитектуры предполагает иной подход к объектам временных поселений, основанный на принципах минимального вмешательства в природу и временного характера присутствия [4]. Соответственно, в проектно-сметной документации следует изначально предусматривать порядок безотходного демонтажа здания, исключающий появление брошенных индустриальных объектов.

Утилизация объектов после вывода из эксплуатации требует внедрения методологии проектирования под демонтаж. В модульном арктическом жилище эта стратегия реализуется за счет отказа от неразъемных клеевых и сварных соединений в пользу болтовых стяжек и механических замков с целью сохранения физико-механических свойств композитных панелей и стального каркаса для последующего перемещения или вторичной переработки. Логистика обратной транспортировки по зимникам или посредством грузовой авиации накладывает жесткие ограничения на массогабаритные характеристики демонтируемых элементов, что возвращает архитектора к поиску оптимальной пространственной ячейки. Таким образом, типологию северного модульного

жилища следует рассматривать в рамках полного жизненного цикла, в котором этап утилизации является частью исходного архитектурно-конструкторского замысла, направленного на сохранение природной среды и обеспечение экономической эффективности освоения территорий.

Обзор литературы. Основы теории индустриального домостроения формируют понятийный аппарат для анализа сборных конструкций как самостоятельного архитектурного языка [5]. Исследователь акцентирует внимание на том, что заводская префабрикация модулей обеспечивает контроль качества, недостижимый при классической монолитной технологии, что приобретает особую значимость при работе в условиях, исключающих проведение «мокрых» процессов на строительной площадке. Его классификация систем соединений дает инструментарий для проектирования демонтажных узлов, критически важных для эфемерных полярных поселений [6].

Другой подход представлен в работе Т. Линга, который рассматривает мобильную архитектуру в контексте ее исторической эволюции [7]. Автор вводит понятие «архитектуры движения», где мобильность объекта рассматривается как базовое требование проекта. Применительно к арктическим условиям в рамках этой концепции вахтовый поселок рассматривается как мобильная структура, которую можно перемещать по мере изменения районов добычи ресурсов.

Практическое воплощение теоретических положений мобильной архитектуры в условиях криолитозоны остается недостаточно изученным. Отечественные и зарубежные исследования по типологии северного жилища, выполненные в советский период, касались капитальных конструкций с термостабилизирующими фундаментами, практически не затрагивая проблематику обратимого жизненного цикла. Зарубежные работы по полярной архитектуре (Аляска, Северная Канада, Скандинавия) [8-10] ограничиваются описанием частных инженерных решений без систематизации типологических признаков. Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела путем

объединения методологии префабрикации и теории мобильной архитектуры применительно к конкретным условиям российского арктического сектора.

Методы исследования. В качестве территориальной базы исследования выбран полуостров Ямал Ямало-Ненецкого автономного округа - территория, на которой проявляются основные тенденции ресурсного освоения Арктической зоны Российской Федерации. В качестве модельного объекта рассматривается вахтовый поселок газового промысла проектной емкостью 3500 человек при сроке эксплуатации 45 лет с последующим полным демонтажом и рекультивацией тундровой поверхности (рисунок 1). Выбранная территория характеризуется среднегодовой температурой около -8,7 °С, абсолютным минимумом до -59 °С и среднегодовой скоростью ветра 7,2 м/с с пиковыми порывами свыше 35 м/с при ураганных явлениях. Совокупность этих климатических параметров позволяет рассматривать ее как модельную территорию для экстраполяции полученных результатов на значительную часть Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Исследовательский инструментарий включает методы вычислительной гидродинамики (CFD-моделирование) для изучения аэродинамического взаимодействия объемов зданий с ветровым потоком и снегопереносом. Моделирование выполнено в программной среде ANSYS Fluent с использованием k-ω SST турбулентной модели, обеспечивающей адекватное описание пограничного слоя. Снегоперенос рассчитан по методике, разработанной институтом мерзлотоведения СО РАН, с учетом данных метеостанции Марресаля: за зимний сезон на 1 погонный метр препятствия переносится 280-410 $м^3$ снега при преобладающем юго-западном направлении ветров. Полученные данные интегрированы в параметрическую модель Grasshopper для оптимизации конфигурации корпусов.



Рисунок 1 – Структура вахтового посёлка газового промысла (источник: разработано авторами)

Энергетический анализ проведен с использованием пакета DesignBuilder с расчетным шагом 1 час на протяжении полного календарного года. Сценарий эксплуатации предполагает трехсменный режим работы производственных зон и непрерывное функционирование жилых корпусов с учетом специфики вахтового графика - 60-дневного пребывания с последующей ротацией персонала. Теплотехнические расчеты ограждающих конструкций выполнены по СП 50.13330.2012 с поправочными коэффициентами на ветровое воздействие и влажностный режим эксплуатации. Для верификации модельных данных проведено сопоставление с натурными наблюдениями за существующими объектами поселков Сабетта и Новый Порт, чтобы скорректировать расчетные значения теплопотерь с учетом фактических деформаций стыков модулей при сезонных температурных колебаниях.

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ метеорологических данных выявил доминирование трех факторов, определяющих архитектурную типологию. Экстремально низкие температуры при высокой влажности воздуха создают эффект «мокрого холода», при котором незначительная фильтрация

через ограждающие конструкции приводит к образованию конденсата и последующей деструкции утеплителя. Ветровая эрозия снега формирует специфическую динамику снежных заносов: при скорости ветра свыше 4 м/с снежный покров снимается с наветренной стороны и аккумулируется в подветренных зонах, создавая локальные сугробы высотой до 3,5 метров. Наличие вечной мерзлоты с температурой грунтов от -1,5 до -4,5 °С на глубине нулевых годовых амплитуд требует минимизации теплового воздействия на основание: любой контакт отапливаемого объема с поверхностью земли приводит к образованию чаши протаивания и последующей неравномерной осадке сооружения (таблица 1).

Таблица 1 - Сопоставление климатических воздействий и архитектурных ответов

Климатический фактор	Количественный параметр	Архитектурное решение	Эффективность решения
Ветровая нагрузка	до 0,85 кПа (IV ветровой район)	Обтекаемые торцевые профили Скругление углов радиусом 1,2-2,4 м	Снижение давления на 34% относительно прямоугольного объема
Снегоперенос	340 м^3/м.пог. за сезон	Приподнятый цоколь 1,8-2,4 м Пилоны с аэродинамическим сечением	Самоочищение подпольного пространства при скорости ветра более 6 м/с
Термические градиенты	Δt = 90 °С (зима/лето)	Компенсационные швы через каждые 12 модулей Плавающие соединения	Исключение термических напряжений в несущем каркасе
Вечная мерзлота	глубина сезонного оттаивания 0,6 м	Свайное основание с вентилируемым подпольем	Сохранение температурного режима грунтов в пределах ±0,3 °С

Источник: разработано авторами.

Обтекаемость форм, в частности, не является эстетическим выбором - расчеты показывают, что скругление угла здания радиусом 1,8 метра снижает локальный коэффициент аэродинамического сопротивления до 0,72, что эквивалентно уменьшению ветровой нагрузки на 44%. Приподнятый цоколь выполняет две функции: обеспечивает вентилирование грунтового основания

для сохранения мерзлого состояния и создает условия для свободного переноса снега под зданием без его накопления у стен.

Аэродинамическое моделирование выявило оптимальную конфигурацию жилого корпуса, напоминающую профиль крыла самолета с отношением длины к ширине 3,7:1. Это обеспечивает ламинарное обтекание при доминирующем направлении ветров и минимизирует образование турбулентных вихрей, ответственных за снеговые отложения. Первые этажи приподняты над поверхностью земли на высоту 2,2 метра, что превышает расчетную высоту снегового покрова с коэффициентом запаса 1,4. Образующееся вентилируемое подполье служит не только для защиты мерзлоты, но и для размещения инженерных коммуникаций с обеспечением свободного доступа для обслуживания.

Компактность плана обусловлена необходимостью сокращения площади наружных ограждающих конструкций, через которые происходят теплопотери. Для жилого модуля оптимальным признано отношение площади ограждающих конструкций к полезной площади в диапазоне 0,68-0,74, что достигается при ширине корпуса 9,6 метра (три транспортных габарита) и глубине 12 метров. Более широкие корпуса подразумевают устройство световых фонарей, что увеличивает теплопотери и создает дополнительные узлы потенциальной разгерметизации. Более узкие объемы экономически нецелесообразны из-за увеличения относительной площади торцевых стен.

Рисунок 1 описывает иерархическую структуру поселка: центральное ядро с общественными функциями (столовая, медпункт, клуб) окружено жилыми корпусами, сгруппированными в подковы, обращенные раскрытой стороной к югу. Связь между корпусами осуществляется крытыми отапливаемыми переходами, формирующими замкнутую внутрипоселковую среду, исключающую необходимость выхода на открытый воздух в период экстремальных метеоявлений (рисунок 2).

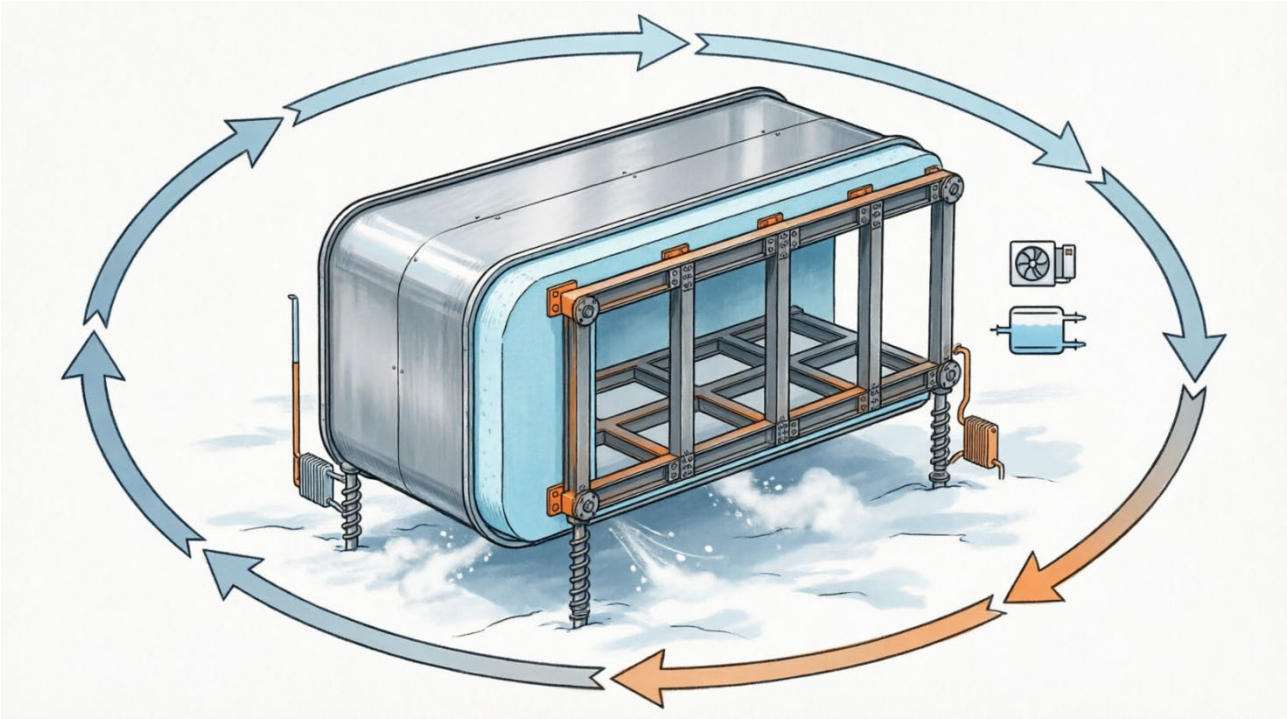


Рисунок 2 - Концептуальная модель обратимого жизненного цикла и послойной конструктивной композиции жилого модуля арктического исполнения (источник: разработано авторами)

Каркасно-панельная система выбрана как обеспечивающая оптимальный баланс между скоростью монтажа, ремонтопригодностью и возможностью последующего демонтажа. Несущий остов выполнен из горячекатаных стальных профилей сечением 200×100 мм, соединяемых болтами класса прочности 10.9 с контролем момента затяжки. Сварной шов теряет до 40% прочности при циклических температурных колебаниях в диапазоне свыше 80 градусов, характерных для климата Ямала.

Ограждающие панели представляют собой трёхслойную конструкцию, включающую наружный слой из оцинкованного стального листа толщиной 0,7 мм с полимерным защитным покрытием, средний теплоизоляционный слой из жёсткого пенополиуретана плотностью 42 кг/м^3 и толщиной 220 мм, а также внутреннюю облицовку из гипсоволокнистых плит. При принятом приведённом сопротивлении теплопередаче ограждающей конструкции $R = 5{,}8$ м^2·°C/Вт соответствующий коэффициент теплопередачи составляет $U = 1/R \approx 0{,}172$ Вт/(м^2·°C). Таким образом, ранее приведённое значение $U = 0{,}11$ Вт/(м^2·°C) не

соответствует указанному сопротивлению теплопередаче. При использовании расчётного нормативного ориентира Rнорм = 4,20 м^2·°С/Вт относительное превышение сопротивления теплопередаче составляет приблизительно 38,1 %. Данный показатель характеризует запас теплозащитных свойств конструкции относительно принятого расчётного уровня, тогда как плотность пенополиуретана 42 кг/м^3 является характеристикой теплоизоляционного материала. Закрытоячеистая структура пенополиуретана способствует ограничению капиллярного переноса влаги, однако долговременная теплозащитная эффективность панели определяется также герметичностью соединений, состоянием пароизоляции и эксплуатационным увлажнением конструкции (таблица 2).

Таблица 2 - Характеристики конструктивной системы модульного корпуса

Параметр	Проектное значение	Технологическое обоснование
Шаг модулей по оси	3,2 м	Соответствует транспортному габариту, кратен стандартному листу ГКЛ
Пролет без промежуточных опор	9,6 м	Позволяет свободную планировку внутреннего пространства
Масса типового модуля	4,8 т	Вписывается в грузоподъемность вертолета Ми-26 для труднодоступных участков
Срок монтажа одного корпуса (12 модулей)	9 рабочих дней	Обеспечивается за счет предварительной заводской сборки узлов
Расчетный срок службы	50 лет	Обоснован коррозионной стойкостью каркаса при толщине цинкового покрытия 80 мкм

Источник: разработано авторами.

Фундаментная система базируется на винтовых сваях диаметром 325 мм, погружаемых на глубину 8-12 метров до достижения несущего слоя мерзлых грунтов. Каждая свая оснащена сезонно-действующим термостабилизатором (СОУ) - замкнутой трубной системой, заполненной аммиаком, который конденсируется зимой на охлажденных ребрах и испаряется летом, отбирая тепло от грунта. Расчет показывает, что применение термостабилизаторов позволяет снизить температуру грунтового массива в радиусе 1,5 метров от сваи на 2,3 °С относительно естественного состояния, создавая искусственно замороженное ядро, повышающее несущую способность основания до 450 кН на

сваю.

Замкнутый цикл водоснабжения реализован по схеме с трехступенчатой очисткой стоков и повторным использованием технической воды в системах смыва и охлаждения оборудования. Суточное водопотребление на одного человека снижено до 110 литров против нормативных 220 литров за счет установки экономичной сантехники и системы мониторинга утечек. Водоочистка основана на мембранных биореакторах с последующей ультрафиолетовой дезинфекцией, что обеспечивает соответствие очищенной воды требованиям к технической воде без использования хлорирования, применение которого затруднено в условиях низких температур.

Рекуперация тепла организована по двухконтурной схеме. Пластинчатые рекуператоры в приточно-вытяжных установках возвращают до 82% тепловой энергии из удаляемого воздуха, а тепловой насос типа «воздух-вода» утилизирует низкопотенциальное тепло канализационных стоков с температурой 14-18 °С, преобразуя его в теплоноситель температурой 55 °С для системы горячего водоснабжения. Суммарный коэффициент эффективности такой системы составляет 3,4, то есть на каждый киловатт затраченной электроэнергии вырабатывается 3,4 киловатта тепловой энергии (таблица 3).

Таблица 3 - Энергетический баланс типового жилого корпуса

Статья баланса	Значение, кВт·ч/год	Доля, %
Теплопотери через ограждающие конструкции	184 500	61,2
Нагрев инфильтрационного воздуха	78 200	25,9
Теплоснабжение ГВС	29 800	9,9
Рекуперация тепла (возврат)	-142 600	-
Нетто-потребление тепловой энергии	149 900	100,0
Удельное потребление на м² общей площади	128,7	-

Источник: разработано авторами.

Полученные показатели в 2,3 раза ниже нормативных значений для зданий аналогичного назначения в арктических регионах, что подтверждает эффективность комплексного подхода к проектированию. Основным резервом

дальнейшего снижения энергопотребления является увеличение толщины изоляции до 280 мм с соответствующим удорожанием конструкций на 18%, что становится экономически оправданным при сроке эксплуатации свыше 35 лет.

Принцип обратимости заложен в конструкцию на уровне каждого соединения. Модули соединяются между собой фланцевыми узлами с восемью болтами М24 на каждый стык, чтобы демонтировать корпус на отдельные блок-секции в течение 48 часов силами бригады из шести монтажников. После разборки 92% массы сооружения подлежит повторному использованию: стальной каркас после дефектоскопии и восстановления защитного покрытия применяется на новых объектах, панели ограждения при отсутствии механических повреждений устанавливаются в зданиях вспомогательного назначения, инженерное оборудование проходит регламентное обслуживание и монтируется повторно.

Не подлежащие утилизации 8% массы представлены полимерными уплотнителями и отделочными материалами, которые после сортировки передаются на предприятия по производству композитного топлива или строительных материалов. Свайные фундаменты извлекаются методом вибрационного погружения с обратной засыпкой скважин местным грунтом, после чего проводится биологическая рекультивация территории с высадкой адаптированных видов тундровой растительности. Экономический анализ показывает, что стоимость демонтажа и рекультивации составляет 14% от стоимости строительства, а доход от реализации возвращенных в оборот материалов покрывает 67% этих затрат.

Результаты исследования подтверждают гипотезу о том, что модульная типология, разработанная в рамках портативной архитектуры и префабрикации, обеспечивает формирование комфортной среды обитания в экстремальных условиях при сохранении целостности природного ландшафта после завершения эксплуатационного цикла. Полученные количественные зависимости могут быть экстраполированы на другие территории криолитозоны с внесением поправок на

локальные климатические и геологические особенности. Перспективным направлением дальнейших исследований представляется интеграция возобновляемых источников энергии в автономные системы модульных поселений с целью достижения нулевого углеродного следа на этапе эксплуатации.

Выводы. Разработанный в рамках работы архитектурно-конструкторский подход основан на принципе сохранения природной среды. Отказ от неразъемных сварных узлов в пользу фланцевых болтовых соединений класса прочности 10.9, а также применение свайных фундаментов с сезонно-действующими охлаждающими устройствами создают технологические условия для последующего перемещения объекта. Авторская позиция заключается в признании того, что временный статус вахтовой агломерации не должен приводить к образованию зон техногенного отчуждения. Жизненный цикл подобного сооружения завершается деконструкцией материалов и передислокацией на новые ресурсные фронты, что полностью отвечает принципу минимального вмешательства в среду, постулированному в трудах зарубежных исследователей портативного зодчества.

Достигнутые в ходе вычислительного моделирования показатели энергоэффективности, в частности снижение удельного теплопотребления до 128,7 кВт·ч на квадратный метр общей площади, доказывают состоятельность комплексного подхода к формированию ограждающих контуров. Трехслойные панели с жестким пенополиуретановым ядром и замкнутые циклы инженерного обеспечения формируют автономную среду обитания, изолированную от агрессивных внешних факторов, но при этом не создающую избыточной антропогенной нагрузки на тундровые биоценозы.

Список литературы

1. Огородников С. Н. Способы повышения энергоэффективности модульных жилых систем в условиях Крайнего Севера // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – С. 182-195.

2. Воличенко О. В., Огородников С. Н. Экспериментальная модульная система повышенного комфорта для условий Крайнего Севера // Academia. Архитектура и строительство. – 2025. – №. 3. – С. 52-61.

3. Суровенков А. В., Краева М. Ю. Архитектурно-градостроительное обоснование организации общественного пространства многофункциональных жилых комплексов в условиях Крайнего Севера // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – №. 11-3 (98). – С. 230-242.

4. Nasiri N., Rahbar N., Shemirani S. M. M., Nasab H. M., Khaksar A. Achieving thermal comfort through vernacular wisdom: a morphological typology of earth-sheltered dwellings in hot-arid climates (Semnan, Iran) // Energy and Buildings. – 2025. – С. 116552.

5. Parracho D. F. R., Nour El-Din M., Esmaeili I., Freitas S. S., Rodrigues L., Poças Martins J., ... Guimarães A. S. Modular construction in the digital age: A systematic review on smart and sustainable innovations // Buildings. – 2025. – Т. 15. – №. 5. – С. 765.

6. Hu M. Exploring low-carbon design and construction techniques: Lessons from vernacular architecture // Climate. – 2023. – Т. 11. – №. 8. – С. 165.

7. Ling T. Y. Rethinking greening the building façade under extreme climate: Attributes consideration for typo-morphological green envelope retrofit // Cleaner and Circular Bioeconomy. – 2022. – Т. 3. – С. 100024.

8. Pardo J. M. F. Challenges and current research trends for vernacular architecture in a global world: A literature review // Buildings. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 162.

9. Cooke A., Marsik T. Principles of northern housing design with examples from Alaska // Design and the Built Environment of the Arctic. – Routledge, 2023. – С. 141-161.

10. Eltaweel A., Saint R., D'Amico B., Pomponi F. A parametric thermal analysis of refugees' shelters using incremental design and affordable construction material // Energy and Buildings. – 2023. – Т. 290. – С. 113110.

References

1. Ogorodnikov S. N. Sposoby` povy`sheniya e`nergoe`ffektivnosti modul`ny`x zhily`x sistem v usloviyax Krajnego Severa // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – S. 182-195.
2. Volichenko O. V., Ogorodnikov S. N. E`ksperimental`naya modul`naya sistema povy`shennogo komforta dlya uslovij Krajnego Severa // Academia. Arxitektura i stroitel`stvo. – 2025. – №. 3. – S. 52-61.
3. Surovenkov A. V., Kraeva M. Yu. Arxitekturno-gradostroitel`noe obosnovanie organizacii obshhestvennogo prostranstva mnogofunkcional`ny`x zhily`x kompleksov v usloviyax Krajnego Severa // Mezhdunarodny`j zhurnal gumanitarny`x i estestvenny`x nauk. – 2024. – №. 11-3 (98). – S. 230-242.
4. Nasiri N., Rahbar N., Shemirani S. M. M., Nasab H. M., Khaksar A. Achieving thermal comfort through vernacular wisdom: a morphological typology of earth-sheltered dwellings in hot-arid climates (Semnan, Iran) // Energy and Buildings. – 2025. – P. 116552.
5. Parracho D. F. R., Nour El-Din M., Esmaeili I., Freitas S. S., Rodrigues L., Poças Martins J., ... Guimarães A. S. Modular construction in the digital age: A systematic review on smart and sustainable innovations // Buildings. – 2025. – T. 15. – No. 5. – P. 765.
6. Hu M. Exploring low-carbon design and construction techniques: Lessons from vernacular architecture // Climate. – 2023. – T. 11. – No. 8. – P. 165.
7. Ling T. Y. Rethinking greening the building façade under extreme climate: Attributes consideration for typo-morphological green envelope retrofit // Cleaner and Circular Bioeconomy. – 2022. – T. 3. – P. 100024.
8. Pardo J. M. F. Challenges and current research trends for vernacular architecture in a global world: A literature review // Buildings. – 2023. – T. 13. – No. 1. – P. 162.
9. Cooke A., Marsik T. Principles of northern housing design with examples from Alaska // Design and the Built Environment of the Arctic. – Routledge, 2023. – pp. 141-161.
10. Eltaweel A., Saint R., D'Amico B., Pomponi F. A parametric thermal analysis of

refugees' shelters using incremental design and affordable construction material // Energy and Buildings. – 2023. – Т. 290. – P. 113110.

Статья поступила в редакцию 10.03.2026; одобрена после рецензирования 05.05.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 10.03.2026; approved after peer review 05.05.2026; accepted for publication 28.08.2026.

Научная статья
УДК 72.03:004.94

АНАЛИЗ ИНСОЛЯЦИИ И ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ МНОГОСВЕТНЫХ АТРИУМОВ

Вишневская Юлия Александровна, кандидат технических наук,
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва, iuliia.bmstu@inbox.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема оптимизации инсоляционного режима и естественного освещения многосветных атриумов общественных зданий посредством алгоритмических методов формообразования. Показана методологическая необоснованность применения статических нормативных показателей, основанных на условной модели пасмурного неба, для оценки светового режима вертикально вытянутых пространств с выраженной неравномерностью освещенности по высоте. Разработан вычислительный комплекс на основе платформы параметрического моделирования, объединяющий движок трассировки лучей и климатические данные типового метеорологического года и обеспечивающий многокритериальную оптимизацию геометрии зенитных проемов и статичных светорассеивающих рефлекторов. Оптимизация направлена на максимизацию пространственной автономии дневного света на нижних ярусах, снижение слепящего действия, сокращение продолжительности перегрева и повышение равномерности распределения светового потока. Эволюционный алгоритм формирует фронт Парето, позволяющий сравнить эффективность традиционных плоских фонарей с асимметричными седловидными и шедовыми конфигурациями. Результаты моделирования показывают, что оптимизированная геометрия криволинейных оболочек позволяет увеличить автономность естественного освещения глубинных зон более чем на сорок процентов при одновременном снижении пиковых инсоляционных нагрузок.

Предложенный подход позволяет рассматривать светопрозрачную оболочку атриума не только как ограждающую конструкцию, но и как средство климатически ориентированного формообразования.

Ключевые слова: многосветный атриум, естественное освещение, инсоляция, алгоритмическое проектирование, параметрическое моделирование, динамические метрики дневного света, пространственная автономия освещения, многокритериальная оптимизация, фронт Парето, зенитный фонарь, светорассеивающие рефлекторы, зрительный дискомфорт, термический перегрев.

Original article

ANALYSIS OF INSOLATION AND NATURAL LIGHTING OF MULTI-LIGHT ATRIUMS

Vishnevskaia Iuliia Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, iuliia.bmstu@inbox.ru

Abstract. This article examines the optimization of insolation and natural lighting in multi-height atriums of public buildings using algorithmic form-generation methods. It demonstrates the methodological inadequacy of using static standard indicators based on a conventional overcast sky model to assess the lighting conditions of vertically elongated spaces with pronounced uneven illumination across the height. A computational system based on a parametric modeling platform has been developed, integrating a ray tracing engine and climate data from a typical meteorological year to enable multi-criteria optimization of the geometry of zenith openings and static light-diffusing reflectors. Optimization is aimed at maximizing the spatial autonomy of daylight on the lower tiers, reducing glare, shortening the duration of overheating, and improving the uniformity of luminous flux distribution. An evolutionary algorithm generates a Pareto frontier, enabling a comparison of the efficiency of traditional flat skylights with asymmetric saddle-shaped and shed-shaped configurations. Modeling

results show that the optimized geometry of curved shells allows for an increase in the natural light autonomy of deep zones by more than 40 percent while simultaneously reducing peak insolation loads. The proposed approach allows the atrium's translucent shell to be considered not only as an enclosing structure but also as a means of climate-sensitive shaping.

Keywords: multi-light atrium, natural lighting, insolation, algorithmic design, parametric modeling, dynamic daylight metrics, spatial lighting autonomy, multi-criteria optimization, Pareto frontier, skylight, light-diffusing reflectors, visual discomfort, thermal overheating.

Введение. Формирование внутренних пространств общественного назначения опирается на концепцию атриума, выступающего как смысловое и микроклиматическое ядро объекта. Пространственная организация таких сооружений предполагает создание визуальных связей между уровнями, где естественный свет становится основным инструментом моделирования среды. Как справедливо указывают Т.А. Иванова и Г.Л. Леденева, успешная интеграция дневного освещения требует глубокого понимания взаимовлияния архитектурной формы и светового климата, что позволяет обеспечить не только зрительный комфорт, но и психоэмоциональную выразительность интерьера [1]. Однако масштабное остекление кровли или фасадов, предназначенное для обеспечения инсоляции глубоких зон, создает ряд инженерных и планировочных противоречий и требует поиска нетривиальных объемно-планировочных решений.

Наиболее актуальной эксплуатационной проблемой многосветных объемов остается нарушение теплового баланса в теплый период года. Концентрация солнечной радиации в замкнутом объеме с высокой долей светопрозрачных ограждающих конструкций провоцирует интенсивный парниковый эффект. Возникающая вертикальная температурная стратификация приводит к сильному перегреву воздуха на верхних уровнях и на

эксплуатируемых галереях, примыкающих к светопроемам. Традиционные методы борьбы с данным явлением, сводящиеся к механическому затенению кровли непрозрачными щитами или тонированию стекол, вступают в конфликт с изначальной градостроительной и эстетической идеей атриума как светонасыщенного пространства. Снижение доли проникающей коротковолновой радиации за счет статичных барьеров ухудшает инсоляционный режим прилегающих помещений и требует поиска компромисса между теплозащитой и светопропусканием.

Одновременно с термическим дискомфортом возникает выраженная диспропорция в распределении освещенности по высоте сооружения. В то время как верхние ярусы подвергаются избыточному облучению, вызывающему слепящее действие и деградацию отделочных материалов, нижние уровни, удаленные от зенитных фонарей, испытывают хронический дефицит естественного света. Оценивать подобные среды при помощи классического коэффициента естественной освещенности (КЕО), базирующегося на условном небе МКО, представляется методологически неверным. Исследователи показывают, что статические метрики не позволяют учитывать сезонную динамику солнечных траекторий, переменную облачность и действия пользователей, изменяющих положение экранирующих устройств для снижения зрительного дискомфорта [2]. В атриумах из-за геометрии светопроемов и отражающих свойств внутренних поверхностей лучистые потоки многократно переотражаются. Поэтому игнорирование фактора времени и ориентации по сторонам горизонта снижает соответствие предварительных расчетов реальным условиям.

Преодоление противоречия между недостатком естественного освещения на нижних этажах и летним перегревом верхних зон затруднительно в рамках стандартного итерационного проектирования. Решение этой задачи связано с применением алгоритмических методов генерации и оптимизации геометрии светорассеивающих и перенаправляющих элементов. Параметрическое

моделирование позволяет создавать сложные пространственные структуры - фасеточные световые шахты, профилированные отражатели и адаптивные экраны, геометрия которых определяется на основе многолетних массивов климатических данных [3]. При таком подходе оболочка атриума рассматривается как оптическая система, направляющая диффузный свет вглубь пространства и одновременно ограничивающая или перераспределяющая прямое солнечное излучение в периоды его наибольшей интенсивности. Дальнейшее изложение посвящено разработке такого подхода с использованием динамических показателей оценки световой среды и методов алгоритмического формообразования.

Обзор литературы. В современной строительной физике и гелиотехнике фундаментальной методологической ошибкой считается смешение понятий инсоляции и естественного освещения. Под инсоляцией понимается процесс прямого воздействия солнечных лучей на материальные поверхности, сопровождающийся интенсивным поступлением коротковолновой радиации, которое в замкнутых объемах приводит к нарушению теплового баланса и летнему перегреву воздуха [4]. Задача организации естественного освещения состоит в обеспечении зрительного комфорта за счет рассеянного света небосвода и отраженных световых потоков при ограничении слепящего действия прямых солнечных лучей. В работах [5], [6] показана несостоятельность традиционных статических показателей, таких как коэффициент естественной освещенности, при оценке светового климата помещений со сложной пространственной организацией, поскольку эти показатели не учитывают сезонную динамику солнечных траекторий и фактическую облачность. Исследователи обосновывают необходимость применения динамических метрик, базирующихся на массивах типовых метеорологических лет (TMY), среди которых пространственная автономия дневного света (sDA) и индекс полезной освещенности (UDI) позволяют количественно оценить долю времени, в течение которого параметры естественного освещения соответствуют

заданным требованиям без использования искусственного освещения [7].

М. В. Винницкий также подчеркивает, что форма светопрозрачных оболочек может использоваться для управления распределением лучистых потоков [8]. Для многосветных атриумов, где значительную роль играют многократные отражения светового потока по высоте пространства, особое значение приобретает коэффициент отражения внутренних ограждений. Проектирование зенитных проемов без учета слепимости, оцениваемой с помощью показателя максимальной дневной автономии (DAmax), приводит к необходимости использования экранирующих устройств, что снижает предусмотренный проектом визуальный контакт с внешней средой. Разработка концепции атриума требует применения методов многокритериальной оптимизации, позволяющих найти компромисс между максимальным проникновением рассеянного света на нижние ярусы, снижением пиковых инсоляционных нагрузок, вызывающих перегрев, и предотвращением зрительного дискомфорта.

Организация и методология исследования. Исходные данные для оптимизационной модели формируются путем варьирования геометрических параметров многосветного объема. В качестве ключевых переменных выступают угол наклона светопрозрачного покрытия, габаритная высота атриума и фотометрические свойства отделочных материалов, задающие альбедо поверхностей. По мере увеличения высоты светового колодца вероятность попадания прямых солнечных лучей на нижние уровни экспоненциально снижается, однако диффузная составляющая, многократно переотражаясь от стен с высоким коэффициентом отражения, способна компенсировать возникающий дефицит [9]. Для проверки выдвинутых гипотез используется компьютерное моделирование в среде Radiance с плагином Honeybee, обеспечивающим детализированную трассировку лучей. Входным массивом данных служит климатический файл формата EPW, содержащий почасовые значения прямой и рассеянной солнечной радиации, температуры и

облачности для заданной географической широты.

Архитектурно-конструктивный поиск осуществляется с помощью генеративного алгоритма, реализованного в параметрической среде Grasshopper. Скрипт формирует варианты зенитного фонаря путем преобразования базовой плоскости в пирамидальные, шедовые и седловидные конфигурации, а также задает геометрию статичных светорассеивающих рефлекторов, расположенных в верхнем ярусе. Алгоритм многокритериальной оптимизации SPEA-2 оценивает каждую итерацию по следующим целевым критериям: максимизация sDA300 на уровне пола первого этажа, поддержание UDI100-2000 в заданных пределах на эксплуатируемых галереях, ограничение DAmax для исключения слепимости и минимизация суммарной продолжительности периодов, в течение которых поступление солнечной радиации превышает заданные пороговые значения. Результатом расчетов является фронт Парето - совокупность геометрических решений, ни одно из которых не доминирует над другими по всем критериям; эти решения отражают различные варианты баланса между уровнем естественного освещения и тепловой стабильностью [10].

Результаты исследования и их обсуждение. Анализ полученного множества решений выявил противоречие, характерное для традиционных плоских зенитных фонарей. В таблице 1 показана зависимость между углом наклона светопрозрачных граней и частотой возникновения слепящих бликов. Горизонтальное остекление обеспечивает предельно высокие значения sDA только на верхних уровнях, тогда как на нижних уровнях сохраняется устойчивый дефицит естественного освещения. При плоской геометрии в летние месяцы наблюдаются экстремальные значения DAmax, сопровождающиеся интенсивным перегревом воздуха в подкупольном пространстве и выраженным зрительным дискомфортом пользователей. Внедрение статичных рефлекторов в структуру плоского перекрытия неспособно модифицировать траекторию низких зимних солнечных лучей, лишь перераспределяя блики по вертикальным ограждениям.

Таблица 1 - Матрица фотометрических и термических откликов атриумного объема в зависимости от топологии зенитного фонаря (климатический массив TMY3, континентальный климат, широта 55° с.ш.)

Морфологическая типология светопрозрачной оболочки	Угол наклона грани (α) к горизонту	Пространственная автономия (sDA$_{300}$) нижнего яруса, %	Индекс слепящего действия DA$_{max}$), %	Часы термического дисбаланса (перегрев > 26°C), ч/год	Интегральный коэффициент интеррефлексии (albedo = 0.6)
Плоская горизонтальная (База)	0°	14.2	68.5	1140	1.12
Симметричная пирамидальная	30°	22.8	41.3	820	1.45
Асимметричная шедовая (Север)	60° (С) / 0° (Ю)	38.5	12.4	310	2.18
Седловидная (Гиперболический параболоид)	переменный (15°-45°)	46.7	8.1	195	2.64

Источник: разработано автором.

Топологическая карта фронта Парето (рисунок 1) позволяет выделить группы решений и показывает, что оптимизированные седловидные и пирамидальные формы характеризуются иным распределением световых потоков. Интерпретация радарной диаграммы многокритериальной оценки свидетельствует о том, что асимметричный профиль седловидного фонаря, ориентированный глухой гранью на юг, полностью блокирует проникновение высокостоящего летнего солнца, нивелируя риск перегрева и слепимости.



Рисунок 1 - Фронт Парето и радарная диаграмма многокритериальной оценки вариантов зенитного фонаря (источник: разработано автором)

Наклонная светопрозрачная грань, обращенная на север, беспрепятственно пропускает диффузный свет вглубь атриума. Профилированные рефлекторы, кривизна которых рассчитана алгоритмом, обеспечивают перенаправление отраженных потоков непосредственно на поверхности пола нижних ярусов. Сопоставительный анализ фотометрических и термических показателей показывает, что предложенная геометрия позволяет увеличить автономность дневного освещения на нижних уровнях более чем на 40 % при одновременном снижении пиковых инсоляционных нагрузок. Это подтверждает применимость алгоритмического подхода к формированию архитектурной формы с учетом требований устойчивого развития.

Выводы. Проведенное исследование показывает, что противоречие между требованиями к инсоляции и тепловой стабильности многосветных пространств может быть разрешено с помощью алгоритмических методов формообразования, использующих почасовые климатические данные. Переход от преимущественного использования коэффициента естественной освещенности, основанного на модели пасмурного неба МКО, к динамическим

показателям пространственной автономии дневного света (sDA) и индекса полезной освещенности (UDI) позволяет количественно оценивать световой режим с учетом сезонной динамики солнечных траекторий и локальной облачности. Именно климатически ориентированный подход, интегрирующий формат EPW и стохастические модели генерации промежуточной освещенности, предоставляет архитектору инструментарий для прогнозирования фактического поведения пользователей, вынужденных манипулировать экранирующими устройствами во избежание слепимости, что, в свою очередь, модифицирует эффективную светопрозрачность оболочки.

Полученный в ходе вычислительного эксперимента фронт Парето выявляет несостоятельность традиционных плоскостных зенитных фонарей, которые в условиях преобладания высокостоящего летнего солнца генерируют экстремальные значения DAmax, провоцируя как радиационный перегрев воздушных масс в подкупольной зоне, так и зрительный дискомфорт на эксплуатируемых галереях. Предложенная топология асимметричных седловидных и пирамидальных светопроемов, дополненная профилированными статичными рефлекторами, обеспечивает селективное пропускание диффузной компоненты северного небосвода в глубинные зоны атриума при одновременном блокировании прямой коротковолновой радиации. Рассчитанная параметрическим скриптом кривизна отражающих поверхностей позволяет направлять отраженные световые потоки на полы нижних ярусов, компенсируя снижение освещенности по мере удаления от кровли и уменьшая дефицит естественного света, характерный для традиционных объемно-планировочных решений.

Интеграция алгоритмических методов оптимизации в проектную практику трансформирует методологию формообразования светопрозрачных оболочек, переводя ее в область строгого многокритериального синтеза. Архитектурная морфология атриума рассматривается не как исключительно эстетическое решение, а как результат учета совокупности целевых критериев, включающих

максимизацию автономности естественного освещения, предотвращение слепящих бликов и минимизацию пиковых тепловых нагрузок. Фотометрические свойства внутренних ограждений, определяющие альбедо поверхностей, при таком подходе рассматриваются как проектные переменные, корректный подбор которых позволяет компенсировать дефицит прямой инсоляции за счет усиления интеррефлексии.

Перспективным направлением является расширение набора оптимизируемых параметров за счет включения адаптивных кинетических систем затенения, конфигурация и алгоритмы управления которыми могут формироваться с учетом поведенческих моделей пользователей, описанных в концепции Lightswitch. Не менее продуктивным направлением представляется верификация вычислительных моделей посредством натурных фотометрических измерений в реализованных объектах, что позволит калибровать стохастические параметры симуляционных сред и повысить прогностическую достоверность динамических метрик. Совместное применение гелиотехнических расчетов, параметрического моделирования и натурной валидации может стать основой для разработки нормативной базы, учитывающей требования устойчивого развития и направленной на создание визуально комфортной и энергетически эффективной архитектурной среды, в которой естественный свет используется как средство пространственного формообразования.

Список литературы

1. Иванова Т. А., Леденева Г. Л. Атриум в архитектуре: сравнительный анализ западной и российской практики // Вестник науки. – 2026. – Т. 3. – №. 6 (99). – С. 1832-1839.
2. Тхам Ф. Т. Х., Тай З. Д., Соловьев А. К. Метод расчета геометрических параметров конструкций атриума здания с учетом комфорта температурно-воздушного режима // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19. – №. 3. – С. 349-357.
3. Плюснина Г. Ф., Калмыков С. П., Панов М. В. Атриум. История эволюции // Культура и безопасность. – 2023. – №. 1. – С. 16-30.

4. Ячменев А. А., Каганович Н. Н. Задачи атриумных структур в обеобразовательных учреждениях в контексте архитектурно-пространственной устойчивости // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – Т. 11. – №. 2.

5. Ванди В. Архитектура многоуровневого пространства в библиотеках // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – №. 12-2 (111). – С. 310-316.

6. Баклыская Л. Е., Чукмарева Е. А., Фишева Н. О. Атриум на территории университетского кампуса // Урбанистика. – 2023. – №. 3. – С. 44-59.

7. Чуб Е. С., Чернышев В. В., Веселицкий О. В. Доступность (для граждан категории мгн) и инклюзия в архитектуре и интерьере // Инновации и инвестиции. – 2026. – №. 3. – С. 650-652.

8. Винницкий М. В. Актуализация принципов формирования архитектурной среды Крайнего Севера и Арктики // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2024. – №. 3 (62). – С. 52-58.

9. Глухих Д. И., Щинников И. А. Особенности реализации проекта деревянной купольной конструкции в качестве перекрытия многоэтажного атриума // Вестник евразийской науки. – 2023. – Т. 15. – №. 2. – С. 55.

10. Масёнене А. Р., Клюев С. В. Несущая способность рамы-подиума для светопрозрачного покрытия атриума // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2024. – Т. 20. – №. 5. – С. 491-503.

References

1. Ivanova T. A., Ledeneva G. L. Atrium v arxitekture: sravnitel`ny`j analiz zapadnoj i rossijskoj praktiki // Vestnik nauki. – 2026. – T. 3. – №. 6 (99). – S. 1832-1839.

2. Txam F. T. X., Taj Z. D., Solov`ev A. K. Metod rascheta geometricheskix parametrov konstrukcij atriuma zdaniya s uchetom komforta temperaturno-vozdushnogo rezhima // Vestnik MGSU. – 2024. – T. 19. – №. 3. – S. 349-357.

3. Plyusnina G. F., Kalmy`kov S. P., Panov M. V. Atrium. Istoriya e`volyucii // Kul`tura i bezopasnost`. – 2023. – №. 1. – S. 16-30.

4. Yachmenev A. A., Kaganovich N. N. Zadachi atriumny`x struktur v obeobrazovatel`ny`x uchrezhdeniyax v kontekste arxitekturno-prostranstvennoj ustojchivosti // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2025. – T. 11. – №. 2.

5. Vandi V. Arxitektura mnogourovnevogo prostranstva v bibliotekax // Mezhdunarodny`j zhurnal gumanitarny`x i estestvenny`x nauk. – 2025. – №. 12-2 (111). – S. 310-316.

6. Bakly`skaya L. E., Chukmareva E. A., Fisheva N. O. Atrium na territorii universitetskogo kampusa // Urbanistika. – 2023. – №. 3. – S. 44-59.

7. Chub E. S., Cherny`shev V. V., Veseliczkij O. V. Dostupnost` (dlya grazhdan kategorii mgn) i inklyuziya v arxitekture i inter`ere // Innovacii i investicii. – 2026. – №. 3. – S. 650-652.

8. Vinniczkij M. V. Aktualizaciya principov formirovaniya arxitekturnoj sredy` Krajnego Severa i Arktiki // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. – 2024. – №. 3 (62). – S. 52-58.

9. Gluxix D. I., Shhinnikov I. A. Osobennosti realizacii proekta derevyannoj kupol`noj konstrukcii v kachestve perekry`tiya mnogoe`tazhnogo atriuma // Vestnik evrazijskoj nauki. – 2023. – T. 15. – №. 2. – S. 55.

10. Masyonene A. R., Klyuev S. V. Nesushhaya sposobnost` ramy`-podiuma dlya svetoprozrachnogo pokry`tiya atriuma // Stroitel`naya mexanika inzhenerny`x konstrukcij i sooruzhenij. – 2024. – T. 20. – №. 5. – S. 491-503.

Статья поступила в редакцию 26.01.2026; одобрена после рецензирования 05.03.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 26.01.2026; approved after peer review 05.03.2026; accepted for publication 28.08.2026.

2.1.13. Градостроительство, планировка сельских населенных пунктов (технические науки)

Научная статья
УДК 711.7:551.583.13

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРОДСКОГО ТЕПЛОВОГО ОСТРОВА И ОЦЕНКА СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ ЗЕЛЁНО-ГОЛУБОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Мушарапов Дамир Рузалевич, кандидат технических наук, Ульяновский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Россия, Ульяновск, damir_ruzalevich@mail.ru

Аннотация. В статье анализируются термодинамические процессы в урбанизированной среде, способствующие формированию городского теплового острова и повышающие биоклиматические риски для населения в периоды продолжительных волн жары. Целью работы выступает разработка методологии высокоразрешающего пространственного моделирования микроклиматических аномалий и научное обоснование стратегий снижения их интенсивности посредством интеграции зелено-голубой инфраструктуры. Методология исследования основана на совместном использовании данных мультиспектральной спутниковой термометрии и наземного аэродинамического мониторинга с последующей верификацией результатов средствами вычислительной гидродинамики. На примере линейной агломерации с контрастной морфологией застройки эмпирически подтвержден фазовый сдвиг между пиками радиационного нагрева поверхностей и максимумами прогрева приземного воздуха, обусловленный высокой теплоемкостью строительного фонда. Установлено, что массовое применение рефлективных мембран эффективно снижает пиковые потоки явного тепла в дневные часы, тогда как экстенсивное озеленение и сохранение вентиляционных коридоров являются единственными средствами рассеивания накопленной тепловой энергии в

ночные часы. Дополнительно оценено влияние модификации альбедо и эвапотранспирации на снижение пиковых нагрузок инженерных систем кондиционирования. Выявленные пространственные закономерности включены в правила землепользования и застройки, что обеспечивает переход к нормированию параметров аэродинамической проницаемости и теплового отражения непосредственно в градостроительных регламентах. Результаты исследования обладают высокой прикладной ценностью для органов муниципального управления и проектных институтов.

Ключевые слова: городской тепловой остров, пространственное моделирование, зелено-голубая инфраструктура, микроклимат застройки, спутниковая термометрия, альбедо поверхностей, эвапотранспирация, аэродинамическая проницаемость, правила землепользования и застройки, адаптивное градостроительство.

Original article

MODELING AN URBAN HEAT ISLAND AND ASSESSING BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT SCENARIOS

Musharapov Damir Ruzalevich, Candidate of Technical Sciences, Ulyanovsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Ulyanovsk, Russia, damir_ruzalevich@mail.ru

Abstract. This article analyzes the mechanisms of thermodynamic transformation of urbanized areas that determine the formation of the urban heat island effect and exacerbate bioclimatic risks for the population during prolonged heat waves. The aim of the study is to develop a methodology for high-resolution spatial modeling of microclimatic anomalies and to scientifically substantiate strategies for mitigating their intensity through the integration of blue-green infrastructure. The methodological framework of the study is based on the convergence of multispectral satellite thermometry data and ground-based aerodynamic monitoring, followed by verification in computational fluid dynamics (CFD) environments. Using a linear agglomeration

with contrasting building morphology as an example, a phase shift between peaks of surface radiative heating and maxima of surface air heating, caused by the high thermal capacity of the building stock, is empirically confirmed. It was found that the widespread implementation of reflective membranes effectively reduces daytime peaks of sensible heat, while extensive landscaping and the preservation of ventilation corridors serve as the only means of dissipating accumulated energy at night. The impact of albedo and evapotranspiration modification on reducing peak loads of air conditioning systems was also assessed. The identified spatial patterns were integrated into land use and development regulations, paving the way for the transition to standardizing aerodynamic permeability and thermal reflectivity parameters directly in urban planning regulations. The research results have high practical value for municipal authorities and design institutes.

Keywords: urban heat island, spatial modeling, blue-green infrastructure, built-up microclimate, satellite thermometry, surface albedo, evapotranspiration, aerodynamic permeability, land use and development regulations, adaptive urban planning.

Введение. Современная урбанизация привела к формированию новых термодинамических систем, где антропогенная трансформация подстилающей поверхности создает локальные климатические аномалии, отличающиеся от фоновых условий прилегающих территорий. Феномен городского теплового острова, документированный на протяжении почти столетия, представляет собой устойчивое превышение температурных показателей в плотной застройке относительно сельских и городских зон, что обусловлено совокупностью физических механизмов: положительным радиационным балансом урбанизированных пространств, аккумуляцией солнечной радиации строительными конструкциями, дефицитом естественных охладителей и ограниченной циркуляцией воздушных масс в городах. Как показал В.В. Литовский в своём исследовании пограничного слоя атмосферы, городская среда

формирует специфический микроклиматический профиль, где тепловая инерция искусственных материалов и интенсивное выделение антропогенного тепла создают замкнутый цикл накопления и перераспределения тепловой энергии, нехарактерный для природных ландшафтов [1].

Температурная стратификация в мегаполисах имеет тенденцию к усилению на фоне глобальных климатических изменений, причем Д.Ю. Демежко, Б.Д. Хацкевич, Н.Р. Факаева, А.А. Горностаева и А.Н. Антипин отмечают, что наблюдаемые экстремальные значения температуры окружающего воздуха усугубляют энергетические проблемы городской инфраструктуры, ухудшают условия теплового комфорта и создают непосредственную угрозу для уязвимых групп населения [2]. Эмпирические данные свидетельствуют о существенном возрастании пиковых нагрузок на системы кондиционирования: для крупных американских городов с населением свыше 100 тысяч человек прогнозируется увеличение пикового электропотребления на 1,5-2% при каждом градусе Фаренгейта повышения температуры, что для Афин приводит к удвоению холодильной нагрузки зданий и почти трехкратному росту пикового спроса на электроэнергию при одновременном снижении коэффициента производительности механических систем охлаждения до 25% [3].

Медико-демографические последствия тепловых аномалий требуют отдельного рассмотрения, поскольку температурный стресс в условиях плотной застройки проявляется особенно остро. Исследования, цитируемые С.А. Лысенко и П.О. Зайко, показывают корреляцию между интенсивностью теплового острова и частотой госпитализаций, причем наиболее уязвимыми оказываются жители малообеспеченных районов с недостаточной теплоизоляцией жилых помещений [4]. Повышение температуры городской среды сопровождается ростом экологической нагрузки: усиление фотохимических процессов в приземном слое атмосферы приводит к повышению концентраций озона и других вторичных загрязнителей, что в

сочетании с термическим дискомфортом создает комплексную угрозу общественному здоровью. Особенно тревожной представляется ситуация в периоды продолжительных волн жары, когда кумулятивный эффект многодневного перегрева городской среды превышает адаптационные возможности человеческого организма, а ночное охлаждение оказывается недостаточным для восстановления физиологического равновесия [5].

Пространственная гетерогенность теплового острова определяется морфологией застройки, соотношением открытых и закрытых поверхностей, наличием водных объектов и растительного покрова, что обусловливает необходимость применения мезомасштабных моделей для адекватного описания термодинамических процессов. Современные методы численного моделирования, включая MM5, WRF-NOAH и специализированные модели, позволяют воспроизводить трехмерную структуру городского пограничного слоя с учетом радиационного обмена, турбулентного переноса и фазовых переходов влаги [6]. Однако точность пространственного моделирования существенно зависит от качества входных параметров, включая альбедо поверхностей, шероховатость подстилающего слоя, тепловую инерцию материалов. Как отмечает П.А. Казанцев, корректное описание пограничного слоя требует учета множества взаимосвязанных параметров, среди которых особое значение имеют геометрические характеристики застройки, влияющие на эффективность длинноволнового выхолаживания в ночные часы [7].

Стратегии снижения интенсивности теплового острова разделяются на две основные категории: повышение альбедо городских поверхностей и расширение площадей зеленых насаждений, включая внедрение зелено-голубой инфраструктуры. Рефлективные покрытия демонстрируют потенциал снижения средних температур на 0,3 K при каждом увеличении альбедо на 0,1, тогда как пиковые температуры могут снижаться на 0,9 K при аналогичном изменении отражательной способности [8]. Зеленые крыши, согласно результатам мезомасштабного моделирования, способны обеспечивать охлаждение

амбиентной температуры в диапазоне 0,3-3 К при реализации в масштабах всего города, причем их эффективность существенно зависит от климатических условий, типа растительности, режима орошения. Сравнительный анализ показывает, что в условиях интенсивной солнечной радиации рефлективные покрытия показывают преимущество в период дневного максимума, но зеленые крыши обеспечивают более выраженный эффект в ночные часы благодаря скрытой теплоте испарения, хотя их результативность зависит от влажности субстрата и биометрических характеристик растительного покрова.

Перспективы пространственного моделирования связаны с интеграцией данных дистанционного зондирования, наземных метеорологических наблюдений и детализированных цифровых моделей городской среды, что позволяет переходить к прогнозированию микроклиматических условий на уровне отдельных кварталов с высоким пространственным разрешением. Применение зелено-голубой инфраструктуры требует учета термодинамических эффектов, гидрологического баланса, управления ливневым стоком, биоразнообразия и социокультурных функций городских пространств, что определяет междисциплинарный характер исследований в данной области. Дальнейшее развитие методологического аппарата предполагает верификацию численных моделей на основе натурных экспериментов, разработку адаптивных стратегий снижения интенсивности с учетом локальных климатических особенностей и создание инструментария для оценки эффективности различных сценариев пространственного развития городских территорий в условиях меняющегося климата.

Обзор литературы. Осмысление термодинамики урбанизированных территорий опирается на концепцию городского пограничного слоя, детально разработанную в классических трудах Т. Оки. Исследователь доказал, что формирование локальных климатических аномалий детерминировано радикальной трансформацией радиационного баланса подстилающей поверхности и изменением ее аэродинамической шероховатости. Геометрия

городских каньонов, выражаемая через коэффициент видимости неба, выступает ключевым лимитирующим фактором длинноволнового выхолаживания в ночные часы, что обусловливает кумуляцию тепловой энергии в строительных конструкциях. Опираясь на уравнение энергетического баланса городской среды, в котором поглощенная радиация и антропогенное тепло распределяются между потоками явного и скрытого тепла и теплонакоплением в массиве застройки, автор заложил основу для последующего математического описания микроклиматических градиентов.

Развитие прикладных аспектов данной теории, направленное на поиск инструментов пространственной адаптации, получило отражение в работах О.Ю. Круковской и Г.У. Бектемысовой [9], [10]. Анализ мезомасштабных моделей демонстрирует, что модификация оптических свойств городских оболочек, в частности повышение интегрального альбедо кровель до значений 0,65-0,85, способна редуцировать пиковые значения температуры приземного воздуха на 0,9-2,2 К. Одновременно обосновывается эффективность внедрения растительных субстратов, где доминирующим механизмом терморегуляции становится эвапотранспирация, конвертирующая избыточную инсоляцию в поток скрытого тепла. Вместе с тем анализ существующих исследований выявляет существенный разрыв между макроуровневым климатическим моделированием и микроуровневым градостроительным проектированием [11]. Большинство верифицированных сценариев оперирует усредненными показателями по городским агломерациям, игнорируя пространственную гетерогенность застройки и локальные аэродинамические барьеры, что снижает применимость этих данных при актуализации нормативной документации, такой как правила землепользования и застройки (ПЗЗ). Преодоление данного разрыва требует перехода к высокоразрешающему пространственному анализу, интегрирующему спутниковую термометрию.

Материалы и методы исследования. Эмпирическую базу исследования составили данные дистанционного зондирования Земли и результаты наземного

микроклиматического мониторинга, проведенного на территории г. Волгограда в периоды устойчивых летних антициклонов (июль-август 2022 года и 2023 года). Выбор объекта обусловлен спецификой его морфологии: вытянутая вдоль Волгоградского водохранилища линейная структура города, сочетающаяся с глубоко врезанными балками и массивами многоэтажной застройки советского и постсоветского периодов, создает сложную мозаичную структуру теплообмена. Для расчета радиационной температуры подстилающей поверхности (LST) использовались мультиспектральные и тепловые каналы сенсоров TIRS спутников Landsat 8 и 9. Алгоритм извлечения LST включал атмосферную коррекцию и расчет коэффициента излучательной способности поверхности на основе пороговых значений нормализованного вегетационного индекса (NDVI), полученного из синхронизированных снимков Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 метров.

Методологическим ограничением, часто игнорируемым в прикладных исследованиях, является смешение понятий температуры поверхности (LST) и температуры приземного слоя воздуха (T_a). LST, достигающая в условиях волгоградского климата экстремальных значений свыше 65 °C на асфальтированных и кровельных покрытиях, характеризует тепловое состояние поверхности, однако биоклиматический дискомфорт и нагрузка на инженерные сети определяются именно T_a. В связи с этим спутниковые данные подвергались наземной валидации посредством мобильных метеорологических комплексов. Автоматизированные логгеры, установленные на крышах транспортных средств, фиксировали профили T_a, относительной влажности и скорости ветра на высоте 2 метра вдоль трансект, пересекающих различные территориальные зоны. Измерения проводились в часы максимума инсоляции и в предутренние часы, что позволило зафиксировать фазовый сдвиг (гистерезис) между пиком нагрева поверхностей и максимумом прогрева воздушной массы, обусловленный тепловой инерцией строительных материалов.

Корреляционный анализ и пространственная регрессия применялись для

выявления статистических зависимостей между тепловыми аномалиями и морфометрическими параметрами среды. В качестве предикторов выступали индекс плотности застройки, средневзвешенное альбедо кровель в пределах квартала, а также буферные расстояния до объектов голубой инфраструктуры (акватория Волги, поймы рек Царица и Ельшанка). Сценарное моделирование осуществлялось в среде ENVI-met, позволяющей решать уравнения турбулентного переноса и радиационного обмена в трехмерной модели системы «городской каньон - крыша». Оценивались три стратегии снижения интенсивности теплового острова: массовое применение рефлективных покрытий, экстенсивное озеленение плоских кровель и формирование аэродинамических коридоров. Полученные пространственные распределения термофизических параметров затем переносились на кадастровую сетку для разработки конкретных градостроительных регламентов.

Результаты проведения исследования и их обсуждение. Пространственный анализ выявил резкую дифференциацию термического режима г. Волгограда, не поддающуюся описанию линейными моделями. Установлено, что в дневные часы доминирующим фактором, определяющим LST, выступает альбедо и теплоемкость материалов: промышленные зоны с металлическими ангарами и обширные парковочные пространства формируют локальные экстремумы с LST до 72 °C, а территории с плотной многоэтажной жилой застройкой демонстрируют более низкие значения LST за счет взаимного затенения, но при этом удерживают аномально высокие значения T_a в ночное время из-за эффекта «тепловой ловушки» (низкий SVF). Объекты голубой инфраструктуры генерируют выраженный охлаждающий эффект, однако его адвективное распространение вглубь материковой части города лимитируется перпендикулярной береговой линии застройкой, выступающей в роли аэродинамического барьера. Валидация показала, что коэффициент корреляции между спутниковой LST и наземной T_a варьирует от 0,82 в разреженных малоэтажных районах до 0,41 в каньонах магистральных улиц, что подтверждает

необходимость совместного использования обеих метрик.

Результаты сценарного моделирования термодинамических потоков представлены в таблице 1, где отражена трансформация компонент уравнения энергетического баланса ($Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$) при реализации различных стратегий [1].

Таблица 1 - Моделирование компонент радиационного и теплового баланса городской среды (Волгоград, сценарий экстремальной жары, 14:00 LST)

Сценарий пространственного развития	Баланс коротковолновой радиации (Q^*), Вт/м²	Поток скрытого тепла (Q_E), Вт/м²	Поток явного тепла (Q_H), Вт/м²	Теплоаккумуляция массива (ΔQ_S), Вт/м²	Прогнозное изменение T_a (день / ночь), К
Базовый (существующая застройка)	485	45	310	130	0 / 0
Рефлективные кровли (альбедо > 0,7)	290	40	145	105	-1,4 / -0,2
Экстенсивные зеленые крыши (LAI = 3,5)	460	285	95	80	-0,9 / -0,6
Аэродинамический коридор (снос точечных преград)	485	55	260	170	-0,4 / -1,8

Источник: разработано автором.

Применение рефлективных материалов (сценарий 2), подробно описанное в [2], радикально снижает поглощенную радиацию (Q^*) и пиковый поток явного тепла (Q_H), что обеспечивает быстрое охлаждение воздуха днем. Однако низкая теплоаккумуляция (ΔQ_S) и отсутствие эвапотранспирации приводят к тому, что ночью такие поверхности стремительно остывают, не оказывая существенного влияния на ночной тепловой остров, формируемый массивными бетонными стенами. Внедрение зелено-голубой инфраструктуры (сценарий 3) приводит к перераспределению энергии: значительная доля радиационной энергии преобразуется в поток скрытого тепла (Q_E) за счет фазового перехода влаги в субстрате. Это требует интегрирования систем сбора и удержания ливневых вод, поскольку в условиях засушливого волгоградского лета пересыхание субстрата

резко снижает охлаждающий эффект, превращая сухую зеленую крышу в дополнительный источник явного тепла.

Особого внимания заслуживает сценарий формирования аэродинамических коридоров (сценарий 4). Моделирование показало, что сохранение разрывов во фронтальной застройке, ориентированных на доминирующие северо-западные ветры, обеспечивает адвективное поступление более холодного воздуха с акватории Волги. Хотя дневное снижение T_a оказывается незначительным из-за интенсивного турбулентного перемешивания, ночная вентиляция городских каньонов критически важна для удаления накопленного за день тепла (ΔQ_S) и снижения рисков для здоровья уязвимых групп населения, не имеющих доступа к системам кондиционирования.

Выявленные термофизические закономерности необходимо учитывать в нормативной базе путем корректировки правил землепользования и застройки. Традиционное зонирование, базирующееся на функциональном назначении территорий, неспособно адекватно реагировать на микроклиматические вызовы. Предлагается введение в состав градостроительных регламентов дополнительных параметров допустимого использования земельных участков: «индекс теплового отражения» (обязательный для плоских кровель коммерческой и промышленной застройки) и «коэффициент аэродинамической проницаемости». Для территорий, попадающих в буферные зоны потенциальных ветровых коридоров, выявленных посредством ГИС-анализа рельефа и розы ветров, необходимо установить жесткие ограничения на предельную высоту и сплошность застройки, сохранив эти пространства для внутриквартального озеленения или создания открытых водоемов-накопителей.

Выводы. Проведенное комплексное обследование термодинамических процессов в условиях волгоградской агломерации позволило верифицировать гипотезу о влиянии морфологии линейной застройки на пространственную конфигурацию городского пограничного слоя. Установлено, что вытянутая

вдоль акватории Волги городская структура формирует асимметричный паттерн теплообмена, где адвективный потенциал водного объекта нивелируется перпендикулярно ориентированными магистралями и массивами многоэтажной застройки, выступающими в роли аэродинамических барьеров. Данный феномен, недостаточно освещенный в классических работах, посвященных изотропным городским системам, требует специфических подходов к организации вентиляционных коридоров, учитывающих не только синоптическую розу ветров, но и орографические особенности волжских террас, создающих локальные бризовые циркуляции.

Методология исследования, основанная на совместном использовании спутниковой термометрии и мобильных наземных трансект, показала некорректность упрощенного отождествления температуры подстилающей поверхности с термическим режимом приземного воздуха. Выявленный фазовый сдвиг между пиковыми значениями LST и максимумами T_a, достигающий в условиях засушливого степного климата 3-4 часов, обусловлен высокой тепловой инерцией советского строительного фонда и подтверждает необходимость раздельного нормирования радиационных и конвективных параметров среды. Дифференциация приобретает особую значимость при оценке биоклиматического комфорта, поскольку именно температура воздушной массы на высоте двух метров детерминирует физиологический стресс уязвимых групп населения в периоды продолжительных антициклонов.

Сопоставительный анализ стратегий снижения интенсивности теплового острова вскрывает противоречия между рефлективными и вегетативными технологиями, ранее детально описанными для средиземноморского климата, но получающими специфическое преломление в условиях резко континентального режима. Моделирование компонентов уравнения энергетического баланса подтвердило доминирование потока скрытого тепла в системах с высоким индексом листовой поверхности, однако эффективность эвапотранспирации существенно ограничивается дефицитом атмосферных осадков, что требует

обязательной интеграции с системами аккумуляции ливневого стока. Рефлективные покрытия, демонстрирующие превосходство в период дневного максимума инсоляции при альбедо свыше 0,7, оказываются несостоятельными в ночные часы, когда именно вегетативные субстраты обеспечивают диссипацию накопленной тепловой энергии через длинноволновое выхолаживание, компенсируя эффект тепловой ловушки в плотной застройке.

Ограничением реализованного подхода остается масштабность пространственного моделирования, не позволяющая в полной мере учесть микроуровневые эффекты каньонов с коэффициентом видимости неба ниже 0,3, где турбулентный перенос приобретает нестационарный характер. Дальнейшее развитие методологии предполагает переход к вычислительной гидродинамике высокого разрешения, интегрированной с параметрическими моделями растительного покрова, учитывающими сезонную динамику фенологических фаз и межвидовую вариабельность транспирационных коэффициентов. Перспективным направлением является разработка адаптивных алгоритмов управления зелено-голубой инфраструктурой, основанных на прогнозных метеорологических данных и позволяющих оптимизировать режимы орошения в соответствии с ожидаемыми волнами жары, что особенно актуально в контексте прогнозируемого учащения экстремальных температурных аномалий.

Включение полученных результатов в нормативно-правовое регулирование требует совершенствования традиционных подходов к территориальному зонированию, исторически базирующемуся на функциональном назначении территорий без учета их термодинамических характеристик. Предложенная система дополнительных градостроительных регламентов, включающая индексы теплового отражения и аэродинамической проницаемости, создает инструментарий для превентивного управления микроклиматическими рисками на стадии разработки проектов планировки территорий.

Список литературы

1. Литовский В. В. Пространственное развитие Екатеринбурга: использование в градопланировке потенциала городского острова тепла // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2025. – №. 2 (65). – С. 30-36.
2. Демежко Д. Ю., Хацкевич Б. Д., Факаева Н. Р., Горностаева А. А., Антипин А. Н. Теплопотери зданий и формирование подземного городского острова тепла // Литосфера. – 2025. – Т. 25. – №. 5. – С. 1201-1215.
3. Добрякова В. А., Белова Ю. В., Черемных Л. Д. Исследование и моделирование городского острова тепла на примере г. Тюмени // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2025. – Т. 31. – С. 195-211.
4. Лысенко С. А., Зайко П. О. Метеорологическое моделирование городских «островов тепла» на территории Беларуси в условиях современного глобального потепления // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67. – №. 2. – С. 134-143.
5. Туан Л. М., Бакаева Н. В. Взаимосвязь между городским островом тепла и городским островом загрязнения: аналитический обзор и методы исследований // Экология урбанизированных территорий. – 2023. – №. 2. – С. 72-83.
6. Федорова Д. Д. Генеративное моделирование как концептуальный подход для формирования современных городских пространств // Вестник науки. – 2026. – Т. 4. – №. 5 (98). – С. 2378-2392.
7. Казанцев П. А. Исследование предпосылок формирования устойчивой к климатическим изменениям городской среды в условиях горного побережья и муссонного климата (на примере г. Владивостока) // Урбанистика. – 2024. – №. 3. – С. 28-52.
8. Ермишина А. А., Каргин Н. В., Короткова В. А., Короткова С. Г. Основные пути развития архитектурной среды открытых пространств в городах Северного региона // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2024. – №. 3 (60). – С. 131-143.
9. Круковская О. Ю., Алисиевич С. В. Биоклиматическая комфортность урбанизированных территорий Беларуси // Природопользование. – 2026. – №. 1.

– С. 132-147.

10. Бектемысова Г. У., Молдагулова А. Н., Шайкемелев Г. Т., Омаров С. С., Нуралыкызы С. Пространственно-временная аналитика городского населения с применением тепловых карт // Вестник Казахстанско-Британского технического университета. – 2025. – Т. 22. – №. 1. – С. 150-162.

11. Карабаев А. М., Нормухаммадов А. А. Научные подходы и методы планирования сети велосипедных дорожек в условиях развивающихся городов // Qazaq Highway Science and Innovation. – 2026. – Т. 1. – №. 2.

References

1. Litovskij V. V. Prostranstvennoe razvitie Ekaterinburga: ispol`zovanie v gradoplanirovke potenciala gorodskogo ostrova tepla // Akademicheskij vestnik UralNIIproekt RAASN. – 2025. – №. 2 (65). – S. 30-36.

2. Demezhko D. Yu., Xaczkevich B. D., Fakaeva N. R., Gornostaeva A. A., Antipin A. N. Teplopoteri zdanij i formirovanie podzemnogo gorodskogo ostrova tepla // Litosfera. – 2025. – T. 25. – №. 5. – S. 1201-1215.

3. Dobryakova V. A., Belova Yu. V., Cheremny`x L. D. Issledovanie i modelirovanie gorodskogo ostrova tepla na primere g. Tyumeni // InterKarto. InterGIS. – 2025. – T. 31. – S. 195-211.

4. Ly`senko S. A., Zajko P. O. Meteorologicheskoe modelirovanie gorodskix «ostrovov tepla» na territorii Belarusi v usloviyax sovremennogo global`nogo potepleniya // Doklady` Nacional`noj akademii nauk Belarusi. – 2023. – T. 67. – №. 2. – S. 134-143.

5. Tuan L. M., Bakaeva N. V. Vzaimosvyaz` mezhdu gorodskim ostrovom tepla i gorodskim ostrovom zagryazneniya: analiticheskij obzor i metody` issledovanij // E`kologiya urbanizirovanny`x territorij. – 2023. – №. 2. – S. 72-83.

6. Fedorova D. D. Generativnoe modelirovanie kak konceptual`ny`j podxod dlya formirovaniya sovremenny`x gorodskix prostranstv // Vestnik nauki. – 2026. – T. 4. – №. 5 (98). – S. 2378-2392.

7. Kazancev P. A. i dr. Issledovanie predposy`lok formirovaniya ustojchivoj k

klimaticheskim izmeneniyam gorodskoj sredy` v usloviyax gornogo poberezh`ya i mussonnogo klimata (na primere g. Vladivostoka) // Urbanistika. – 2024. – №. 3. – S. 28-52.

8. Ermishina A. A., Kargin N. V., Korotkova V. A., Korotkova S. G. Osnovny`e puti razvitiya arxitekturnoj sredy` otkry`ty`x prostranstv v gorodax Severnogo regiona // Vestnik Inzhenernoj shkoly` Dal`nevostochnogo federal`nogo universiteta. – 2024. – №. 3 (60). – S. 131-143.

9. Krukovskaya O. Yu., Alisievich S. V. Bioklimaticheskaya komfortnost` urbanizirovanny`x territorij Belarusi // Prirodopol`zovanie. – 2026. – №. 1. – S. 132-147.

10. Bektemy`sova G. U., Moldagulova A. N., Shajkemelev G. T., Omarov S. S., Nuraly`ky`zy` S. Prostranstvenno-vremennaya analitika gorodskogo naseleniya s primeneniem teplovy`x kart // Vestnik Kazaxstansko-Britanskogo texnicheskogo universiteta. – 2025. – T. 22. – №. 1. – S. 150-162.

11. Karabaev A. M., Normuxammadov A. A. Nauchny`e podxody` i metody` planirovaniya seti velosipedny`x dorozhek v usloviyax razvivayushhixsya gorodov // Qazaq Highway Science and Innovation. – 2026. – T. 1. – №. 2.

Статья поступила в редакцию 24.03.2026; одобрена после рецензирования 23.04.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 24.03.2026; approved after peer review 23.04.2026; accepted for publication 28.08.2026.

Научная статья
УДК 711.43

ВАРИАНТЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ОБНОВЛЕНИЯ СЕЛЬСКИХ ПОСЕЛЕНИЙ

Сагайдак Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, Омский государственный технический университет, Россия, Омск, dmitrii.sagaidak@mail.ru;

Танчук Павел Владимирович, кандидат технических наук, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Россия, Воронеж, vgltu_tanchuk@mail.ru

Аннотация. Прогрессирующая депопуляция сельских территорий требует отказа от унифицированных подходов к их планировочной организации. В статье предложена методика разработки типологических моделей ревитализации сельских поселений, основанная на раздельном расчёте индексов потенциала развития и уязвимости. Эмпирическую базу составили демографические, транспортные, экономические и ландшафтные показатели 87 населенных пунктов Кирилловского района Вологодской области, отслеживаемые в динамике за пятнадцатилетний период. Пространственная кластеризация выполнялась методом k-средних с предварительным энтропийным взвешиванием индикаторов. Проведённый анализ позволил выделить четыре устойчивые группы поселений: от населённых пунктов с высоким потенциалом развития агротуризма и ремесленного производства до удалённых поселений, для которых предлагается поэтапное прекращение функционирования с переселением жителей. Установлено, что объединение показателей потенциала развития и уязвимости в один индекс искажает оценку состояния поселений и приводит к неэффективному распределению бюджетных средств. На основе выявленных факторных профилей сформулированы дифференцированные архитектурно-планировочные рекомендации по функциональной адаптации пустующих зданий, оптимизации инженерной инфраструктуры и зонированию

территорий. Предложенная методика позволяет перейти от общих рассуждений о будущем сельских поселений к разработке конкретных градостроительных решений. Результаты исследования могут быть использованы при актуализации генеральных планов и схем территориального планирования муниципальных образований.

Ключевые слова: сельские поселения; ревитализация территорий; типология сельских поселений; планировка сельских населенных мест; пространственное зонирование; кластерный анализ; депопуляция; архитектурно-планировочная организация.

Original article

OPTIONS FOR SPATIAL RENEWAL OF RURAL SETTLEMENTS

Sagaidak Dmitrii Anatolevich, Candidate of Technical Sciences, Omsk State Technical University, Omsk, Russia, dmitrii.sagaidak@mail.ru;

Tanchuk Pavel Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia, vgltu_tanchuk@mail.ru

Abstract. The progressive depopulation of rural areas necessitates a shift away from standardized approaches to their planning. This article proposes a methodology for developing typological models for rural settlement revitalization based on the mathematical separation of development potential and territorial vulnerability indices. The empirical base consists of demographic, transport, economic, and landscape indicators for 87 settlements in the Kirillovsky District of the Vologda Region, monitored dynamically over a fifteen-year period. Spatial clustering was performed using the k-means method with preliminary entropy weighting of the indicators. The analysis revealed four stable groups of settlements, ranging from areas with a high resource base for agritourism and handicraft production development to peripheral localities requiring an organized curtailment of activities and the relocation of residents. It is proven that aggregating development and vulnerability indicators into a

single integrated index distorts the actual picture, leading to an inefficient allocation of budget funds. Based on the identified factor profiles, differentiated architectural planning recommendations were formulated for the functional adaptation of vacant buildings, optimization of utility infrastructure, and territorial zoning. The proposed tools allow the discussion about the future of the village to move from the realm of general declarations to the substantive field of urban planning. The research results can be used to update master plans and territorial planning schemes for municipalities.

Keywords: rural settlements; territorial revitalization; typology of rural settlements; planning of rural settlements; spatial zoning; cluster analysis; depopulation; architectural and planning organization.

Введение. Стремительная урбанизация последних десятилетий существенно трансформировала структуру глобальных расселенческих систем [1]. Обратной стороной концентрации человеческого капитала в городских агломерациях стала прогрессирующая деградация сельских территорий. Данный процесс сопровождается массовым оттоком трудоспособного населения, увеличением доли пожилых жителей, запустением жилищного фонда и сокращением сети сельских поселений [2], [3]. В развивающихся экономиках, где разрыв в качестве жизни между городом и деревней остается критическим, эта тенденция приобретает характер системного пространственного кризиса. Экономическая рецессия на периферии запускает механизм отрицательной обратной связи: нехватка рабочих мест провоцирует дальнейшую миграцию, что влечет за собой неэффективное использование земельных ресурсов, разрушение сложившихся социальных связей и постепенное угасание самих населенных пунктов [4-6].

В градостроительной практике нередко исходят из того, что каждое сельское поселение можно сохранить и обеспечить его равномерное развитие. Однако пространственный анализ факторных предпосылок демонстрирует иную картину [7]. Масштабные эмпирические исследования, охватывающие десятки

тысяч территорий, убедительно доказывают, что значительная часть сельских населенных пунктов объективно лишена базовых ресурсов для устойчивого функционирования [8], [9]. Попытки искусственно законсервировать заведомо убыточные поселения растягивают во времени их неизбежное угасание, создавая неоправданную нагрузку на муниципальные бюджеты и инфраструктурные сети. Признание факта закономерного сокращения сети сельских поселений становится базовым условием для выработки адекватной стратегии территориального планирования, требующей отказа от унифицированных подходов [10].

Преодоление кризисных явлений требует перехода к дифференцированным стратегиям, базирующимся на объективной оценке потенциала конкретных локализаций. В условиях перехода государственной политики от сокращения бедности к комплексному развитию сельских районов особое значение приобретает определение функций каждого поселения [11]. Результативность градостроительных мероприятий зависит от точности оценки ресурсных ограничений и конкурентных преимуществ территории. Формирование научно обоснованных типологических моделей ревитализации выступает в этом контексте необходимым инструментом территориального зонирования, позволяющим перевести дискуссию о будущем села из плоскости общих деклараций в предметное поле градостроительного проектирования.

Опора на эмпирические данные и математическое моделирование позволяет минимизировать субъективизм при разработке схем планирования. Современные подходы к типологизации предполагают интеграцию обширных массивов статистической и геопространственной информации, включающей показатели демографической плотности, транспортной доступности, состояния природной среды и наличия специфических хозяйственных ресурсов [12], [13]. Применение методов кластерного анализа, включая метод самоорганизующихся карт, и многокритериальной оценки, например метода TOPSIS, позволяет выявлять закономерности распределения поселений и рассчитывать

интегральные индексы их развития. Эти методы позволяют не только оценивать текущее состояние населённых пунктов, но и прогнозировать направления их развития, выделяя поселения с перспективами укрупнения и роста, территории для включения в городскую черту, поселения с особой специализацией и поселения, для которых рассматривается переселение жителей.

Разработка таких типологических моделей служит фундаментом для оптимизации планировочной структуры сельских районов. Она позволяет обосновать концентрацию капитальных вложений в поселениях с перспективами роста, определить потребности принимающих центров в инженерной и социальной инфраструктуре и разработать сценарии поэтапного прекращения функционирования поселений с устойчивой убылью населения. Опираясь на строгий анализ ресурсных предпосылок и индикаторов качества среды, градостроительная наука получает действенный механизм управления пространственным развитием. Это обеспечивает баланс между сохранением жизнеспособных сельских территорий и рациональной адаптацией расселенческой сети к объективным социально-экономическим реалиям, что полностью отвечает задачам научно обоснованного планирования сельских населенных пунктов.

Обзор литературы. Проблема типологизации сельских поселений в контексте их пространственного развития занимает заметное место в градостроительной науке на протяжении последних двух десятилетий. Исходным пунктом для большинства современных работ служит признание того факта, что сельская местность не представляет собой однородного пространства, и попытки применять единые планировочные решения ко всем населённым пунктам заранее обречены на невысокую результативность. Ещё в середине 1990-х годов голландский географ И. Зонневельд заложил основы ландшафтно-экологического подхода к районированию сельских территорий, а в последующие годы его идеи получили развитие в исследованиях европейских учёных, которые начали привлекать количественные методы классификации.

Значительный шаг вперёд сделали ван Эйпен и соавторы, предложившие схему типологизации сельских районов Европы на основе сочетания экономической плотности и транспортной доступности. Их работа показала, что даже на относительно компактной территории Европейского союза выделяются качественно различные категории - от пригородных зон до глубоко периферийных районов, - и каждая из них требует собственной стратегии планирования [14]. В дальнейшем этот подход усложнялся: исследователи включали в анализ демографические переменные, показатели занятости, уровень образования, характеристики жилищного фонда и экологические ограничения. Бейязли с коллегами, в частности, применил многомерный статистический анализ к 43 переменным, описывающим сельские поселения черноморского региона Турции, и получил детализированную типологию, учитывающую миграционные потоки, экономическую структуру и давление на природные ресурсы.

Особый интерес для настоящей работы представляют два недавних исследования, выполненных на материале Китая и опубликованных в 2021–2022 годах. Чжоу и соавторы разработали аналитическую схему, позволяющую определить перспективы каждого сельского поселения - возрождение или угасание - на основе его факторной обеспеченности. Авторы обработали данные почти по 2,4 млн деревень, сгруппированных в 48 322 волости, и применили нейросетевой метод самоорганизующихся карт для кластерного анализа. В результате все поселения были отнесены к четырём типам: укрупнение и развитие, пригородное поглощение, развитие на основе особых ресурсов и переселение с оттоком населения. Примечательно, что около двух третей деревень попали в последнюю категорию, что авторы объясняют объективным отсутствием у этих территорий экономических и географических предпосылок для роста. Лю, Гун и Гун, в свою очередь, сосредоточились на построении системы индикаторов для оценки потенциала сельских поселений в переходный период от ликвидации бедности к комплексному оживлению. Они использовали

метод TOPSIS в сочетании с энтропийным взвешиванием и оценили 16 городов провинции Аньхой по пяти критериям: состояние промышленности, экологическая пригодность для жизни, сельская культура, качество управления и уровень жизни населения [15].

Оба исследования сходятся в одном принципиальном положении: типология должна формироваться на основе эмпирических данных [16], [17]. Чжоу и соавторы прямо указывают, что их кластеры возникли в результате машинной обработки 45 индикаторов, а не были заданы экспертным путём до начала расчётов. Лю и соавторы подчёркивают, что различные сельские территории играют разные роли, и попытки навязать им единый сценарий развития противоречат фактическому распределению ресурсов. Вместе с тем обе работы имеют ограничения, связанные с масштабом анализа. Исследование Чжоу выполнено на уровне волостей, что слишком укрупняет картину для принятия конкретных планировочных решений, а исследование Лю проведено на уровне префектур и не охватывает отдельные населённые пункты.

В отечественной градостроительной практике проблема типологизации сельских поселений также привлекает внимание, хотя количественные методы применяются значительно реже. Традиционно преобладает экспертное районирование, при котором исследователь заранее формулирует несколько желательных сценариев развития и затем распределяет поселения по этим сценариям на основе качественных оценок. Такой подход создаёт существенную методологическую проблему: интегральные показатели используются не для выявления закономерностей, а для отнесения территорий к заранее выбранным моделям. В итоге типология отражает не столько объективные свойства поселений, сколько предпочтения автора, что снижает её прогностическую ценность и затрудняет применение в реальных схемах территориального планирования.

Настоящая статья ставит задачу преодолеть указанное ограничение. Мы исходим из того, что типологические группы должны формироваться в ходе

кластерного анализа на основе измеримых показателей, а содержательная интерпретация и назначение сценариев ревитализации возможны только после того, как кластеры выявлены и описаны. Кроме того, мы считаем необходимым разделить потенциал развития и степень уязвимости поселения, поскольку высокая потребность в ревитализации далеко не всегда совпадает с наличием ресурсов для её осуществления.

Материалы и методы исследования. Объектом исследования выбран Кирилловский район Вологодской области. Выбор обусловлен несколькими соображениями. Район демонстрирует выраженную и устойчивую депопуляцию на протяжении последних двух десятилетий: если в 2002 году его население составляло около 21,5 тыс. человек, то к началу 2023 года сократилось до 14,1 тыс., что соответствует среднегодовому темпу убыли примерно 1,8 %. На его территории расположены как относительно крупные сёла с сохранившейся инфраструктурой, так и мелкие деревни, стремительно теряющие жителей. Присутствие Кирилло-Белозерского монастыря, Ферапонтова монастыря и системы озёр создаёт неравномерное распределение культурных и ландшафтных ресурсов, что делает район удобным полигоном для проверки типологических моделей.

Анализ проводился на уровне отдельных сельских населённых пунктов, а не муниципальных образований или района в целом. В исходную выборку вошли 87 поселений с численностью постоянного населения не менее 10 человек по состоянию на 1 января 2022 года. Более мелкие населённые пункты, фактически утратившие постоянное население, исключены из расчётов, поскольку для них вопрос ревитализации теряет практический смысл.

Система показателей строилась по четырём блокам, каждый из которых описывает отдельное измерение жизнеспособности поселения. Демографический блок включал численность постоянного населения, долю лиц старше трудоспособного возраста, коэффициент миграционного прироста или убыли и темп изменения численности за 2008-2022 годы. Использование

пятнадцатилетнего временного ряда позволило отделить устойчивую депопуляцию от кратковременных колебаний, связанных, например, с закрытием или открытием отдельного предприятия. Транспортный блок характеризовался временем в пути до районного центра на общественном транспорте в зимний период, количеством рейсовых автобусных маршрутов, проходящих через поселение в неделю, и расстоянием до ближайшей дороги с твёрдым покрытием. Экономический блок включал число зарегистрированных рабочих мест в границах населённого пункта, количество действующих предприятий и организаций, а также объём туристического потока для поселений, расположенных вблизи объектов культурного наследия. Ландшафтный блок описывал тип преобладающего ландшафта, наличие водных объектов в радиусе 2 км и долю лесопокрытой площади в окрестностях поселения.

Источниками данных послужили базы Росстата (всероссийские переписи 2002, 2010 и 2021 годов, ежегодные демографические сборники Вологодской области), сведения администрации Кирилловского муниципального района о транспортном обслуживании, реестр предприятий и организаций, а также открытые геопространственные данные о ландшафтах и гидрографии.

Ключевым методологическим решением стало разделение интегральной оценки на два самостоятельных индекса. Индекс потенциала развития (ИПР) отражает наличие у поселения ресурсов, которые могут быть мобилизованы для экономического и социального оживления. Индекс уязвимости (ИУ) фиксирует глубину накопленных проблем — демографических, инфраструктурных, экономических. Такое разделение необходимо, поскольку поселение может одновременно обладать высоким потенциалом, скажем, выгодным расположением у озера, и высокой уязвимостью из-за критического старения населения, а смешение этих двух измерений в едином показателе искажает реальную картину.

Нормирование исходных показателей выполнялось методом линейного

масштабирования в диапазон от 0 до 1. Для показателей, рост которых улучшает положение поселения (численность населения, число рабочих мест, частота транспорта), применялась прямая формула: $z = (x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$. Для показателей, рост которых ухудшает положение (доля пожилых, время в пути до райцентра), использовалась обратная формула: $z = (x_{max} - x) / (x_{max} - x_{min})$.

Веса показателей определялись энтропийным методом, который позволяет установить значимость каждого индикатора на основе фактического разброса значений в выборке, а не на основе субъективных экспертных оценок. Показатель с высокой информационной энтропией, то есть такой, значения которого мало различаются между поселениями, получает меньший вес, поскольку он слабо дифференцирует территории. Напротив, показатель с низкой энтропией и значительным разбросом вносит больший вклад в итоговую оценку. Этот подход подробно описан в работе Лю и соавторов и хорошо зарекомендовал себя при оценке сельских территорий провинции Аньхой.

Для проверки устойчивости результатов к выбору весов проведён анализ чувствительности: веса каждого из четырёх блоков последовательно увеличивались на 20 % за счёт пропорционального уменьшения остальных, после чего кластеризация повторялась. Устойчивым считался результат, при котором не менее 80 % поселений сохраняли принадлежность к исходному кластеру.

Кластерный анализ выполнялся методом k-средних с предварительным определением оптимального числа кластеров по критерию силуэта. Расчёт проводился раздельно для ИПР и ИУ, после чего результаты совмещались на двумерной плоскости «потенциал — уязвимость». Это позволило выделить группы поселений, различающиеся не только по общему уровню развития, но и по соотношению ресурсов и проблем (рисунок 1).



Рисунок 1 - Матрица «потенциал — уязвимость» для 87 сельских поселений Кирилловского района (источник: разработано авторами)

На рисунке 1 каждое поселение представлено точкой в координатах ИПР (горизонтальная ось) и ИУ (вертикальная ось). Размер точки пропорционален численности населения. Четыре кластера обозначены различными символами. Хорошо видно, что поселения не выстраиваются вдоль единой диагонали, что подтверждает целесообразность разделения двух измерений: ряд территорий с умеренным потенциалом демонстрируют неожиданно низкую уязвимость благодаря сохранившейся социальной инфраструктуре, тогда как некоторые поселения с заметными ресурсами оказываются в зоне высокой уязвимости из-за стремительной депопуляции.

Результаты исследования и их обсуждение. Кластерный анализ выявил четыре устойчивые группы поселений, которые далее получили содержательную интерпретацию на основе их факторных профилей. Подчеркнём, что наименования и характеристики типов сформулированы после завершения расчётов, а не до них.

Первый кластер, объединивший 12 поселений, характеризуется

сочетанием высокого потенциала и низкой уязвимости. Эти населённые пункты расположены преимущественно в центральной и северной частях района, вблизи Кирилло-Белозерского и Ферапонтова монастырей, а также на берегах озёр Сиверское и Бородаевское. Среднее расстояние до районного центра не превышает 18 км, все поселения имеют регулярное автобусное сообщение. Демографическая ситуация относительно стабильна: среднегодовая убыль за 2008–2022 годы составила 0,6 %, что существенно ниже среднего по району. В этих сёлах сосредоточены основные туристические потоки — по данным районной администрации, в 2022 году их посетило около 45 тыс. организованных туристов. Ландшафтные условия благоприятны: сочетание озёрных побережий, хвойных лесов и исторической застройки создаёт высокую рекреационную привлекательность. На основе выявленного факторного профиля для данной группы предложен сценарий агротуристического и культурно-рекреационного развития.

Второй кластер включает 9 поселений с высоким потенциалом, но высокой уязвимостью. Несмотря на выгодное транспортное положение на трассе Вологда — Медвежьегорск и наличие свободных производственных площадок, демографическая ситуация в поселениях этой группы остаётся критической. Доля лиц старше трудоспособного возраста в среднем достигает 48 %, а миграционный отток за пятнадцать лет превысил 35 %. Эти сёла в прошлом были центрами лесозаготовки и переработки, и закрытие предприятий в 2000-х годах запустило процесс депопуляции, который к настоящему времени приобрёл труднообратимый характер. Для данной группы сформулирован сценарий ремесленно-производственного кластера, однако его реализация требует первоочередного решения кадровой проблемы — без привлечения трудовых ресурсов извне производственная специализация останется намерением, не подкреплённым фактическими возможностями.

Третий кластер — самый многочисленный, в него вошли 38 поселений со средним потенциалом и средней уязвимостью. Это типичные сёла и деревни

Кирилловского района, расположенные на удалении 20–45 км от райцентра, с населением от 30 до 300 человек. Транспортная доступность умеренная: автобусы ходят два-три раза в неделю, а зимой сообщение нередко прерывается. Экономическая база ограничена бюджетными учреждениями — школой, фельдшерско-акушерским пунктом, библиотекой — и мелкой розничной торговлей. Ландшафтные условия разнообразны, но выраженных конкурентных преимуществ нет. Для этой группы наиболее реалистичным представляется сценарий рекреационно-жилого кластера, ориентированного на сезонное дачное использование и удалённую занятость, при условии улучшения цифровой и дорожной инфраструктуры.

Четвёртый кластер объединяет 28 поселений с низким потенциалом развития и высокой социальной и инфраструктурной уязвимостью. В его состав входят малочисленные деревни, расположенные на периферии района и удалённые от основных транспортных коридоров и центров повседневного обслуживания. Средняя продолжительность поездки до районного центра превышает 1,5 ч; регулярное автобусное сообщение отсутствует. За рассматриваемый пятнадцатилетний период численность населения отдельных поселений сократилась более чем на 60 %, а в ряде деревень количество постоянных жителей составляет менее 15 человек. Указанные характеристики свидетельствуют о существенных ограничениях для реализации капиталоёмких программ восстановления. В качестве альтернативных планировочных сценариев могут рассматриваться поддержание минимально необходимой инфраструктуры, развитие мобильных форм обслуживания, восстановление транспортной доступности и добровольное переселение при наличии соответствующих социально-экономических оснований (таблица 1).

Таблица 1 - Факторные профили четырёх кластеров сельских поселений Кирилловского района

Показатель	Кластер 1 (n=12)	Кластер 2 (n=9)	Кластер 3 (n=38)	Кластер 4 (n=28)
Среднее население, чел.	485	310	120	28
Темп убыли за 2008–2022 гг., %	−8,4	−37,2	−22,5	−62,1
Доля лиц старше трудоспособного возраста, %	31	48	39	64
Время до райцентра, мин	22	35	55	95
Рейсов в неделю	14	10	3	0
Число рабочих мест	78	42	12	1
Туристический поток, тыс. чел./год	45,3	2,1	0,4	0
Лесистость окрестностей, %	58	62	54	71
ИПР (нормированный)	0,74	0,61	0,38	0,12
ИУ (нормированный)	0,28	0,72	0,49	0,83

Источник: разработано авторами.

Результаты, представленные в таблице 1, характеризуют различия социально-экономических и пространственных параметров выделенных типологических групп сельских поселений. Особое внимание обращает на себя второй кластер, поселения которого по интегральному показателю потенциала развития незначительно уступают первой группе, однако характеризуются индексом уязвимости, превышающим соответствующий показатель первого кластера в 2,6 раза. Это свидетельствует о наличии ограничений, связанных с дефицитом трудовых ресурсов и неблагоприятной демографической структурой, которые необходимо учитывать при выборе направлений хозяйственной активизации. Третий кластер включает 38 населённых пунктов и представляет наиболее многочисленную территориальную группу. Для четвёртого кластера сочетание низкого потенциала развития и высокой уязвимости указывает на необходимость дифференцированного анализа возможных сценариев территориальной поддержки, инфраструктурной модернизации и пространственной реорганизации. Экономическая целесообразность соответствующих мероприятий должна определяться сравнением альтернатив с учётом бюджетных ограничений и социальных последствий.

Проверка устойчивости типологии проведена двумя способами.

Ретроспективный анализ показал, что поселения, отнесённые к кластеру 4 по данным 2022 года, уже в 2010 году демонстрировали признаки критического угасания: убыль населения в них за 2002–2010 годы превышала 30 %, а закрытие последних социальных объектов произошло в период 2005–2012 годов. Это подтверждает, что выделенный тип отражает долгосрочную тенденцию, а не случайное состояние. Кроме того, проведено сопоставление с поселениями-аналогами из соседних районов Вологодской области — Белозерского и Вашкинского. Сёла с сопоставимыми факторными профилями, то есть расположенные у озера, вблизи монастыря или на пересечении транспортных путей, в этих районах демонстрируют сходные демографические и экономические траектории, что укрепляет уверенность в адекватности полученной типологии.

Анализ чувствительности к весам показал, что при изменении весовых коэффициентов на ±20 % принадлежность к кластеру сохраняли от 82 до 91 % поселений. Наибольшую подвижность продемонстрировали поселения на границе кластеров 2 и 3, что закономерно, поскольку их факторные профили наиболее близки. Это обстоятельство следует учитывать при практическом применении типологии: для пограничных поселений целесообразно проводить дополнительную оценку с привлечением местных данных, которые не улавливаются статистическими показателями (таблица 2).

Таблица 2 - Пространственные рекомендации по кластерам

Кластер	Сценарий	Приоритетные объекты для адаптации	Инфраструктурные меры	Ожидаемый горизонт
1	Агротуристический и культурно-рекреационный	Пустующие здания гостиниц и общежитий советского периода — под гостевые дома; бывшие складские помещения — под мастерские и сувенирное производство	Расширение парковочных зон у монастырей; благоустройство набережных; прокладка веломаршрутов между озёрами	3–5 лет
2	Ремесленно-производственный	Незадействованные цеха лесоперерабатывающих предприятий — под деревообработку и производство строительных материалов	Ремонт подъездных путей к промзонам; подключение к газопроводу; строительство жилья для привлекаемых специалистов	5–8 лет

3	Рекреационно-жилой	Заброшенные школьные здания — под коворкинги и пункты удалённой работы; пустующие жилые дома — под сезонное жильё	Улучшение покрытия грунтовых дорог; расширение покрытия сотовой связи и широкополосного интернета	5–10 лет
4	Упорядоченное сворачивание	Сохранившиеся жилые дома — под временное размещение сезонных рабочих лесного хозяйства	Консервация водопроводных и электрических сетей; рекультивация заброшенных участков	10–15 лет

Источник: разработано авторами.

Таблица 2 показывает, что архитектурно-планировочные решения напрямую вытекают из факторного профиля каждого кластера. В кластере 1 основной ресурс — историческая застройка и ландшафт, поэтому адаптация сосредоточена на туристической инфраструктуре. В кластере 2 ключевая проблема — утрата населения при наличии производственных мощностей, и планировочные меры направлены на создание условий для возврата трудовых ресурсов. Для поселений кластера 3 необходимы небольшие адресные вложения в развитие цифровой связи, поскольку их жители в перспективе могут работать удалённо. Для поселений кластера 4 необходимо организовать переселение жителей и поэтапное прекращение их функционирования с минимальными социальными последствиями.

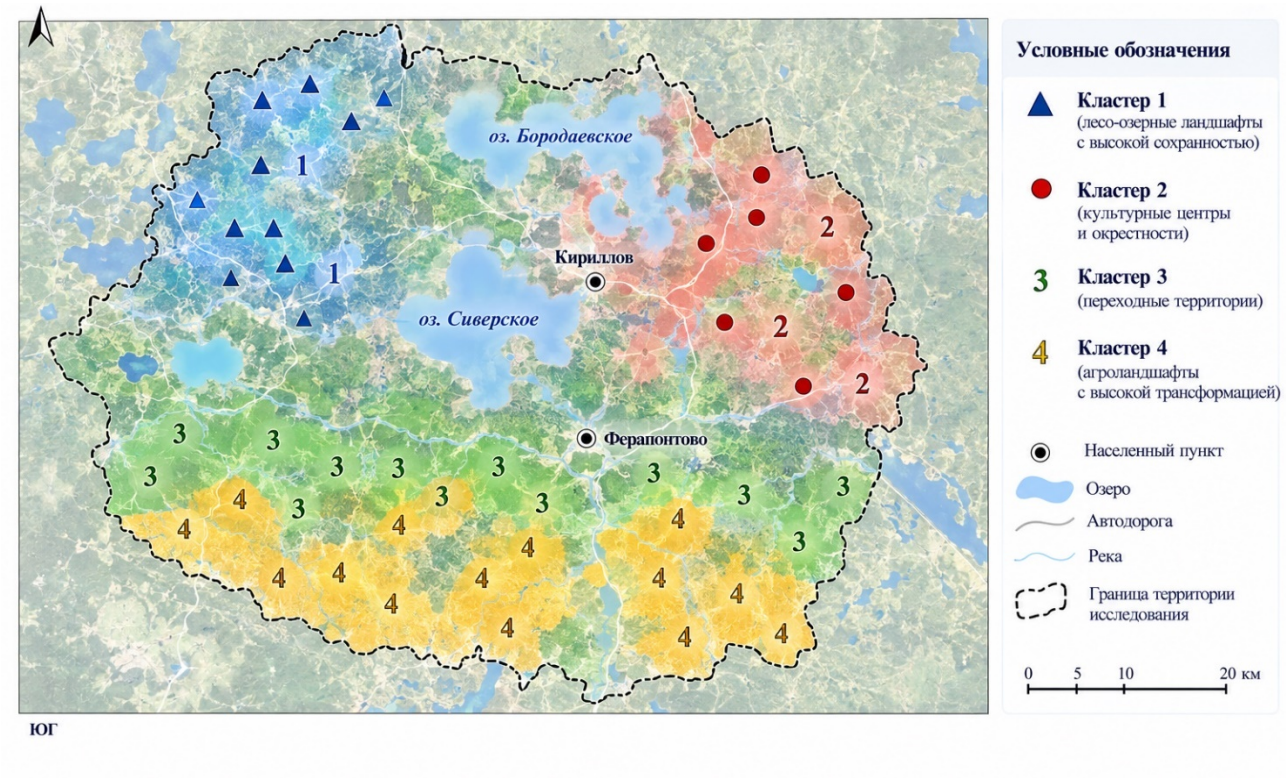


Рисунок 2 - Карта-схема пространственного распределения кластеров на территории Кирилловского района (источник: разработано авторами)

На рисунке 2 отчётливо прослеживается географическая логика выделенных типов. Кластер 1 концентрируется вокруг Кириллова и вдоль береговой линии Сиверского озера, формируя компактное ядро туристической активности. Кластер 2 вытянут вдоль федеральной трассы в северо-восточном направлении, что соответствует его транспортной ориентации. Кластер 3 занимает основную часть территории района, образуя обширную периферийную зону. Кластер 4 фрагментирован и приурочен к наиболее удалённым и труднодоступным участкам на юге и востоке. Такое пространственное распределение подтверждает, что типология отражает реальные географические закономерности, а не случайные статистические артефакты.

Полученные результаты в целом согласуются с выводами Чжоу и соавторов, которые на материале Китая показали, что большинство сельских поселений объективно не располагают ресурсами для устойчивого развития и относятся к категории переселения и оттока. В Кирилловском районе доля таких поселений составляет 32 % (кластер 4), что значительно ниже китайского

показателя в 67–71 %, однако это различие объясняется масштабом анализа и спецификой российского расселения, где даже небольшие деревни формально сохраняют статус населённых пунктов. Если учесть, что значительная часть кластера 3 также находится в зоне неустойчивого равновесия, то совокупная доля территорий, нуждающихся в управляемом сокращении, приближается к половине.

Вместе с тем исследование выявило и специфическую российскую проблему — разрыв между потенциалом и уязвимостью в кластере 2, который не имеет прямого аналога в китайской типологии. Чжоу и соавторы выделяют категорию развития на основе особых ресурсов, но не разделяют внутри неё поселения с высокой и низкой демографической устойчивостью. Для Вологодской области это разделение оказывается критически важным, поскольку наличие производственных площадок и транспортной доступности само по себе не запускает процесс оживления, если в поселении некому работать. Планировочные решения для таких территорий должны включать не только функциональное зонирование и реконструкцию зданий, но и меры демографической политики - программы привлечения молодых специалистов, строительство арендного жилья, создание условий для семей с детьми.

Методологическое ограничение настоящей работы связано с тем, что ряд нематериальных факторов — социальный капитал, активность местных сообществ, наличие неформальных лидеров — остался за рамками анализа из-за отсутствия измеримых данных на уровне отдельных поселений. Чжоу и соавторы также отмечают эту проблему, указывая, что культурные особенности деревень, социальные сети и роль местных жителей могут существенно влиять на траекторию развития, но их количественная оценка на больших территориях пока не разработана. В дальнейших исследованиях предполагается дополнить статистическую типологию полевыми социологическими обследованиями, которые позволят уточнить границы кластеров и скорректировать сценарии для пограничных поселений.

Таким образом, предложенный подход показывает, что типология сельских поселений, построенная на основе раздельно рассчитанных индексов потенциала развития и уязвимости и кластерного анализа, позволяет получить более надёжную и практически применимую классификацию по сравнению с экспертным распределением территорий по заранее заданным сценариям. Разделение потенциала и уязвимости, использование длительных временных рядов и проверка результатов через ретроспективные данные и поселения-аналоги повышают устойчивость типологии и создают основу для дифференцированных архитектурно-планировочных решений, адекватных реальным условиям каждого кластера.

Выводы. Проведенное исследование демонстрирует, что дифференцированный подход к планировке сельских территорий, основанный на разделении потенциала развития и степени уязвимости, позволяет избежать неэффективного распределения бюджетных средств. Выделенные на материале Кирилловского района типологические группы задают четкие векторы пространственной организации: от концентрации функций в точках роста до управляемого сворачивания жизнедеятельности в депрессивных локациях. Однако практическая реализация предложенных сценариев сталкивается с рядом объективных ограничений, которые необходимо учитывать при разработке схем территориального планирования и генеральных планов поселений.

Наиболее существенным барьером выступает высокая зависимость предлагаемых моделей от притока внешнего капитала. Локальные муниципальные бюджеты, особенно в условиях продолжающейся депопуляции, не способны самостоятельно профинансировать масштабные инфраструктурные преобразования, необходимые для агротуристических и ремесленно-производственных кластеров. Переход от базовой поддержки к комплексному оживлению требует создания специфических финансовых механизмов и привлечения частных инвесторов. Без внешнего финансирования даже территории с высоким ресурсным потенциалом рискуют остаться на стадии

проектных инициатив. Это диктует необходимость включения в градостроительную документацию не только планировочных решений, но и детального обоснования инвестиционной привлекательности конкретных узлов, а также разработки льготных режимов землепользования для стимулирования бизнеса.

Экономика поселений, ориентированных на культурно-рекреационное развитие, зависит от туристического потока и подвержена значительным сезонным колебаниям. В летние месяцы инженерная и транспортная инфраструктура испытывает пиковые нагрузки, тогда как в межсезонье объекты обслуживания простаивают, что ведет к оттоку кадров и снижению качества среды для постоянного населения. Планировочные мероприятия в таких населенных пунктах должны изначально закладывать принципы многофункциональности. Пустующие здания и общественные пространства необходимо адаптировать таким образом, чтобы они могли обслуживать как приезжих, так и местных жителей в течение всего года, сглаживая тем самым диспропорции сезонного спроса и обеспечивая круглогодичную занятость.

Методологические рамки настоящей работы также накладывают определенные ограничения на полноту охвата факторов развития. Построенная модель опирается преимущественно на материальные и статистически измеримые показатели, такие как демография, транспортная доступность и состояние жилого фонда. При этом за рамками количественного анализа остаются нематериальные ресурсы, включая социальный капитал, активность местных сообществ и наличие неформальных лидеров. Именно эти факторы нередко определяют, сможет ли поселение с ограниченными ресурсами развиваться благодаря самоорганизации жителей или продолжит приходить в упадок. Игнорирование субъективного фактора может привести к тому, что формально обоснованные планировочные решения не найдут отклика у жителей.

Дальнейшее совершенствование инструментов территориального планирования требует интеграции социологических данных в

градостроительный анализ. Будущие исследования должны быть направлены на разработку методов оценки готовности населения к изменениям и выявление внутренних социальных механизмов, способных компенсировать нехватку материальных ресурсов. Учёт ресурсного потенциала территорий и возможностей местного населения позволит разрабатывать модели развития сельских поселений, соответствующие местным условиям и устойчивые к внешним экономическим воздействиям.

Список литературы

1. Гайдук М. Ю., Холманских А. С. Реновация промышленных территорий в структуре сельских поселений (на примере керамического завода в д. Нижние Таволги) // Вестник МГСУ. — 2024. — Т. 19, № 10. — С. 1591–1605. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1591-1605.

2. Liu N., Yue K., Zhang X. Ignored Opinions: Villager-Satisfaction-Based Evaluation Method of Tourism Village Development—A Case Study of Two Villages in China // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 22. — Art. 15726. — DOI: 10.3390/su152215726.

3. Груздева В. В., Клюева Ю. С., Терехов А. М. Модель диверсификации сельского хозяйства на основе сельского туризма // Современная экономика: проблемы и решения. — 2024. — № 2 (170). — С. 30–41. — DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2024/2/30-41.

4. Kurnaz A., Anıktar S. Examination of Rural Architecture That Shapes Sustainable Tourism in Emerging Economies Through Stakeholder Perspectives: Sile, Istanbul // Current Issues in Tourism. — 2024. — Vol. 27, No. 13. — P. 2134–2150. — DOI: 10.1080/13683500.2023.2223913.

5. Томсон И. А. Формирование территориальных кластеров по оказанию услуг сельского туризма // Финансовый менеджмент. — 2024. — № 1. — С. 61–69. — DOI: 10.25806/fm12024161-169.

6. Xie K., Zhang Y., Han W. Architectural Heritage Preservation for Rural Revitalization: Typical Case of Traditional Village Retrofitting in China //

Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 2. — Art. 681. — DOI: 10.3390/su16020681.

7. Степанова Э. В., Рожкова А. В., Рожков С. Е., Степанов Н. С. Выбор модели развития сельского туризма в регионе для устойчивого развития сельских территорий // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. — 2024. — № 1. — С. 127–143. — DOI: 10.36718/2500-1825-2024-1-127-143.

8. Gocer O., Boyacioglu D., Karahan E. E., Shrestha P. Cultural Tourism and Rural Community Resilience: A Framework and Its Application // Journal of Rural Studies. — 2024. — Vol. 107. — Art. 103238. — DOI: 10.1016/j.jrurstud.2024.103238.

9. Борзенков А. В. Сравнительный анализ подходов в понимании и развитии агротуризма и сельского туризма // Географический вестник. — 2024. — № 3 (70). — С. 152–161. — DOI: 10.17072/2079-7877-2024-3-152-161.

10. Costantino C., Calleo A., Benedetti A. C., Bartolomei C., Predari G. Fostering Resilient and Sustainable Rural Development Through Nature-Based Tourism, Digital Technologies, and Built Heritage Preservation: The Experience of San Giovanni Lipioni, Italy // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 13. — Art. 5588. — DOI: 10.3390/su16135588.

11. Рябчикова Н. Н. Агропромышленный кластер как драйвер устойчивого развития сельского туризма // Экономика, предпринимательство и право. — 2025. — Т. 15, № 8. — С. 5531–5552. — DOI: 10.18334/epp.15.8.123318.

12. Song H., Sheng J., Chen P. et al. Exploring the Value Creation Mechanism of Agricultural Heritage Creative Tourism Based on SEM and fsQCA // Heritage Science. — 2025. — Vol. 13. — Art. 147. — DOI: 10.1038/s40494-025-01744-5.

13. Кадыров Р. В., Хайруллина Э. Р., Богданова В. И. Роль сельского туризма в диверсификации экономики сельских поселений // Известия Русского географического общества. — 2025. — Т. 157, № 4. — С. 595–610. — DOI: 10.7868/S3034538325040076.

14. Zhang F., Cui F., Dong X. Rural Tourism Clusters: Conceptual Identification, Basic Attributes and Research Framework // Ecotourism. — 2025. — Vol. 15, No. 5.

— P. 945–959. — DOI: 10.12342/zgstly.20240084.

15. Шилова В. А., Быков К. В., Гречаная А. А., Кожарин В. Л., Репин Д. В. Практики организации сельского туризма в контексте постаграрного вектора развития внегородских территорий на примере Нижегородской области // Научный результат. Социология и управление. — 2025. — Т. 11, № 1. — С. 262–277. — DOI: 10.18413/2408-9338-2025-11-1-1-7.

16. Chen Y., Zhang G., Su Y., Zhang R. Measurement and Influencing Factors of Rural Livelihood Resilience of Different Types of Farmers: Taking “Agri-Tourism–Commerce–Culture Integration” Areas in China // Sustainability. — 2026. — Vol. 18, No. 1. — Art. 208. — DOI: 10.3390/su18010208.

17. Shao W., Li Z., Ye M., Xu D., Xu M., Jiang W. How Can Residents’ Cognitions Enrich Village Tourism Planning? Field Research in Three Atypical Traditional Villages of Southern Anhui, China // Habitat International. — 2026. — Vol. 171. — Art. 103762. — DOI: 10.1016/j.habitatint.2026.103762.

References

1. Gajduk M. Yu., Xolmanskix A. S. Renovaciya promy`shlenny`x territorij v strukture sel`skix poselenij (na primere keramicheskogo zavoda v d. Nizhnie Tavolgi) // Vestnik MGSU. — 2024. — T. 19, № 10. — S. 1591–1605. — DOI: 10.22227/1997-0935.2024.10.1591-1605.

2. Liu N., Yue K., Zhang X. Ignored Opinions: Villager-Satisfaction-Based Evaluation Method of Tourism Village Development—A Case Study of Two Villages in China // Sustainability. — 2023. — Vol. 15, No. 22. — Art. 15726. — DOI: 10.3390/su152215726.

3. Gruzdeva V. V., Klyueva Yu. S., Terexov A. M. Model` diversifikacii sel`skogo xozyajstva na osnove sel`skogo turizma // Sovremennaya e`konomika: problemy` i resheniya. — 2024. — № 2 (170). — S. 30–41. — DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2024/2/30-41.

4. Kurnaz A., Anıktar S. Examination of Rural Architecture That Shapes Sustainable Tourism in Emerging Economies Through Stakeholder Perspectives: Sile, Istanbul //

Current Issues in Tourism. — 2024. — Vol. 27, No. 13. — P. 2134–2150. — DOI: 10.1080/13683500.2023.2223913.

5. Tomson I. A. Formirovanie territorial`ny`x klasterov po okazaniyu uslug sel`skogo turizma // Finansovy`j menedzhment. — 2024. — № 1. — S. 61–69. — DOI: 10.25806/fm12024161-169.

6. Xie K., Zhang Y., Han W. Architectural Heritage Preservation for Rural Revitalization: Typical Case of Traditional Village Retrofitting in China // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 2. — Art. 681. — DOI: 10.3390/su16020681.

7. Stepanova E`. V., Rozhkova A. V., Rozhkov S. E., Stepanov N. S. Vy`bor modeli razvitiya sel`skogo turizma v regione dlya ustojchivogo razvitiya sel`skix territorij // Social`no-e`konomicheskij i gumanitarny`j zhurnal Krasnoyarskogo GAU. — 2024. — № 1. — S. 127–143. — DOI: 10.36718/2500-1825-2024-1-127-143. 8. Gocer O., Boyacioglu D., Karahan E. E., Shrestha P. Cultural Tourism and Rural Community Resilience: A Framework and Its Application // Journal of Rural Studies. — 2024. — Vol. 107. — Art. 103238. — DOI: 10.1016/j.jrurstud.2024.103238.

9. Borzenkov A. V. Sravnitel`ny`j analiz podxodov v ponimanii i razvitii agroturizma i sel`skogo turizma // Geograficheskij vestnik. — 2024. — № 3 (70). — S. 152–161. — DOI: 10.17072/2079-7877-2024-3-152-161.

10. Costantino C., Calleo A., Benedetti A. C., Bartolomei C., Predari G. Fostering Resilient and Sustainable Rural Development Through Nature-Based Tourism, Digital Technologies, and Built Heritage Preservation: The Experience of San Giovanni Lipioni, Italy // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, No. 13. — Art. 5588. — DOI: 10.3390/su16135588.

11. Ryabchikova N. N. Agropromy`shlenny`j klaster kak drajver ustojchivogo razvitiya sel`skogo turizma // E`konomika, predprinimatel`stvo i pravo. — 2025. — T. 15, № 8. — S. 5531–5552. — DOI: 10.18334/epp.15.8.123318.

12. Song H., Sheng J., Chen P. et al. Exploring the Value Creation Mechanism of Agricultural Heritage Creative Tourism Based on SEM and fsQCA // Heritage Science. — 2025. — Vol. 13. — Art. 147. — DOI: 10.1038/s40494-025-01744-5.

13. Kady`rov R. V., Xajrullina E`. R., Bogdanova V. I. Rol` sel`skogo turizma v diversifikacii e`konomiki sel`skix poselenij // Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshhestva. — 2025. — T. 157, № 4. — S. 595–610. — DOI: 10.7868/S3034538325040076.

14. Zhang F., Cui F., Dong X. Rural Tourism Clusters: Conceptual Identification, Basic Attributes and Research Framework // Ecotourism. — 2025. — Vol. 15, No. 5. — P. 945–959. — DOI: 10.12342/zgstly.20240084.

15. Shilova V. A., By`kov K. V., Grechanaya A. A., Kozharin V. L., Repin D. V. Praktiki organizacii sel`skogo turizma v kontekste postagrarnogo vektora razvitiya vnegorodskix territorij na primere Nizhegorodskoj oblasti // Nauchny`j rezul`tat. Sociologiya i upravlenie. — 2025. — T. 11, № 1. — S. 262–277. — DOI: 10.18413/2408-9338-2025-11-1-1-7.

16. Chen Y., Zhang G., Su Y., Zhang R. Measurement and Influencing Factors of Rural Livelihood Resilience of Different Types of Farmers: Taking “Agri-Tourism–Commerce–Culture Integration” Areas in China // Sustainability. — 2026. — Vol. 18, No. 1. — Art. 208. — DOI: 10.3390/su18010208.

17. Shao W., Li Z., Ye M., Xu D., Xu M., Jiang W. How Can Residents’ Cognitions Enrich Village Tourism Planning? Field Research in Three Atypical Traditional Villages of Southern Anhui, China // Habitat International. — 2026. — Vol. 171. — Art. 103762. — DOI: 10.1016/j.habitatint.2026.103762.

Статья поступила в редакцию 03.04.2026; одобрена после рецензирования 13.05.2026; принята к публикации 28.08.2026.

The article was submitted 03.04.2026; approved after peer review 13.05.2026; accepted for publication 28.08.2026.

CONTENTS

2.1.7. Construction Technology and Organization (Technical Sciences) 10

Sopilov V. V., Amelin P.A. TEMPERATURE CONTROL OF CONCRETE DURING WINTER ELECTRICAL HEATING: ANALYSIS OF OPERATING MODES AND ACHIEVEMENT OF REQUIRED STRENGTH 10

Ryabchevskiy I.S., Bredikhina N.V. JOINT APPLICATION OF LEAN CONSTRUCTION AND BIM FOR ANALYSIS OF MATERIAL FLOWS AT A CONSTRUCTION SITE 26

2.1.12. Architecture of Buildings and Structures. Creative Concepts of Architectural Activity (Technical Sciences) 50

Vyaznikova E.A. PARAMETRIC DESIGN OF KINETIC FACADES CONSIDERING VARIABLE INSOLATION 50

Duzhevskiy I.A. ARCHITECTURAL AND TYPOLOGICAL APPROACHES TO THE ADAPTATION OF HISTORIC GRAIN ELEVATOR COMPLEXES 66

Chepurnaya L.A., Magdeev R.G. ASSESSMENT OF PERCEPTION OF INTERIOR SPACE GEOMETRY IN A VIRTUAL ENVIRONMENT 83

Polikevich K.B., Pavlov Ya.D. COMPARATIVE ANALYSIS OF MODULAR HOUSING SOLUTIONS FOR THE CLIMATIC CONDITIONS OF THE FAR NORTH 105

Vishnevskaya Yu.A. ANALYSIS OF INSOLATION AND NATURAL LIGHTING OF MULTILEVEL ATRIUMS 122

2.1.13. Urban Planning, Planning of Rural Settlements (Technical Sciences) 135

Musharapov D.R. MODELING THE URBAN HEAT ISLAND AND ASSESSMENT OF BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT SCENARIOS 135

Sagaidak D.A., Tanchuk P.V. OPTIONS FOR SPATIAL RENEWAL OF RURAL SETTLEMENTS 151