

АРХИТЕКТУРА И ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО

ARCHITECTURE AND URBAN PLANNING

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 5. С. 9–20.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (5): 9–20.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.036

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-9-20

EDN: AGZNCU

ВЛИЯНИЕ ВЕТРОВЫХ НАГРУЗОК НА РАЗВИТИЕ БИОНИЧЕСКИХ ФОРМ ЗДАНИЙ

Зоя Владимировна Беляева, Дарья Викторовна Когтева

*Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

Аннотация. Актуальность исследования бионических форм обоснована возрастающим интересом к формированию гармоничного, природоориентированного подхода к проектированию зданий.

Целью настоящей статьи является комплексный обзор существующих исследований и методик, относящихся к проектированию бионических форм, их реализации и оценке их благотворного влияния на ветровые воздействия. Рассматриваются общие концепции реализации «естественных правил» и адаптации форм к функциям строящегося объекта с точки зрения минимизации влияния негативных факторов, в том числе ветровых нагрузок, с использованием в качестве инструмента математических моделей.

Задачи исследования: анализ бионических систем как моделей-прототипов для внедрения в проектирование зданий; изучение современных воплощений бионических тенденций.

Результаты. Дается комплексное определение бионики в архитектуре и дизайне, очерчивается траектория исследования сложных строительных форм, приводятся наглядные примеры реализации бионических архитектурных решений.

Выводы. Исследования в области бионических форм способствуют развитию знаний о создании комфортной среды и генерации инновационных решений для дизайна новых объектов. Значимость полученных результатов заключается в их роли в формировании более комплексного восприятия дизайна, вызывая широкий интерес и стимулируя развитие инновационных знаний.

Ключевые слова: ветровая нагрузка, бионическая архитектура, сложные формы зданий

Для цитирования: Беляева З.В., Когтева Д.В. Влияние ветровых нагрузок на развитие бионических форм зданий // Вестник Томского государственного архи-

тектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 5. С. 9–20. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-9-20. EDN: AGZNCU

ORIGINAL ARTICLE

WIND LOAD IMPACT ON BIONIC ARCHITECTURE DEVELOPMENT

Zoya V. Belyaeva, Darya V. Kogteva

Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Abstract. The pertinence of the study of bionic architecture is substantiated by escalating interest in establishing a harmonious, nature-oriented approach to the building design.

Purpose: The aim of the work is to conduct a comprehensive review of extent research and methodologies pertaining to bionic shapes, their implementation, and evaluation of their beneficial impact on wind effects. The article discusses general concepts of implementing "natural rules" and adapting shapes to the building functions to minimize the impact of negative factors, including wind loads, using mathematical models.

Methodology: The analysis of bionic systems as prototypes for the design implementation of buildings; study of modern embodiments of bionic trends.

Research findings: A comprehensive definition of bionics in architecture and design, delineates the trajectory of complex building shapes and presents examples of implementation of bionic architecture.

Value: Research into bionic shapes facilitates the development of knowledge concerning the creation of a comfortable environment and generation of innovative solutions for new design. The obtained results provide more comprehensive perception of design, evoking widespread interest and driving innovative knowledge.

Keywords: wind load, bionic architecture, complex building shape, surface

For citation: Belyaeva Z.V., Kogteva D.V. Wind Load Impact on Bionic Architecture Development. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (5): 9–20. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-5-9-20. EDN: AGZNCU

Введение

Для любой развивающейся инженерной компании важным фактором повышения конкурентоспособности считается эффективное, быстрое проектирование зданий. Архитектурные тенденции усложнения форм диктуют свои правила, общество стремительно идет к повышению комфорта, удобства пространства зданий.

Часто негативное влияние ветровой нагрузки на здания сложной формы или конструкции фасада можно избежать путем ориентации зданий по локальной розе ветров, анализа изменения показателей ветра во времени, применяя данные с ближайших метеостанций, учитывая влияние близрасположенных зданий на общий ветровой поток.

Важной особенностью выступает тенденция к развитию направления бионического проектирования с точки зрения учета ветровых нагрузок. Этот вектор отражает функциональные характеристики различных биологических процессов и структур. Данные характеристики при использовании архитектур-

ной бионики переносят в современную, динамически развивающуюся отрасль и внедряют инновационные правила для проектирования будущего [14].

Целью работы является обзор существующих исследований и подходов к проектированию бионических форм, их применению и оценка положительного влияния характеристик бионической формы на ветровые воздействия.

Задачи исследования:

1. Охарактеризовать направление бионики в архитектуре и проектировании.
2. Проанализировать положительное влияние сложных форм зданий и искусственных шероховатостей поверхностей фасадов в виде создания бионических решеток на распределение ветровых потоков.
3. Обобщить существующий опыт проектирования бионических форм.

Материалы и методы

В основу исследования был заложен комплексный подход, включающий три ключевых этапа. Первоначально был проведен анализ методологических основ направления, а также обобщены различные аспекты применения бионики в архитектуре и проектировании. На следующем этапе был синтезирован теоретический материал, позволивший сформулировать понимание влияния усложнения архитектурных форм на ветровые нагрузки, и проведена конкретизация проблемы распределения ветровых потоков на здания простых геометрических форм. Завершающей стадией работы стал анализ современных предпосылок, определяющий дальнейшее развитие данного научного направления.

Актуальность исследования

Изучение природных бионических форм с последующим внедрением в проектирование – актуальное направление в области архитектурного проектирования, что подтверждается наличием современных исследований ученых.

Природные формы могут быть использованы в архитектуре, например, путем их описания математическими моделями, отображающими процессы формирования природных форм; анализа структур, основанных на биологических принципах; оптимизации условий расположения и выбора материалов. На протяжении миллиардов лет природа эффективно решала проблемы, актуальные для настоящей эпохи. Животные, растительность и одноклеточные организмы демонстрируют высокую степень изобретательности в своей способности адаптироваться к окружающей среде, тем самым предоставляя модель эффективного взаимодействия с природой.

Определение и исторические предпосылки

Бионика – это область науки и дизайна, вдохновляющаяся принципами, структурами и процессами, наблюдаемыми в природе. В современном проектировании зданий бионика становится все более популярной благодаря своей способности обеспечивать устойчивость, энергоэффективность и эстетическую привлекательность.

В сфере научных исследований различные дисциплины черпали идеи из природы, признавая ее роль как источника знаний и понимания. Приобретение знаний посредством всестороннего наблюдения за разнообразными образцами

и их воспроизведения сыграло важную роль в многочисленных научных достижениях. Эти реконструкции обладают потенциалом для предоставления рациональных объяснений рассматриваемых природных явлений. Стремление к глубокому пониманию природы, характеризующееся намерением воспроизвести ее образцы, обладает потенциалом для превращения этого намерения в осязаемую реальность.

Анализ влияния форм на ветровые нагрузки

Немаловажно, что отдельно стоящие высотные здания сильно изменяют влияние воздействия воздушных потоков на придомовые территории, что может вызвать, в свою очередь, большое количество негативных явлений и их последствий. Могут появляться зоны на уровне пешеходных переходов, на верхних этажах здания, в которых создаются повышенные скорости ветра, избыточные давления, колебания низкой частоты и многое другое [1].

Для того чтобы свести негативное воздействие ветра к минимуму, появляются здания с овальными, с округлыми формами, волнообразные, со скругленными углами. Простейшим методом борьбы со срывом потоков с острых граней поперечного сечения конструкции является скругление углов. Вторым методом служит создание так называемых закрылок. Закрылки – элементы с воздушным пространством, представляющие тонкостенные пластинчатые конструкции, которые обтекают острые или скругленные формы зданий, позволяющие выпрямить, сгладить воздушный поток по граням конструкции. С помощью такого инструмента можно сохранить ламинарное движение потока. Прекрасно воспринимают ветровые воздействия конусные и иглообразные формы зданий, а также здания пирамидальной формы, жесткость которых увеличивается на 10–50 %. Также происходит существенное снижение ветровых воздействий на здания повышенной этажности при увеличении их ветровой проницаемости [6].

Преимущества использования бионических форм

Краткий исторический обзор архитектуры выявляет тесную связь между живой и неживой природой и проектированием. Эта связь побудила специалистов отдавать приоритет устойчивости в своих проектах, что привело к различным проявлениям на протяжении столетий. К ним относятся формальная имитация живых организмов и включение природных элементов в архитектурный дизайн, например, архитектура, учитывающая климат. Это сосуществование проявляется различными способами, включая изменения текстуры, формы и геометрии организмов. Перечислим основные преимущества использования бионических форм:

- снижение потребления энергии ресурсов;
- устойчивость к изменениям климата;
- экономическая эффективность в долгосрочной перспективе;
- повышение качества жизни благодаря комфорту и эстетике зданий.

Бионика становится важной частью архитектуры, позволяя совмещать технологические достижения с мудростью природы.

Целью бионической архитектуры является достижение устойчивой архитектурной парадигмы, которая находится в гармонии с природой. Центральный

принцип бионики – подражание природным образцам и механизмам с использованием природы как основы для проверенных решений.

Основа бионического перевода коренится в принципе подобия. Компоненты природы или технологии связаны друг с другом на основе их общих характеристик. Концепция подобия в бионической архитектуре подразумевает установление связей и эквивалентностей между двумя сущностями с точки зрения их функциональности, поведения, формы и структуры. Этот подход включает преднамеренное подражание природным явлениям и механизмам для информирования о дизайне устойчивых и гармоничных архитектурных решений [15].

Роль бионических форм в устойчивости зданий

Живые системы, сумевшие сохраниться в природе, могут служить концепцией оптимизации формы зданий и других технических решений.

Рассматривая форму фасада здания в качестве примера внедрения бионики, можно оптимизировать форму с точки зрения использования солнечной энергии и обтекания ветра, а также других факторов, тем самым создавая сложную «саморегулирующуюся» систему. Данная система сможет соответствовать всем тенденциям современного проектирования [18].

Изучая биологические структуры растений, можно отследить большое разнообразие форм, что связано с эволюционированием и приспособлением к факторам окружающей среды в данных условиях существования. Перемещая фокус на внедрение параметров стеблей в концепции проектирования, можно подчеркнуть высокую устойчивость, надежность, способность воспринимать ветровые нагрузки.

Таким образом, при изучении взаимодействия окружающей среды и природной структуры мы приходим к выводу о возможности внедрения особенностей строения природных систем и создания новых урбанистических структур [3].

Свойственные природе процессы, характеризующиеся присущей ей сложностью и непредсказуемостью, служат ценным источником вдохновения для разработки сложных концепций. Представление о том, что вдохновение черпается из экзистенциальных процессов, присущих природным явлениям, приводящих к формированию наблюдаемых сущностей, является убедительной альтернативой традиционным формальным и функциональным методологиям моделирования. Можно утверждать, что этот вид вдохновения и восприятия от природы является наиболее ценным типом вдохновения [16, 17]. Всестороннее исследование данных явлений необходимо для понимания лежащих в их основе механизмов. Все живые существа в природе имеют эволюционный процесс и со временем меняются в зависимости от своих потребностей. В этом подходе была сделана попытка представить самый фундаментальный принцип жизни: эволюцию. Конечным результатом этого начинания станет проявление отзывчивой архитектуры, которая демонстрирует динамическое взаимодействие с окружающей средой [11, 12].

Результаты и обсуждение

Развитие живых организмов определяется различными факторами, включая инсоляцию, однако биологические структуры формируются как результат

воздействующих нагрузок. В этом контексте особое значение имеют аэродинамические и структурные анализы. В сфере архитектурного проектирования форма является важнейшим критерием. В контексте бионической архитектуры простое воспроизведение природных форм в архитектурном дизайне имеет ограниченное значение. Важными же вопросами считаются взаимосвязь между формой, функцией, структурой и материалами, а также взаимодействие с окружающей средой [7, 8]. Эффективность природных элементов, таких как функция, форма и структура, зависит от их гармоничной интеграции и адаптивности к окружающей среде. При отсутствии этой взаимосвязанности потенциал каждого элемента функционировать независимо уменьшается [9, 10].

Архитекторы используют два основных метода в применении и имитации природных форм. Первый метод подразумевает прямую имитацию природных форм, при этом здания служат лишь представлением окружающей природной среды. Во втором методе дизайнеры вдохновляются процессами формирования природных форм для создания новых проектов. Междисциплинарные исследования, проводимые разнообразными командами специалистов, становятся все более важными для детального анализа природных систем и внедрения их в проектирование объектов [2].

В качестве примера внедрения междисциплинарных исследований можно назвать Research Pavilion, возведенный в 2016 г. на базе Штутгартского университета учеными институтов вычислительного проектирования и строительных конструкций в сопровождении биологов Тюбингенского университета. В исследовании изучалась структура панциря морских ежей рода *Clupeasteroid* с использованием сканирующего электронного микроскопа (SEM). Именно это позволило создать легкий и прочный скелет морского ежа. В результате была предложена двухслойная конструкция из тонких деревянных реек, которые были специально изогнуты для создания двойной изогнутой жесткой оболочки [13, 14]. Конструкция подвергалась структурному анализу для определения возникающих напряжений и последующей оптимизации. Таким образом, в данном проекте реализован принцип, основанный на работе природных структур, в частности структуры тенсегрити, идеологом которой стал Бакминстер Фуллер. Тенсегрити – это сложные системы, в которых преобладающее количество элементов растянuto.

Важным фактором при проектировании архитектурных объектов с хорошими аэродинамическими характеристиками является выбор формы объекта и меры по ограничению воздействий окружающей застройки на пешеходный комфорт [5]. Примером проекта, учитывающего функциональные потребности и обеспечение аэродинамического комфорта для людей, является небоскреб Aqua Tower в Чикаго.

После долгих поисков эффективного решения проблемы влияния ветровых потоков на аэродинамический комфорт на балконах был сформирован фасад таким образом, чтобы добавление органических форм распределяло сильные потоки, уменьшало избыточную циркуляцию. Усложнение формы террас к классической прямоугольной фасадной системе создало впечатление, схожее с известняковыми осадочными формами.

Концептуальная философия Акихисы Хираты называется *Tangling*. Эта философия черпает вдохновение из того, как рыбы перемещаются среди водорослей в своей естественной среде обитания.

Хирата посвятил значительное время и усилия разработке своей концепции, в результате чего появился объем работы, который является как вдумчивым, так и инновационным в своем подходе к взаимодействию между пространствами. Архитектурное пространство «запутано» таким образом, что сохраняет связный поток и переплетение между различными пространственными элементами, их назначенными функциями и людьми, которые их используют (рис. 1). Полученная среда вызывает чувство общности и взаимосвязанности, напоминающее деревню.

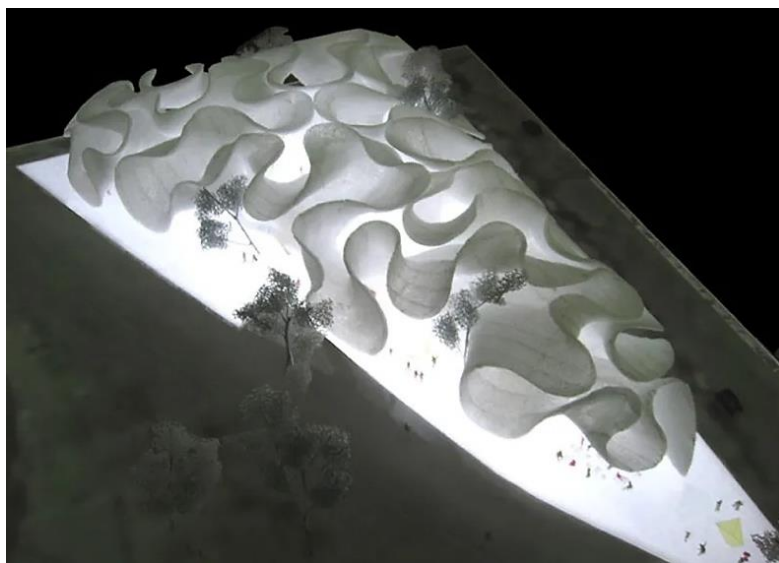


Рис. 1. Макет музея плиссированного неба¹
Fig. 1. Museum model of the pleated sky

Еще одним примером бионического проектирования является крыша общественного пространства WestendGate во Франкфурте-на-Майне, Германия.

Этот проект был реализован в 2010 г. архитекторами из Just Burgeff Architekten и a3lab в рамках реконструкции небоскреба с офисной и гостиничной функциями (известного как Marriott Hotel) [14].

Форма покрытия аналогична биоморфной мембране, схожая с ростом и формированием новых клеток. Данный дизайн смоделирован при помощи математической модели-диаграммы Вороного.

Одно из качественных внедрений бионики отмечено в проекте Qatar Education City Convention Center в Дохе, столице Катара (рис. 2).

Задумка архитектора Арата Исодзакки выразилась в создании такой формы здания, которая бы напоминала характерные для этой области деревья

¹ URL: <https://archeyes.com/pleated-sky-museum-akihisa-hirata/>

сорта баскских культурных яблонь (сидра). Для создания опор с сокращением расхода материала и оптимизации формы был использован метод EESO.

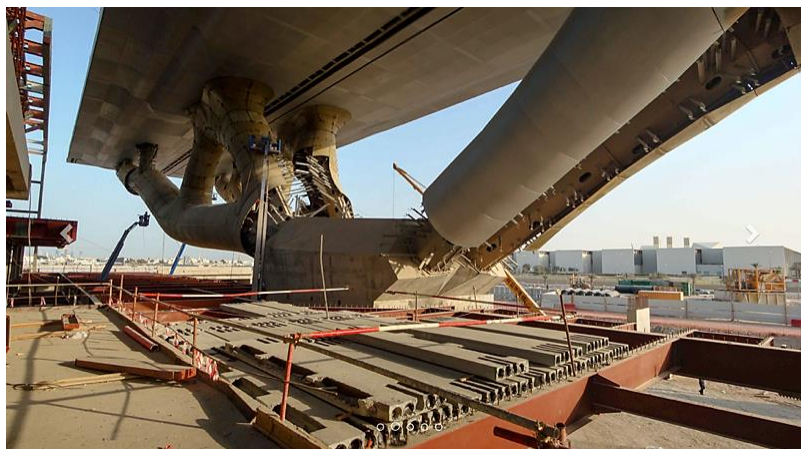


Рис. 2. Опоры Qatar Education City Convention Center в Дохе²
Fig. 2. Supports for the Qatar Education City Convention Center in Doha

В качестве примера использования сочетания традиций и современных технологий можно назвать проект башен Аль Бахар в Абу-Даби. Главной задачей инженеров и архитекторов в рамках этого проекта было поддержание благоприятного климата внутри без больших потерь электроэнергии.

С помощью создания подвижной решетки удалось добиться решения этой задачи. Элементы данной решетки меняют свою конфигурацию в зависимости от требований пользователей и времени суток.

Фасад здания шоурума Kiefer Technic – новая работа Эрнста Гизельбрехта – послужил «водяным знаком» этих идеалов. Уникальность южного фасада в том, что он закрыт стеной из белых алюминиевых жалюзи, которые могут открываться и закрываться с использованием множества управляемых с помощью электроники горизонтальных стержней. Результат – здание, фасад которого изящен и аморфен, который механически меняется в зависимости от требований к свету и теплу внутри. Система может быть запрограммирована на отображение бесчисленного множества конфигураций образов: для выполнения будничных нужд офиса или для увлекательной анимационной демонстрации по «оживлению» фасада [4].

Новый фасад больницы Мануэля Геа Гонсалеса, спроектированный и построенный Elegant Embellishments в 2013 г., активно работает над удалением смога вокруг здания (рис. 3). Фасад состоит из плитки Prosolve 370e, материала, который имеет сверхтонкое покрытие диоксида титана, фотокаталитического вещества, которое улавливает и нейтрализует частицы смога. Этот процесс требует солнечного света, и по этой причине форма плитки была оптимизирована для получения максимально возможного количества солнечного света по всей

² URL: <https://www.margulieshoelzli.com/projects/qatar-education-city-convention-center/>

ее поверхности. Он применяет биометрический рисунок, полученный из губок и кораллов. Этот шаблон был разработан с использованием Rhino.



Рис. 3. Фасад больницы Мануэля Геа Гонсалеса³
Fig. 3. Facade of the Manuel Gea González Hospital

Кластеры панелей были собраны на земле, а затем установлены на вертикальной сетке с другими кластерами непосредственно на фасаде. Фасад основан на узоре Вороного. Это может быть воспроизведено путем создания серии точек на поверхности.

Заключение

Суть проблемы заключается не в тенденции усложнения форм зданий и сооружений, а в способности заменять или улучшать их, видеть тенденции развития форм архитектурных моделей с учетом благоприятного распределения ветровой нагрузки и пешеходного комфорта для снижения влияния негативных факторов. Со временем появилось все больше инструментов для цифровых методологий проектирования, что значительно повлияло на изменение вектора концептуализации процесса проектирования. Этот прогресс готов породить новые определения и новое понимание формы и материалов.

Поиск вдохновения и понимание принципов, управляющих природными структурами, может стать важным элементом формирования архитектуры. Бионические модели позволяют создавать оригинальные и оптимальные конструкции, в том числе с точки зрения аэродинамических характеристик, сформированные под влиянием существующих условий.

³ URL: https://www.iaacblog.com/wp-content/uploads/2020/11/im_02.jpg

Несмотря на перспективы применения бионических форм, также существуют и определенные вызовы. К ним относятся: технические и экономические ограничения, необходимость междисциплинарного подхода, в том числе и сотрудничество архитекторов, инженеров, биологов; развитие в контексте устойчивого проектирования, включая интеграцию с экологическими и энерго-сберегающими технологиями.

Наша задача на сегодняшний день – направить все силы на изучение влияния особенностей форм зданий и сооружений, инструментов снижения ветровых воздействий, структур и конструкций фасада и позволить данному направлению развиваться, разумно снижать ветровые воздействия и благоприятно воздействовать на пешеходный комфорт.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беляева И.М. Архитектура фасадов современных общественных зданий с использованием металлических конструкций // Экономика строительства. 2024. Т. 4. С. 292–296.
2. Буреев А.К., Овчинников И.И., Овчинников И.Г. Применение структур тенсегрити в архитектуре и мостостроении // Новые идеи нового века – 2016 : материалы XVI Международной научной конференции. Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. С. 200–206. ISBN: 978-5-7389-1894-0.
3. Когтева Д.В. Учет особенностей ветровых воздействий на здания и сооружения сложной формы // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2022. № 2 (53). С. 87–92. DOI: 10.25628/UNIP.2022.53.2.014. EDN: JMFXXB
4. Когтева Д. Распределение ветровой нагрузки на здания сложной формы. Екатеринбург : ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2023. 132 с.
5. Лебедев Ю.С., Рабинович В.И., Положай Е.Д. Архитектурная бионика. Москва : Стройиздат, 1990. 269 с.
6. Лихая Д.А. Энергетическая эффективность динамической архитектуры // Ростовский научный журнал. 2018. Т. 3. С. 206–211.
7. Aldersey-Williams H. Towards Biomimetic Architecture // Nature Materials. 2004. V. 3. P. 277–279.
8. Bar-Cohen Y. Nature as a Model for Mimicking and Inspiration of New Technologies // Int. J. Aeronaut Space Sci. 2012. V. 13. P. 1–13. DOI: 10.5139/IJASS.2012.13.1.1
9. Bonser R.H.C. Patented Biologically-Inspired Technological Innovations a Twenty-Yearview // Journal of Bionic Engineering. 2006. № 3. P. 39–41.
10. Gawell E., Nowak A., Rokicki W. Searching for Bionics Structural Forms Optimization // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2019. V. 471. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052066
11. Kiuntslis R., Stepaniuk A., Besaha I. Heterochrony of Gaudi's Architecture // Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Architecture and Construction. 2024. P. 110–118. DOI: 10.31734/architecture2024.25.110
12. Knippers J., Speck T. Design and Construction Principles in Nature and Architecture // Bioinspir Biomim. 2012. № 7. P. 1–10.
13. Kravtsov D., Tsvihovska I. Prerequisites for the Formation and Development of Bionics in Architecture // Regional Problems of Architecture and Urban Planning. 2022. P. 106–113. DOI: 10.31650/2707-403X-2022-16-106-113
14. Nowak A., Rokicki W. Bionic Forms in Search of Structural Models in Architecture // 3rd Scientific Conference Environmental Challenges in Civil Engineering. 2018. V. 174. DOI: 10.1051/mateconf/201817403020
15. Pan H. Exploring Bionic Architecture Inspired by Nature // Journal of Architecture and Construction. 2024. V. 4. P. 25–37.
16. Rezazadeh H., Kolahkaj M., Kordjamshidi M. A Historical Review on Bionic Structures // Bionic. The Third Conference on Architecture and Structure. 2016. URL: https://www.researchgate.net/publication/302225008_A_Historical_Review_on_Bionic_Structures (дата обращения: 25.03.2025).

17. Rokicki W., Nowak A. Bionic Aspects in Search of Functional Systems of Structural Surfaces // Mazowsze. Studia Regionalne. 2016. P. 117–124. DOI: 10.21858/msr.19.07
18. Sadri M., Kavandi M., Jozepiri A., Teimouri S., Abbasi F. Bionic Architecture, Forms and Constructions // Research Journal of Recent Sciences. 2014. V. 3 (3). P. 93–98.

REFERENCES

1. Belenya I.M. Facades Architecture of Modern Public Buildings based on Metal Structures. *Ekonomika stroitel'stva*. 2024; 4: 292–296. (In Russian)
2. Bureev A.K., Ovchinnikov I.I., Ovchinnikov I.G. The Use of Tensegrity Structures in Architecture and Bridge Construction. In: *Proc. 16th Int. Sci. Conf. 'New Ideas of the New Century'*. Khabarovsk, 2015. Pp. 200–206. ISBN 978-5-7389-1894-0. (In Russian)
3. Kogteva D.V. Accounting for Specific Characteristics of Wind Effects on Buildings with Complex Shape. *Akademicheskii vestnik UralNIIProekt RAASN*. 2022; 2 (53): 87–92. DOI: 10.25628/UNIIP.2022.53.2.014. EDN: JMFXXB (In Russian)
4. Kogteva D.V. Distribution of Wind Loads on Buildings with Complex Shape. Ekaterinburg, 2023. Pp. 127–132. (In Russian)
5. Lebedev Yu.S. (Ed.), Rabinovich V.I., Polozhai E.D., et al. Bionic Architecture. Moscow: Stroizdat, 1990. 269 p. (In Russian)
6. Likhaya D.A. Energy Efficiency of Dynamic Architecture. *Rostovskii nauchnyi zhurnal*. 2018; 3: 206–211. (In Russian)
7. Aldersey-Williams H. Towards Biomimetic Architecture. *Nature Materials*. 2004; 3(5): 277–279.
8. Bar-Cohen Y. Nature as a Model for Mimicking and Inspiration of New Technologies. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2012. 13(1): 1–13. DOI: 10.5139/IJASS.2012.13.1.1
9. Bonser R.H.C. Patented Biologically-Inspired Technological Innovations: A Twenty-Year View. *Journal of Bionic Engineering*. 2006; (3): 39–41.
10. Gawell E., Nowak A., Rokicki W. Searching for Bionics Structural Forms Optimization. *IOP Conference Ser. Materials Science and Engineering*. 2019; 471. DOI: 10.1088/1757-899X/471/5/052066
11. Kiuntsli R., Stepaniuk A., Besaha I. Heterochrony of Gaudi's Architecture. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Ser. Architecture and Construction*. 2024; 110–118. DOI: 10.31734/architecture2024.25.110
12. Knippers J., Speck T. Design and Construction Principles in Nature and Architecture. *Bioinspir Biomim*. 2012; (7): 1–10.
13. Kravtsov D., Tsvihovska I. Prerequisites for the Formation and Development of Bionics in Architecture. In: *Regional Problems of Architecture and Urban Planning*. 2022. Pp. 106–113. DOI: 10.31650/2707-403X-2022-16-106-113
14. Nowak A., Rokicki W. Bionic Forms in Search of Structural Models in Architecture. *MATEC Web of Conferences*. 2018;174: 03020. DOI: 10.1051/mateconf/201817403020
15. Pan H. Exploring Bionic Architecture Inspired by Nature. *Journal of Architecture and Construction*. 2024; 4: 25–37.
16. Rezazadeh H., Kolahkaj M., Kordjamshidi M. A Historical Review on Bionic Structures. Bionic. In *Proc. 3rd Conf. on Architecture and Structure*. 2016. Available: www.researchgate.net/publication/302225008_A_Historical_Review_on_Bionic_Structures (accessed March 25, 2025).
17. Rokicki W., Nowak A. Bionic Aspects in Search of Functional Systems of Structural Surfaces. MAZOWSZE Studia Regionalne. 2016. Pp. 117–124. DOI: 10.21858/msr.19.07
18. Sadri M., Kavandi M., Jozepiri A., Teimouri S., Abbasi F. Bionic Architecture, Forms and Constructions. *Research Journal of Recent Sciences*. 2014; 3 (3): 93–98.

Сведения об авторах

Беляева Зоя Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заместитель директора по науке и инновациям, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, z.v.beliaeva@urfu.ru

Когтева Дарья Викторовна, аспирант, инженер, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, kdaryav@inbox.ru

Authors Details

Zoya V. Belyaeva, PhD, A/Professor, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, 19, Mira Str., 620062, Ekaterinburg, Russia, z.v.beliaeva@urfu.ru

Darya V. Kogteva, Research Assistant, Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, 19, Mira Str., 620062, Ekaterinburg, Russia, kdaryav@inbox.ru

Вклад авторов

Беляева З.В. – концепция исследования, общее руководство работой, методология, проверка и утверждение выводов, редактирование финального текста.

Когтева Д.В. – сбор и систематизация литературных источников, проведение анализа данных, подготовка исходного текста рукописи, оформление списка литературы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

Belyaeva Z.V. – conceptualization, supervision, methodology, validation, writing – review and editing.

Kogteva D.V. – literature curation, formal analysis, writing – original draft preparation.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 15.02.2025
Одобрена после рецензирования 11.03.2025
Принята к публикации 27.05.2025

Submitted for publication 15.02.2025
Approved after review 11.03.2025
Accepted for publication 27.05.2025