

# Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Обзор направлений и существующих решений применения алгоритмов искусственного интеллекта в строительстве / О. В. Леванова, Н. В. Кравцов, М. Д. Ивушкин, А. В. Соколов, И. П. Селетков, Н. П. Бисерова, С. В. Русаков. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2025.2.04 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2025. – № 2. – С. 52–71.



ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА  
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ

№ 2, 2025

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научный обзор

DOI: 10.15593/2499-9873/2025.2.04

УДК



## Обзор направлений и существующих решений применения алгоритмов искусственного интеллекта в строительстве

О.В. Леванова<sup>1</sup>, Н.В. Кравцов<sup>2</sup>, М.Д. Ивушкин<sup>1</sup>, А.В. Соколов<sup>1,3</sup>,  
И.П. Селетков<sup>1</sup>, Н.В. Бисерова<sup>1</sup>, С.В. Русаков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Пермь, Российская Федерация

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Университет Иннополис, Иннополис, Российская Федерация

### О СТАТЬЕ

Получена: 18 февраля 2025  
Одобрена: 16 апреля 2025  
Принята к публикации:  
08 августа 2025

#### Финансирование

Исследование не имело  
спонсорской поддержки.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии  
конфликта интересов.

#### Вклад автора

Леванова О.В. – 32,5 %,  
Кравцов Н.В. – 27,5 %,  
Ивушкин М.Д. – 20 %,  
Соколов А.В. – 7 %,  
Селетков И.П. – 5 %,  
Бисерова Н.П. – 3 %,  
Русаков С.В. – 3 %.

#### Ключевые слова.

искусственный интеллект, нейронные сети,  
машинное обучение, глубокое обучение,  
регрессионные модели, множественный  
регрессионный анализ, метод аналогий,  
рекуррентные нейронные сети, строительство,  
сметная документация, ведомость объемов  
работ, мостостроение, BIM (Building Information  
Modeling), оценка стоимости строительства,  
проектирование конструкций

### АННОТАЦИЯ

Применение алгоритмов искусственного интеллекта в рутинных задачах, где имеются большие данные, играет ключевую роль в развитии любой отрасли, в том числе и в строительной. Алгоритмы машинного обучения широко применяются в зарубежных странах, а также набирают популярность научные исследования в данном направлении. Несмотря на интерес к применению искусственного интеллекта, к сожалению, как в российской практике, так и в научных исследованиях в строительной области его применение практически не затрагивается. Цель данного исследования состоит в рассмотрении существующих российских и зарубежных практик применения алгоритмов искусственного интеллекта в инженерных расчетах и наметка архитектуры будущей автоматизированной системы перевода ведомостей объемов работ и дефектных ведомостей в сметную документацию. Эта работа является одним из первых исследований в области применения алгоритмов искусственного интеллекта в дефектно-сметной документации. В будущем это поможет существенно сократить издержки компаниям строительной отрасли и внесет вклад как в практическую, так и в научно-исследовательскую деятельность.

© Леванова Олеся Владимировна, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», e-mail: lesialevanova@yandex.ru, ORCID 0009-0008-9021-8877

Кравцов Никита Вячеславович, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, e-mail: nik\_key@bk.ru

Ивушкин Максим Денисович, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», e-mail: ivushkinmd@gmail.com

Соколов Андрей Валерьевич, АНО ВО «Университет Иннополис», ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», e-mail: as2710433@yandex.ru

Селетков Илья Павлович, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», e-mail: seletkovip@yandex.ru

Бисерова Наталья Васильевна, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», e-mail: ntlbiserova@rambler.ru

Русаков Сергей Владимирович, ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет», e-mail: rusakov-edu@mail.ru



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

**Perm Polytech Style:** Levanova O.V., Kravtsov N.V., Ivushkin M.D., Sokolov A.V., Seletkov I.P., Biserova N.P., Rusakov S.V. An overview of the directions and existing solutions for the application of artificial intelligence algorithms in construction. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2025, no. 2, pp. 52–71. DOI: 10.15593/2499-9873/2025.2.04

**MDPI and ACS Style:** Levanova, O.V.; Kravtsov, N.V.; Ivushkin, M.D.; Sokolov, A.V.; Seletkov, I.P.; Biserova, N.P.; Rusakov, S.V. An overview of the directions and existing solutions for the application of artificial intelligence algorithms in construction. *Appl. Math. Control Sci.* **2025**, *2*, 52–71. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2025.2.04>

**Chicago/Turabian Style:** Levanova, Olesya V., Nikita V. Kravtsov, Maxim D. Ivushkin, Andrey V. Sokolov, Ilya P. Seletkov, Natalya V. Biserova, and Sergey V. Rusakov. 2025. “An overview of the directions and existing solutions for the application of artificial intelligence algorithms in construction”. *Appl. Math. Control Sci.* no. 2: 52–71. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2025.2.04>



APPLIED MATHEMATICS  
AND CONTROL SCIENCES

№ 2, 2025

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Review

DOI: 10.15593/2499-9873/2025.2.04

UDC



## An overview of the directions and existing solutions for the application of artificial intelligence algorithms in construction

O.V. Levanova<sup>1</sup>, N.V. Kravtsov<sup>2</sup>, M.D. Ivushkin<sup>1</sup>, A.V. Sokolov<sup>1,2</sup>,  
I.P. Seletkov<sup>1</sup>, N.V. Biserova<sup>1</sup>, S.V. Rusakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Perm State University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>3</sup>ANO VO “Innopolis University”, Innopolis, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 18 February 2025

Approved: 16 April 2025

Accepted for publication:  
08 August 2025

#### Funding

This research received no external funding.

#### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Author Contributions

Levanova O.V. – 32.5 %,  
Kravtsov N.V. – 27.5 %,  
Ivushkin M.D. – 20 %,  
Sokolov A.V. – 7 %,  
Seletkov I.P. – 5 %,  
Biserova N.P. – 3 %,  
Rusakov S.V. – 3 %.

#### Keywords:

Artificial intelligence, Neural networks,  
Machine learning, Deep learning, Regression models, Multiple regression analysis, Analog approach, Recurrent neural network, Construction industry, Cost estimate documentation, Bill of quantities, Bridge construction, BIM (Building Information Modeling), Construction cost estimate, Design of structures

### ABSTRACT

The application of artificial intelligence algorithms in routine tasks where big data exists plays a key role in the development of any industry. The construction one is no exception. Machine learning algorithms are widely used in countries outside of Russia, and scientific research in this direction is becoming more popular. Despite the interest in the application of artificial intelligence, unfortunately, both in Russian practical usage and scientific research in the construction industry its hardly utilize. The purpose of this study is to review the existing Russian and foreign cases of artificial intelligence algorithms application in engineering calculations and to outline the architecture of the future automated system of transferring bill of quantities into cost estimate. This work is one of the first studies in the field of artificial intelligence algorithms application in estimate documentation. In the future, it will help to significantly reduce expenses for companies in the construction industry and will contribute to both practical and research work.

© Olesya V. Levanova – Perm State University, e-mail: [lesialevanova@yandex.ru](mailto:lesialevanova@yandex.ru), ORCID 0009-0008-9021-8877

Nikita V. Kravtsov – St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, e-mail: [nik\\_key@bk.ru](mailto:nik_key@bk.ru)

Maxim D. Ivushkin – Perm State University, e-mail: [ivushkinmd@gmail.com](mailto:ivushkinmd@gmail.com)

Andrey V. Sokolov – ANO VO “Innopolis University”, Perm State University, e-mail: [as2710433@yandex.ru](mailto:as2710433@yandex.ru)

Ilya P. Seletkov – Perm State University, e-mail: [seletkovip@yandex.ru](mailto:seletkovip@yandex.ru)

Natalya V. Biserova – Perm State University, e-mail: [ntlbiserova@rambler.ru](mailto:ntlbiserova@rambler.ru)

Sergey V. Rusakov – Perm State University, e-mail: [rusakov-edu@mail.ru](mailto:rusakov-edu@mail.ru)



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## Введение

Прогресс никогда не останавливается, и с каждым годом появляются все более совершенные технологии, проникающие в различные сферы нашей жизни. Одним из ярких примеров таких инноваций является применение алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения, которые в последние годы активно внедряются в самые разные области человеческой деятельности. Одна из них – строительная индустрия, играющая важную роль в развитии общества на протяжении веков и требующая постоянного обновления методов работы.

Основной акцент данного исследования сделан на сравнительном анализе использования машинного обучения в строительной сфере в Российской Федерации и за рубежом. Цель заключалась в том, чтобы понять, на каких стадиях строительного цикла внедрение алгоритмов ИИ может быть наиболее эффективным. Один из ключевых аспектов, рассмотренный в работе, – составление сметной документации. Этот процесс традиционно занимает много времени и задействует большое количество человеческих ресурсов, однако современные технологии позволяют значительно его упростить и ускорить.

Сегодня на рынке представлено множество программных продуктов, предназначенных для автоматизации процессов создания сметной документации. К сожалению, преобладающая часть этих систем иностранного производства. Кроме того, далеко не все они используют возможности ИИ для повышения эффективности работы специалистов-сметчиков. Применение машинного обучения дает возможность существенно снизить затраты на проектирование, а также проводить глубокий анализ больших объемов данных и улучшать рабочие процессы.

Особое внимание в работе уделено мостостроению, где специфика работ и сложность проектов делают составление смет особенно трудоемким процессом. Изучены разнообразные решения для оптимизации сметной документации с применением ИИ, оценен их потенциал для использования в мостостроении и других областях строительства. Также проанализированы конкретные методики нейронных сетей, применяемые в подобных сервисах, и их возможности для дальнейшего развития отрасли.

В разделе 1 приведен анализ существующих решений и сервисов, позволяющих автоматизировать построение строительной документации с помощью алгоритмов ИИ. В разделе 2 произведен обзор существующей литературы по рассматриваемой теме. В разделе 3 приведен обзор применения методов ИИ в сфере подготовки сметной документации в мостостроении. В разделе 4 – обзор некоторых типовых архитектур систем генерации строительных смет. В разделе 5 – обзор архитектуры новой проектируемой авторами системы, которая может позволить автоматизировать формирование строительной сметы на основе дефектных ведомостей и ведомостей объемов работ.

## Термины и определения

Таблица 1

Термины и определения

| Термин                                                        | Определение                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Искусственный интеллект (ИИ)                                  | Область информатики, занимающаяся разработкой систем, способных выполнять задачи, требующие человеческого интеллекта, такие как обучение, анализ данных, распознавание образов и принятие решений |
| Нейросеть (нейронные сети, искусственная нейронная сеть, ИНС) | Математическая модель, вдохновленная биологическими нейронами, используемая для обработки данных, прогнозирования, классификации и распознавания сложных закономерностей                          |

| Термин                                                           | Определение                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Машинное обучение                                                | Направление ИИ, в котором алгоритмы обучаются на данных без явного программирования          |
| Глубокое обучение                                                | Подраздел машинного обучения, использующий многослойные нейросети для анализа сложных данных |
| Обработка естественного языка (NLP, Natural Language Processing) | Область ИИ, изучающая взаимодействие между компьютерами и человеческим языком                |
| Регрессионные модели                                             | Методы прогнозирования, выявляющие зависимость между переменными                             |
| Множественный регрессионный анализ (МРА)                         | Метод прогнозирования, учитывающий несколько факторов                                        |
| Метод аналогий (МА)                                              | Техника оценки на основе похожих прошлых проектов                                            |
| Рекуррентные нейронные сети (RNN, Recurrent Neural Networks)     | Модели, учитывающие временные зависимости в данных                                           |

## 1. Обзор существующих сервисов и решений

Современная строительная отрасль сталкивается с рядом вызовов, связанных с необходимостью повышения эффективности и точности сметной документации как в России, так и за рубежом. Обзор российских научных публикаций последних лет [1–3] позволил сделать вывод, что на текущий момент в строительной отрасли в основном используются традиционные системы автоматизации сметных расчетов. Например, системы автоматизированного проектирования (САПР), с помощью которых выполняется не только архитектурное проектирование, но и разработка проектно-сметной документации. Кроме того, используются информационные технологии, которые позволяют выбрать форму сметного расчета, применить нормативные базы, индексы цен, коэффициенты и т.п. [1]. Наиболее популярными российскими приложениями, позволяющими автоматизировать сметный процесс, являются следующие: «Смета 2000» («Ресурсная смета»); Smeta.ru; «Аверс»; «Гранд смета» и др. Безусловно, «функция автоматизированной проверки расчетов и создания форм для печати облегчает работу сметчика, сокращает время на создание сметы, практически полностью исключает риски ошибки» [1]. При этом стандартные инструменты для создания сметной документации, основанные на устоявшихся методах и нормативных базах, несмотря на свою функциональность и распространенность, зачастую не обеспечивают необходимой гибкости и адаптивности к изменяющимся условиям рынка.

Переход от традиционных систем к более современным инструментам, использующим искусственный интеллект, представляется целесообразным для повышения эффективности сметного учета. Так, «по данным McKinsey & Company, производительность труда в строительстве за последние два десятилетия выросла всего на 1 %, в то время как искусственный интеллект способен повысить производительность на 10–20 %» [4]. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации, принятая Госстроем России, рекомендует максимально использовать вычислительную технику при составлении смет [5].

Представим один из инструментов на базе искусственного интеллекта – Smeta.ai, который используется для подбора расценок и сметно-нормативной базы. Сервис позволяет не только подобрать единичные расценки на строительные материалы и работы, но и со-

ставить целую смету, загрузив ведомость объемов работ (далее – ВОР). Более того, проводится сравнение расценок, что помогает пользователям выбирать наиболее выгодные предложения, производить контроль лишних и потенциально пропущенных позиций в сметах, что способствует более точному учету всех затрат [6].

Еще один сервис Freesmetaonline позволяет генерировать смету с помощью искусственного интеллекта по названию объекта, чертежу или техническому заданию. Однако для выполнения данной функции на платформе используются данные о стоимости работ и услуг в строительстве из справочника федеральных единых расценок (далее – ФЕР), который не является актуальным на сегодняшний день. Также сервис автоматически проставляет цены в смете, загруженной из любой программы, на основании анализа интернет-ресурсов с помощью искусственного интеллекта [7].

Обзор сервисов для составления смет на базе искусственного интеллекта в России, таких как Smeta.ai и Freesmetaonline, демонстрирует необходимость дальнейших разработок в этой области. Устаревшие данные ФЕР подчеркивают важность интеграции актуальных рыночных цен в реальном времени для повышения точности смет. Расширение функционала платформ, внедрение сложных алгоритмов для анализа затрат и интеграция с системами управления ресурсами предприятия создадут единую экосистему управления проектами. Улучшение интерфейсов и обучение пользователей также играют ключевую роль. В целом разработка новых программ на базе искусственного интеллекта для составления смет в России актуальна и необходима для повышения эффективности работы в строительной отрасли.

Перейдем к обзору зарубежных сервисов для составления смет с помощью искусственного интеллекта. Предваряя анализ зарубежных источников, отметим, что в английском языке эквивалентами понятиям «смета» и «ведомость объемов работ (ВОР)» являются cost estimate и bill of quantities (BOQ) соответственно. За рубежом именно ВОР (BOQ) является приоритетным документом для оценки строительства, предлагающим детальное представление о потребностях проекта и включающее в себя стоимости на материалы, оборудование и трудозатраты. В то же время смета в большинстве случаев является лишь предварительной оценкой, позволяющей на ранней стадии проекта спрогнозировать потенциальные расходы. В связи с этим большинство зарубежных ИИ-сервисов ориентировано на создание ВОР (BOQ).

Например, платформа Yeschat.ai предоставляет целый ряд сервисов для составления ВОР со своим функционалом. Первый, Quantity Surveyor-AI-Powered BOQ Generation, позволяет определить количество и стоимость материалов. Для этого необходимо загрузить или ввести данные о строительном проекте, включая технические чертежи и спецификации [8]. Второй сервис, Quantity Surveyor Pro, схож по функционалу с предыдущим инструментом, однако его отличительной чертой является адаптация к строительным стандартам конкретной страны или региона. Для корректных расчетов ИИ требует архитектурные или конструктивные чертежи, указание используемых стандартов и перечень строительных материалов, количество которых нужно рассчитать на основе чертежей [9]. Следующий инструмент Quantity Surveyor-BOQ generation for construction projects тоже выполняет оценку стоимости проекта, составляя подробную ВОР на материалы и рабочую силу. Для этого необходимо предоставить полную информацию о проекте, включая тип строительства и основные характеристики [10]. В свою очередь, Construction Estimator-Quick Construction Estimates предназначен для немасштабных проектов, так как он не создает полноценную смету или ВОР. Этот инструмент может генерировать список материа-

лов или краткую смету на основе указанных параметров, таких как размеры, материалы и местоположение объекта. Это позволяет подрядчикам закупить необходимые материалы или предоставить заказчику понимание возможной стоимости проекта [11].

Еще одна платформа для оценки стоимости строительства на основе ИИ – Kreo Software. Данный инструмент определяет строительные материалы на чертежах и связывает их с актуальной информацией о ценах, что обеспечивает точность сметных расчетов и помогает избежать перерасхода средств. Кроме того, есть функция проверки данных на соответствие стандартам качества [12].

Платформа CUBiQ упрощает процесс создания ВОР и расчетов затрат, экономя время и обеспечивая точность за счет использования ИИ. Для работы сервиса требуются чертежи, данные из которых обрабатываются для оценки затрат и ресурсов, необходимых для эффективного планирования и управления проектами [13].

Togal.ai представляет собой программное обеспечение для автоматического определения, измерения и сравнения элементов на архитектурных планах и чертежах, в частности для составления смет. Этот инструмент ускоряет процесс оценки стоимости строительства и повышает его точность. Важно отметить, что в описании сервиса акцентируется внимание на необходимости проверки работы, выполненной ИИ, сметчиком, который должен вносить изменения по мере необходимости [14].

Программное обеспечение PriMus IFC для создания 5D BIM – пятого измерения BIM, кардинально отличается от предыдущих сервисов. Оно также обеспечивает быстрый и простой способ оценки стоимости проекта для составления сметы или ВОР без ошибок с использованием искусственного интеллекта. Главное отличие заключается в том, что вместо чертежей и спецификаций программа использует 3D-геометрические модели. Расчет объемов и стоимостей выполняется автоматически путем сопоставления расценок на каждый вид работ или материалов с параметрическими объектами 3D-модели. Пользователь может открыть коммерческое предложение, выбрать материалы или оборудование, а затем выбрать два конструктивных элемента в модели со схожими характеристиками. Программа автоматически определит все конструктивные элементы в модели с такими характеристиками и рассчитает объемы и общую стоимость [15].

Обзор зарубежных платформ для составления смет с использованием искусственного интеллекта демонстрирует значительные достижения в области автоматизации и повышения точности сметных расчетов в строительной отрасли. В отличие от традиционных подходов, где смета часто представляет собой предварительную оценку расходов, зарубежные практики акцентируют внимание на ведомостях объемов работ (BOQ) как ключевом документе для детального анализа потребностей проекта.

Платформы, такие как Yeschat.ai, Kreo Software, CUBiQ, Togal.ai и PriMus IFC, предлагают широкий спектр инструментов, каждый из которых имеет свои уникальные функции. Эти сервисы позволяют не только определять количество и стоимость строительных материалов, но и адаптироваться к специфическим стандартам различных стран, что делает их универсальными для применения в международной практике.

Использование ИИ в этих системах значительно ускоряет процесс оценки стоимости, повышает точность расчетов и минимизирует риски перерасхода средств. Однако важно отметить, что, несмотря на высокую степень автоматизации, роль человека в процессе остается критически важной. Специалисты должны проверять результаты работы ИИ и вносить необходимые коррективы, что подчеркивает необходимость сочетания технологий и человеческого опыта.

## 1. Плюсы и минусы платформ в России

### Платформы: Smeta.ai и Freesmetaonline

#### Плюсы:

- **Интеграция данных:** возможность интеграции актуальных рыночных цен в реальном времени.
- **Упрощение процессов:** автоматизация составления смет позволяет сократить время на расчеты.
- **Повышение точности:** использование ИИ для анализа затрат и прогнозирования позволяет улучшить точность смет.

#### Минусы:

- **Устаревшие данные ФЕР:** наличие устаревших данных может снижать точность расчетов.
- **Необходимость доработок:** платформы требуют дальнейшего развития функционала и интерфейсов.
- **Обучение пользователей:** необходимость обучения пользователей для эффективного использования инструментов.

## 2. Плюсы и минусы зарубежных платформ

### Примеры: Yeschat.ai, Kreo Software, CUBiQ, Togat.ai, PriMus IFC

#### Плюсы:

- **Разнообразие функций:** предоставление различных инструментов для создания ВОР и смет, адаптированных под стандарты разных стран.
- **Автоматизация процессов:** высокая степень автоматизации позволяет ускорить процесс оценки стоимости и повысить его точность.
- **Использование 3D-моделей:** платформа PriMus IFC использует 3D-геометрические модели для автоматического расчета объемов и стоимости, что обеспечивает дополнительную точность.

#### Минусы:

- **Проверка результатов:** некоторые сервисы требуют проверки результатов работы ИИ специалистами, что может увеличивать время на подготовку смет.
- **Сложность интерфейсов:** некоторым пользователям может быть сложно освоить сложные интерфейсы и функционал платформ.

Таблица 2

Сравнительный анализ

| Параметр                  | Платформы в России<br>(Smeta.ai, Freesmetaonline) | Зарубежные платформы<br>(Yeschat.ai, Kreo Software и др.) |
|---------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Автоматизация             | Частичная автоматизация                           | Высокая степень автоматизации                             |
| Адаптация под стандарты   | Ограничена                                        | Адаптированы под стандарты конкретных стран               |
| Использование 3D-моделей  | Нет                                               | Есть (PriMus IFC)                                         |
| Требования к пользователю | Необходимость обучения                            | Проверка результатов специалистами                        |
| Точность расчетов         | Зависят от актуальности данных                    | Высокая точность благодаря современным алгоритмам         |

Разработка новых программ на базе искусственного интеллекта для составления смет в России является актуальной и необходимой для повышения эффективности работы в строительной отрасли. В то время как зарубежные платформы предлагают более широкий функционал и автоматизацию, российские решения нуждаются в доработках и интеграции актуальных данных. Улучшение интерфейсов и обучение пользователей также являются ключевыми факторами для успешного внедрения этих технологий.

## 2. Обзор литературы применения ИИ в проектировании и строительстве

В наших источниках, как и в зарубежных, в достаточной мере отражен потенциал применения искусственного интеллекта в строительной сфере, инженерных расчетах. Многие авторы описывают, как ИИ может быть применен в данной отрасли. Например, четко понимают, что на всех этапах строительства и проектирования внедрение такой технологии действительно необходимо и существенно поможет сократить издержки при проектировании, строительстве. Особое внимание уделяется тем местам, где требуется анализировать большие объемы данных. Например, управление проектами, где необходимо подбирать наиболее рациональные и последовательно-правильные этапы работ. А.В. Лемешкин сравнивает ИИ с теми технологиями, которые уже внедрены и зарекомендовали себя – это дистанционное зондирование и 3D-сканирование. По его результатам видно, что ИИ значительно обходит своих конкурентов в таких показателях, как скорость получения данных и высокая точность измерений. Основная гипотеза автора заключается в том, что с применением этих технологий можно значительно повысить уровень контроля качества в строительстве. Но почему-то такую тему, как BIM, он не затрагивает, несмотря на то что данная технология уже давно присутствует на рынке и позволяет решать многие проблемы еще на стадии жизненного цикла объекта [16].

Конечно же, и расчет строительных конструкций, механических систем не остается без внимания. Автор М. Аллагулыев в своей статье описывает, как ИИ может быть применен для анализа и прогнозирования поведения механических систем. Исследователь уверен, что способность обработки большого количества данных, в частности нагрузки, перемещения, деформации, напряжения, поможет прогнозировать отказ механических систем, а также оптимизировать их конструкцию [17]. Также на схожую тематику высказывается и Р.Д. Хамракулов: в своей статье он описывает методику, которая позволяет при помощи нейронных сетей предсказать оптимальные параметры для железобетонных балок. Для этого нейронная сеть была обучена на данных о существующих конструкциях и их параметрах, таких как геометрия, тип нагрузки, материал и многие другие. В конечном счете это позволяет ей создавать предложения по оптимизации конструкций, что решает множество проблем при проектировании. Результатом этого исследования стало значительное увеличение точности предсказания оптимальных параметров конструкции на 13 %, сокращение времени проектирования на 40 % и увеличение расчетных характеристик на 13 %. Данные результаты свидетельствуют, что тематика применения нейронных сетей для проектирования конструкций позволит существенно сократить как издержки, так и повысить безопасность конструкций [18].

Помимо этого, ИИ может быть полезен и при создании инновационных строительных материалах. Ученые Мордовского государственного университета (МГУ) им. Н. П. Огарева разработали строительную смесь из портландцемента. Данная смесь нужна для того, чтоб создавать высококачественный бетон, физико-механические свойства которого превосхо-



дят традиционные тяжелые бетоны в 2–4 раза, а себестоимость такой смеси ниже на 10–15 % по сравнению с аналогами. В статье [19] автор упоминает, что модель машинного обучения, которая для этого разработана, способна подбирать состав и прогнозировать его свойства.

Зарубежные исследователи отмечают, что строительная отрасль сегодня переживает цифровую трансформацию, хотя все еще отстает от других секторов во внедрении решений на основе искусственного интеллекта [20]. Отмечается, что строительная отрасль является одной из наименее цифровизованных в мире. За счет преобладания ручного труда управление проектами в отрасли становится более сложным и неоправданно трудоемким. Отсутствие адекватной цифровой экспертизы и внедрения технологий в строительной отрасли также приводит к неэффективному расходованию средств, задержкам проектов, необоснованным решениям, снижению показателей производительности, охраны труда и техники безопасности. Например, в обрабатывающей промышленности наступление четвертой промышленной революции, широко известной как Индустрия 4.0, направлено на автоматизацию и применение передовых методов искусственного интеллекта [21]. Очевидно, что эта революция приведет к повышению эффективности и в строительной отрасли.

В сфере строительства системы искусственного интеллекта можно разделить на четыре категории: методы машинного обучения (machine learning techniques), экспертные системы (expert system), эволюционные алгоритмы (evolutionary algorithms) и гибридные системы (hybrid systems) [22]. Так, методы машинного обучения в строительстве применяются для прогнозирования сроков строительных проектов, оценки стоимости материалов, оценки рисков. Экспертные системы, имитирующие поведение эксперта, знания которого закодированы в программе, применяются, например, для диагностики технического состояния строительных конструкций. Эволюционные алгоритмы помогают в распределении ресурсов и планировании работ, чтобы минимизировать затраты и время. Гибридные системы применяются для комплексного анализа проектных данных и рекомендаций по их оптимизации, сочетая искусственный интеллект с экспертными знаниями.

В статье [18] автор подробно рассмотрел различные подразделы искусственного интеллекта в своем обзоре актуальной обстановки, возможностей и потенциальных трудностей его применения в строительной отрасли. Однако наряду с популярностью ИИ в этой области вырос и уровень киберпреступности, утверждает автор. В особенности внедрение BIM-технологий поставило под удар безопасность данных.

Можно отметить, что интерес исследователей все больше привлекает сфера безопасности. Должное внимание уделяется важности использования ИИ для оценки текущего состояния конструкции или ее повреждений, а также прогнозированию на нее возможной нагрузки [23; 24]. В то же время отмечается, что для выявления ранних небольших повреждений конструкции методы ИИ не приспособлены, поэтому необходимо разработать новую теорию и методику интеллектуальной эксплуатации и технического обслуживания строительных сооружений [20]. С другой стороны, приводятся результаты уже опробованной новой стратегии для нейронных сетей для ситуаций, когда визуальный осмотр конструкции невозможен, отмечая, что эти результаты оказались многообещающими [21].

В последние десятилетия управление рисками, связанными с конструктивными системами зданий, привлекло внимание общества. В связи с этим появилось много исследований, направленных на создание надежной процедуры оценки сейсмического риска для конструктивных систем. Но лишь немногие работы затрагивают использование нейронных сетей для этой цели. Одно из них, например, раскрывает значимость ИИ в управлении рис-

ками. Автор статьи [25] обобщает опыт исследователей в разработке кривых хрупкости на основе прогнозов нейронной сети.

Следующая работа фокусируется на применении искусственного интеллекта в проектах гражданского строительства. Отмечается существенный вклад ИИ в сферу строительства и уделяется больше внимания проблемам применения его технологий для повышения эффективности всех этапов строительства объектов. По мнению автора работы, к ним относятся доступность данных, определение моделей ИИ, необходимость совершенствования взаимодействия между людьми и ИИ, сбор подробных поведенческих данных и рассмотрение этических соображений [26].

Цементные композиты являются наиболее часто используемыми в строительстве, и, несмотря на это, исследователи сталкиваются с проблемой разработки высокоэффективных и многофункциональных составов [27]. Следующие две группы исследователей внесли значительный вклад в поиск способа решения этой проблемы, применив подход машинного обучения. Первые использовали машинное обучение для прогнозирования механических свойств цементных композитов [28], а вторые – для прогнозирования состояния железобетона [29]. Автор другой статьи исследует прогнозирование ширины трещин в железобетонных плитах с помощью гибридной нейронной сети и описывает процесс создания информационной модели для оценки ширины трещины [30].

Ряд авторов считают перспективным совместное использование машинного обучения и BIM-технологий для предварительной оценки стоимости строительства, что позволяет сделать это более точно и быстро [31; 32]. В другом исследовании показано, как 3D-BIM-модели позволяют в короткий срок получить расчет объемов, а значит, и стоимости проекта. Отмечается, что точность расчетов ВОР достигает 93,059 %, что является высоким результатом, по сравнению с традиционными методами [33].

Составление смет с помощью искусственного интеллекта набирает популярность в сфере строительства. Например, проведены исследования, в которых представлена предварительная оценка стоимости свайных фундаментов, а также фундаментов для высотных зданий [34; 35].

Большой упор в последних зарубежных работах сделан именно на применении искусственного интеллекта в BIM-моделировании не только в целях расчета стоимости проектов, но и для оптимизации, повышения качества управления ими [32; 36; 37].

Рассуждая о различных методах искусственного интеллекта с целью выявления наиболее эффективных для оценки стоимости строительства, авторы приходят к выводу, что аналитический и статистический методы необходимо применять совместно [38].

Для строительных компаний на зарубежном рынке представлен широкий спектр различных технологий искусственного интеллекта, функционирующих в самых разных направлениях деятельности – от построения прогнозов до контроля опасных ситуаций на объекте. Например, ИИ-система Everguard.ai обеспечивает безопасность на производстве, выявляя потенциальные угрозы и существенно уменьшая риск травм работников с использованием машинного обучения и компьютерного зрения [39]. Внедряются такие технологии, как цифровые двойники (Digital Twin), моделирование информации о зданиях (BIM), Интернет вещей (IoT) и умное зрение (Smart Vision) [39]. Они позволяют создавать точные модели и симуляции объектов с целью обеспечения постоянного мониторинга их состояния и выявления проблем в реальном времени. В заключение важно отметить, что исследователи приходят к выводу, что вычислительная мощность нейронных сетей увеличилась [40].

В заключении обзора российской и зарубежной литературы по применению ИИ в проектировании и строительстве необходимо сказать, что исследователи всего мира по данным направлениям не стоят на месте и работают в самых разнообразных направлениях, имею одну общую цель – научиться как можно более эффективно использовать ИИ в вышеупомянутых сферах.

### **3. Применение ИИ в сфере мостостроения**

В мостостроении, как и в других отраслях строительства, ИИ находит применение. Помимо использования машинного обучения для оптимизации конструкции мостовых сооружений, создания новых материалов, управления проектами, одной из самых важных тем, на наш взгляд, является влияние внешних факторов на долговечность мостового сооружения. Конечно же, это всевозможные стихийные бедствия, селевые потоки, лавины, камнепады. Именно эту проблема раскрывает автор в статье [41]. В данной работе описываются методы создания моделей машинного обучения, которые направлены на прогнозирование осадков и селевых потоков. Также автор затрагивает тему обследования мостовых сооружений в труднодоступных местах. Оператор с помощью дрона, аэросъемки собирает данные по сооружению, после чего ИИ его обрабатывает и выдает информацию о повреждениях.

Также на эту проблематику высказались и ученые Томского государственного архитектурного университета, в частности П. Елугачев и Б. Шумилов [42]. Они утверждают, что использование ИИ при обследованиях позволит минимизировать рутинные вычисления, которых сейчас в достатке. Однако ученые заметили, что для наибольшей эффективности такой искусственный интеллект должен уметь определять все элементы конструкции – балки, опоры, пролеты – и, определяя состояние моста, давать рекомендации по ремонту.

Каждое проектирование не обходится без составления сметной документации. В данном случае, использование ИИ может решить проблему нехватки расценок, трудоемкости процесса и поможет оптимизировать данный процесс.

### **4. Обзор архитектур систем генерации строительных смет**

Методы искусственного интеллекта активно применяются в строительной инженерии для повышения точности расчетов и эффективности процессов. Нейронные сети на основе метода конечных элементов и алгоритмы градиентного спуска, учитывающие нагрузки и сейсмическую активность, используются для анализа устойчивости зданий. Планирование работ оптимизируется с помощью рекуррентных нейронных сетей и методов стохастической оптимизации, прогнозирующих задержки. Генеративное проектирование осуществляется с помощью глубоких нейронных сетей и эволюционных алгоритмов для выбора оптимальных архитектурных решений. Компьютерное зрение на основе сверточных нейронных сетей выявляет дефекты в строительных проектах. И, собственно, применение нейросетей для генерации смет.

Для разработки систем, позволяющих переводить ведомости объемов работ (ВОР) в сметы с помощью методов искусственного интеллекта (ИИ), используются различные методики. Гибкость нейронных сетей позволяет интегрировать несколько компонентов для создания более сложных гибридных моделей. В следующем разделе будут рассмотрены основные подходы, используемые в таких моделях.

Вначале мы рассмотрим обработку естественного языка (Natural Language Processing, NLP) [43], которая является неотъемлемой частью автоматизации процессов работы с документами. Эта область изучает взаимодействие между компьютерами и естественным языком. Цель NLP – научить машины понимать, интерпретировать и генерировать человеческую речь и текст.

Сначала текст или электронный документ подвергается токенизации, то есть разделению на отдельные фрагменты [44]. Затем исключаются малоинформативные сообщения и «стоп-слова». Далее применяются стебминг и лемматизация. Модель выполняет синтаксический анализ, определяя грамматическую структуру предложения и выявляя различные связи. Затем следует семантический анализ, который выявляет контекст и понимание написанных слов. Последним этапом, который входит в сферу наших интересов, является распознавание именованных сущностей, т. е. идентификация и классификация различных объектов.

Модель BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) [45] — это сложная модель глубокого обучения, которая обрабатывает текст в обоих направлениях, анализируя слова в контексте всего предложения. Эта модель особенно хорошо справляется с извлечением и классификацией ключевых данных, выявлением ключевых сущностей (например, видов деятельности, объемов, единиц измерения) и установлением взаимосвязей между ними. Эффективность этой модели в задачах классификации и извлечения сущностей заслуживает внимания. Однако следует отметить, что для обеспечения оптимальной точности работы этой модели требуются значительные вычислительные мощности и специальное обучение на корпусе строительных терминов.

SpaCy [46] – это библиотека обработки естественного языка, оптимизированная для быстрого извлечения ключевых данных с помощью правил и нейросетевых моделей. В отличие от других моделей, SpaCy не обладает глубокой семантикой, однако она способна хорошо работать в условиях ограниченных ресурсов и строго определенных форматов данных.

Следующий этап разработки сметной документации предполагает использование искусственных нейронных сетей, а также моделей машинного и глубокого обучения. Простые регрессионные модели, оценивающие зависимость между объемом работ и их стоимостью, эффективны при наличии линейных зависимостей и достаточного количества данных для обучения. Однако это не особенно актуально в контексте масштабных проектов, где зависимости чаще всего нелинейные [47]. Глубокие нейронные сети, напротив, способны моделировать сложные нелинейные зависимости между входными параметрами (например, объемами работ) и выходными параметрами (стоимостью). Хотя для их обучения требуется значительный объем данных, они могут обеспечить высокую точность прогнозирования.

Одним из примеров применения ИНС в строительной сфере является исследование, представленное в статье *Non-parametric bill of quantities estimation of concrete road bridges' superstructure: an artificial neural networks approach* [48]: показана модель оценки сметной стоимости строительства железобетонных автодорожных мостов с использованием искусственной нейронной сети (ИНС). Цель исследования – создать надежный инструмент для предварительной оценки количества необходимых материалов на ранних стадиях проектирования. Исходные данные, использованные для модели, включали ширину пролета моста, длину уменьшенного пролета или консолей, а также тип моста.

Рассматриваемая модель представляет собой многослойную прямую нейронную сеть с одним скрытым слоем, содержащим 10 нейронов с логистической сигмоидальной функцией активации. Выход сети содержит три нейрона, каждый из которых вычисляет один из следующих параметров: объем бетона, массу арматуры или массу предварительно напряженной стали. Для обучения сети использовался алгоритм обратного распространения ошибки Левенберга – Марквардта.

В другом исследовании, представленном в работе *A hybrid methodology to estimate construction material quantities at an early project phase* [49], предлагается гибридная методология для точной оценки количества строительных материалов на ранних стадиях проекта. Авторы используют комбинацию методов, включая множественный регрессионный анализ (МРА), искусственные нейронные сети (ИНС) и метод аналогий (МА), для повышения точности предварительных оценок.

На начальном этапе проекта применяется метод МРА для выявления линейной зависимости между характеристиками проекта и объемами материалов. Этот метод помогает определить наиболее значимые переменные и установить базовую линию для последующих моделей. Затем используется ИНС для моделирования сложных нелинейных связей между входными параметрами и объемами материала. Нейронная сеть обучается на ранее собранных данных, что позволяет ей учитывать сложные взаимодействия между переменными и повышает точность прогноза. Кроме того, применяется МА, основанный на поиске похожих случаев в базе данных прошлых проектов. Новый проект сравнивается с ранее завершенными проектами, и на основе сходства делаются выводы о предполагаемых объемах материалов. Результаты всех трех методов объединяются для формирования окончательной оценки, которая использует преимущества каждого метода и компенсирует их недостатки, обеспечивая более точные и надежные прогнозы.

В исследовании *Top-Down Construction Cost Estimating Model using an Artificial Neural Network* [50] представлена модель оценки стоимости строительства на основе ИНС, разработанная для Департамента транспорта штата Монтана. Исследователи собрали сведения из базы данных, включая информацию о недавно завершенных проектах, и создали на основе собранных данных многослойную прямую нейронную сеть с одним скрытым слоем. Входными параметрами были выбранные характеристики проекта, а выходными – прогнозируемая стоимость строительства. Модель была обучена на исторических данных, а затем протестирована для оценки ее точности. Результаты показали, что применение ИНС может привести к значительному снижению средней абсолютной процентной ошибки по сравнению с существующими методологиями оценки. Аналогичное исследование было проведено в Йемене, результаты которого изложены в статье *Preliminary Construction Cost Estimate in Yemen by Artificial Neural Network* [51]. Это исследование показало, что применение ИНС может значительно повысить точность предварительной оценки стоимости строительных проектов по сравнению с традиционными подходами.

Использование искусственных нейронных сетей в оценке стоимости строительства демонстрирует существенное повышение эффективности по сравнению с традиционными методологиями. Эти сети способны учитывать сложные, нелинейные взаимосвязи, относящиеся к параметрам проекта. Результаты исследований показывают, что использование ИНС приводит к более точным прогнозам, уменьшению ошибок и способности учитывать всесторонний набор факторов, влияющих на стоимость.

Однако оптимальные результаты часто достигаются путем интеграции ИНС с альтернативными методологиями, как показано в статье *A hybrid methodology to estimate*

construction material quantities at an early project phase. Применение гибридного подхода, включающего ИНС, МРА и МА, позволяет смягчить ограничения, присущие каждому из методов, и тем самым повысить надежность оценок. Этот комплексный подход может служить эффективным инструментом для раннего прогнозирования стоимости и объема строительных материалов, обеспечивая оптимальное планирование и распределение ресурсов.

## **5. Проектирование систем формирования смет на основании ведомости дефектов и объемов работ**

При разработке системы автоматизированного перевода ведомости объемов работ (ВОР) в сметную документацию необходимо учитывать несколько ключевых аспектов, включая обработку входных данных, анализ и классификацию информации, прогнозирование затрат и интеграцию с внешними системами.

Система должна состоять из нескольких взаимосвязанных модулей: модуля обработки входных данных, ответственного за загрузку, предварительную обработку и структурирование информации, модуля обработки естественного языка, который выполняет распознавание сущностей, извлечение параметров и интерпретацию текста, модуля машинного обучения, который включает модель нейронной сети и оценивает стоимость работы на основе исторических данных и выявленных закономерностей, и интеграционного модуля, который обеспечивает взаимодействие с другими системами управления.

Процесс начинается с загрузки документа, содержащего отчет об объеме работы. Затем применяются методологии структурирования и предварительной обработки текста, такие как Tesseract. Обработанные данные затем передаются в языковую модель, которая извлекает ключевые сущности. Эти сущности затем распознаются для извлечения ключевых параметров, классификации задач на основе предварительно обученных моделей и установления связей между элементами заявления и оценочными затратами. Заключительный этап включает использование гибридных моделей машинного обучения для оценки стоимости: множественного регрессионного анализа для линейных зависимостей, искусственные нейронные сети для выявления сложных закономерностей и метод аналогий для поиска схожих проектов в базе данных. Система интегрируется с существующими ERP- и BIM-системами, что позволяет автоматически генерировать документацию по затратам и оптимизировать процессы управления строительством.

## **Заключение**

Проанализировав текущий мировой опыт применения алгоритмов искусственного интеллекта в инженерных расчетах, можно с уверенностью заключить, что в России внедрение популярной технологии в эту сферу находится на самой ранней стадии развития. Отмечается крайне ограниченное распространение сервисов, использующих алгоритмы искусственного интеллекта в инженерной практике. Подобная ситуация наблюдается и в сфере научных исследований, посвященных применению искусственного интеллекта в инженерных расчетах. Такое положение контрастирует с активным развитием и широким внедрением соответствующих сервисов и проведением активных научных исследований в зарубежных странах.

Данное исследование выявляет пробел в знаниях на стыке двух научно-практических направлений – строительной отрасли и информационных технологий – и позволяет, опираясь на существующие исследования, рассмотреть алгоритмы машинного обучения для автоматизации составления сметной документации.

Составление сметной документации является одним из трудоемких процессов в инженерных расчетах. Необходимо подчеркнуть, что будущие исследования будут носить научно-прикладной характер, где основной фокус будет направлен на автоматизацию перевода ведомостей объемов работ или дефектных ведомостей в сметную документацию. Автоматизация перевода строительных чертежей в ведомости объемов работ будет затронута в более поздних исследованиях. Ближайшие работы будут направлены на исследования и разработку конкретных алгоритмов машинного обучения и моделей нейронных сетей, которые будут практически полностью автоматизировать работу по составлению сметной документации.

## Список литературы

1. Городнова, Н.В. Применение искусственного интеллекта и нанотехнологий в инвестиционно-строительной сфере России / Н.В. Городнова // Вестник НГУЭУ. – 2021. – № 3 – С. 81–95.
2. Эволюция от простого описания бизнес-процессов к цифровым двойникам предприятий / А.И. Сухоруков, В.В. Семикашев, С.Ю. Ерошкин, А.С. Терентьева, М.С. Гайворонская, Е.В. Швецов // Научные труды Института народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2024. – № 2. – С. 95–123.
3. Каракозова, И.В. Создание электронной базы нормативных наблюдений в условиях цифровизации в строительстве / И.В. Каракозова, И.М. Лисицын, К.В. Болдышев // Вестник МГСУ. – 2023. – Вып. 18, № 8. – С. 1306–1317.
4. Шумов, В.Н. Трансформация строительных технологий под влиянием ИИ / В.Н. Шумов // Международный научный журнал «Символ науки». – 2024. – С. 87–97.
5. Марчук, Е.С. Анализ систем проведения сметных расчетов и подготовки сметной документации в строительстве / Е.С. Марчук // StudNet. Общество с ограниченной ответственностью «Электронная наука». – 2020. – Т. 3, № 5. – С. 421–424
6. Smeta.ai [Электронный ресурс]. – URL: <https://smeta.ai/> (дата обращения: 05.02.2025).
7. Генерация сметы на основе искусственного интеллекта [Электронный ресурс]. – URL: <https://freemetaonline.ru/beforeNewSmetaAI> (дата обращения: 09.01.2025).
8. Quantity Surveyor-Free AI-Powered BOQ Generation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.yeschat.ai/gpts-9t55QeOYviu-Quantity-Surveyor> (дата обращения: 15.01.2025).
9. Quantity Surveyor Pro-Free Quantity Calculation Tool [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.yeschat.ai/gpts-9t55QeOYvis-Quantity-Surveyor-Pro> (дата обращения: 15.01.2025).
10. Construction Estimator-Free Quick Construction Estimates [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.yeschat.ai/gpts-9t56NAwtw3e-Construction-Estimator> (дата обращения: 15.01.2025).
11. Quantity Surveyor-Free BOQ generation for construction projects. [Электронный ресурс]. – URL: <https://theee.ai/tools/quantity-surveyor-2OToEizlDv> (дата обращения: 16.01.2025).
12. AI in BoQs – Kreo [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kreo.net/news-2d-takeoff/ai-in-bills-of-quantities> (дата обращения: 16.01.2025).
13. CUBE – Streamline Construction Cost Estimation with AI [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cubeestimates.com/> (дата обращения: 16.01.2025).

14. How to Estimate Construction Costs | Togal.ai [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.togal.ai/blog/estimate-construction-costs> (дата обращения: 17.01.2025).
15. Dynamic cost estimating directly from your 3D model - BibLus [Электронный ресурс]. – URL: [https://biblus.accasoftware.com/en/dynamic-cost-estimating-directly-from-your-3d-model/#Dynamic\\_cost\\_estimating\\_from\\_a\\_3D\\_model](https://biblus.accasoftware.com/en/dynamic-cost-estimating-directly-from-your-3d-model/#Dynamic_cost_estimating_from_a_3D_model) (дата обращения: 17.01.2025).
16. Лемешкин, А.В. Инновационные методы контроля качества в строительстве: новые возможности и технологии / А.В. Лемешкин // Экономика строительства. Общество с ограниченной ответственностью «Русайнс». – 2023. – № 5. – С 80–84.
17. Тыллануров, Б. Применение методов машинного обучения в инженерной механике: анализ данных и прогнозирование поведения механических систем / Б. Тыллануров, М. Аллагулыев // Вестник науки. – 2024. – Т. 1, № 7. – С. 663–665.
18. Хамракулов, Р.Д. Оптимизация конструкции железобетонных балок с использованием алгоритмов машинного обучения / Р.Д. Хамракулов // Экономика и социум. – 2024. – № 11-2. – С. 912–915.
19. Мордовские ученые с помощью ИИ разработали высокофункциональный строительный материал [Электронный ресурс]. – URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/91423/> (дата обращения: 01.02.2025).
20. Bang, S. Artificial Intelligence in Construction Projects: A Systematic Scoping Review / S. Bang, N. Olsson // Journal of Engineering, Project, and Production Management. Engineering Project and Production Management. – 2022. – Vol. 12, no. 3. – P. 224–238.
21. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges / S.O. Abioye [et al.] // Journal of Building Engineering. Elsevier Ltd. – 2021. – Vol. 44.
22. Akinadé, O.O. BIM-based software for construction waste analytics using artificial intelligence hybrid models / O.O. Akinadé. – 2017.
23. Liu, Q. Application and research of artificial intelligence in civil engineering intelligent construction / Q. Liu // Theoretical and Natural Science. – 2023. – Vol. 26, no. 1. – P. 30–36.
24. Wu, X. Use of neural networks in detection of structural damage / X. Wu, J. Ghaboussi, J.H. Garrett // Comput Struct. – 1992. – Vol. 42, no. 4. – P. 649–659.
25. Mitropoulou, C.C. Developing fragility curves based on neural network IDA predictions / C.C. Mitropoulou, M. Papadrakakis // Eng Struct. – 2011. – Vol. 33, no. 12. – P. 3409–3421.
26. Kamolov, S. Machine learning methods in civil engineering: a systematic review / S. Kamolov // Annals of Mathematics and Computer Science. Gulf Journal of Mathematics. – 2024. – Vol. 21. – P. 181–191.
27. Application of Artificial Intelligence (AI) in Civil Engineering / T.F. Awolusi [et al.] // Studies in Systems, Decision and Control. – 2025. – Vol. 547. – P. 15–46.
28. Huang, J.S. Data-driven machine learning approach for exploring and assessing mechanical properties of carbon nanotube-reinforced cement composites / J.S. Huang, J.X. Liew, K.M. Liew // Compos Struct. Elsevier Ltd. – 2021. – Vol. 267.
29. Performance comparison of neural network training algorithms in the modeling properties of steel fiber reinforced concrete / T.F. Awolusi [et al.] // Heliyon. – 2019. – Vol. 5, no. 1.
30. Predicting Crack Width in CFRP-Strengthened RC One-Way Slabs Using Hybrid Grey Wolf Optimizer Neural Network Model / S.V. Razavi Tosee [et al.] // Buildings. – 2022. – Vol. 12, no. 11.
31. Park, D.Y. Construction Cost Prediction Using Deep Learning with BIM Properties in the Schematic Design Phase / D.Y. Park, S.H. Yun // Applied Sciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13, no. 12.



32. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges / S.O. Abioye [et al.] // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 44.
33. Abbas, E.F. Automat Bill of Quantities for School Buildings Projects Using BIM / E.F. Abbas, E.F. Abbas, F.M.S. Al-Zwainy // *Tikrit Journal of Engineering Sciences*. – 2024. – Vol. 31, no. 3. – P. 125–142.
34. Deepa, G. A hybrid machine learning approach for early cost estimation of pile foundations / G. Deepa, A.J. Niranjana, A.S. Balu // *Journal of Engineering, Design and Technology*. Emerald Publishing. – 2023.
35. Developing preliminary cost estimates for foundation systems of high-rise buildings / A. Rashad [et al.] // *International Journal of Construction Management*. – 2024.
36. Rane, N. Role of ChatGPT and Similar Generative Artificial Intelligence (AI) in Construction Industry / N. Rane // *Social Science Research Network*. – 2023.
37. Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies / A.A. Khan [et al.] // *Technologies (Basel)*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). – 2024. – Vol. 12, no. 10.
38. Arba, D. Future Directions of Cost and Productivity Estimating using Artificial Intelligence (AI) 1 / D. Arba. – 2021.
39. Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Systematic Review of the Entire Construction Value Chain Lifecycle / C.N. Egwim [et al.] // *Energies*. – 2024. – Vol. 17. – P. 182.
40. Sun, H. Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review / H. Sun, H.V. Burton, H. Huang // *Journal of Building Engineering*. – 2021. – Vol. 33.
41. Lu, J. Application of Artificial Intelligence Technology in Bridge Construction and Maintenance / J. Lu // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. – 2023. – Vol. 75. – P. 330–337.
42. В Томске исследователи учат искусственный интеллект вести мониторинг состояния дорог и мостов [Электронный ресурс]. – URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-podvedomstvennykh-uchrezhdeniy/50655/> (дата обращения: 01.02.2025).
43. Brown, L. Natural Language Processing Techniques for Construction Document Management / L. Brown, P. Green // *Journal of Computing in Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 33(4). – 04019025.
44. Manning, C.D. Foundations of Statistical Natural Language Processing / C.D. Manning, H. Schütze // MIT Press. – 1999.
45. Devlin, J. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / J. Devlin, M.W. Chang, K. Lee, K. Toutanova // *NAACL-HLT*. – 2019. – 4171–4186.
46. Honnibal, M. spaCy 2: Natural Language Understanding with Bloom Embeddings / M. Honnibal, I. Montani // *arXiv preprint arXiv*. – 2017. – 1710.09412,
47. Kim, G.H. Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning / G.H. Kim, S.H. An, K.I. Kang, // *Building and Environment*. – 2004. – Vol. 39(10). – P. 1235–1242.
48. Marinelli, M. Non-parametric bill-of-quantities estimation of concrete road bridges' superstructure: An artificial neural networks approach. In A.B. Raidén & E. Aboagye-Nimo (Eds.), *Proceedings of the 31st Annual ARCOM Conference* / M. Marinelli, L. Dimitriou, N. Fraggakis, S. Lambropoulos // *Association of Researchers in Construction Management*. – 2015. – P 853–862.

49. García de Soto, B. A hybrid methodology to estimate construction material quantities at an early project phase / B. García de Soto, B.T. Adey, D. Fernando // *International Journal of Construction Management*. – 2016.

50. Gransberg, D.D. Top-down construction cost estimating model using an artificial neural network: Project summary report (MDT Project Number: 8227-001) / D.D. Gransberg, H.D. Jeong, I. Karaca, B. Gardner // Iowa State University, Institute for Transportation. – 2016.

51. Hakami, W. Preliminary construction cost estimate in Yemen by artificial neural network / W. Hakami, A. Hassan // *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*. – 2019. – Vol. 7(1). – P. 110–122.

## References

1. Gorodnova N.V. Application of Artificial Intelligence and Nanotechnology in the Investment and Construction Sector of Russia. *Bulletin of NSUEM*, 2021, no. 3, pp. 81–95.

2. Sukhorukov A.I., Semikashev V.V., Eroshkin S.Yu., Terentyeva A.S., Gaivoronskaya M.S., Shvetsov E.V. Evolution from Simple Description of Business Processes to Digital Twins of Enterprises. *Scientific Papers of the Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 2024, no. 2, pp. 95–123.

3. Karakozova I.V., Lisitsyn I.M., Boldyshev K.V. Sozdanie elektronnoi bazy normativnykh nablyudenii v usloviyakh tsifrovizatsii v stroitelstve [Creation of an Electronic Database of Regulatory Observations in the Context of Digitalization in Construction]. *Vestnik MGSU* [Vestnik MGSU], 2023, vol. 18, no. 8, pp. 1306–1317.

4. Shumov V.N. Transformatsiya stroitelnykh tekhnologii pod vliyaniem II [Transformation of Construction Technologies under the Influence of AI]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal "Simvol nauki"* [International Scientific Journal "Symbol of Science"], 2024, pp. 87–97.

5. Marchuk E.S. Analiz sistem provedeniya smetnykh raschetov i podgotovki smetnoi dokumentatsii v stroitelstve [Analysis of Systems for Conducting Estimate Calculations and Preparing Estimate Documentation in Construction]. *StudNet*, 2020, vol. 3, no. 5, pp. 421–424.

6. Smeta.ai, available at: <https://smeta.ai/> (accessed: 2025-02-05).

7. AI-based Estimate Generation, available at: <https://freemetaonline.ru/beforeNewSmetaAI> (accessed: 2025-01-09).

8. Quantity Surveyor-Free AI-Powered BOQ Generation, available at: <https://www.yeschat.ai/gpts-9t55QeOYviu-Quantity-Surveyor> (accessed: 2025-01-15).

9. Quantity Surveyor Pro-Free Quantity Calculation Tool, available at: <https://www.yeschat.ai/gpts-9t55QeOYvis-Quantity-Surveyor-Pro> (accessed: 2025-01-15).

10. Construction Estimator-Free Quick Construction Estimates, available at: <https://www.yeschat.ai/gpts-9t56NAwtw3e-Construction-Estimator> (accessed: 2025-01-15).

11. Quantity Surveyor-Free BOQ generation for construction projects, available at: <https://theee.ai/tools/quantity-surveyor-2OTeizlDv> (accessed: 2025-01-16).

12. AI in BoQs – Kreo: website. – URL: <https://www.kreo.net/news-2d-takeoff/ai-in-bills-of-quantities> (accessed: 2025-01-16).

13. CUBE – Streamline Construction Cost Estimation with AI, available at: <https://www.cubeestimates.com/> (accessed: 2025-01-16).

14. How to Estimate Construction Costs | Togal.ai, available at: <https://www.togal.ai/blog/estimate-construction-costs> (accessed: 2025-01-17).

15. Dynamic cost estimating directly from your 3D model – BibLus, available at: [https://biblus.accasoftware.com/en/dynamic-cost-estimating-directly-from-your-3d-model/#Dynamic\\_cost\\_estimating\\_from\\_a\\_3D\\_model](https://biblus.accasoftware.com/en/dynamic-cost-estimating-directly-from-your-3d-model/#Dynamic_cost_estimating_from_a_3D_model) (accessed: 2025-01-17).
16. Lemeshkin A.V. Innovative Methods of Quality Control in Construction: New Opportunities and Technologies. *Construction Economics*, 2023, no. 5, pp. 80–84.
17. Tyllanurov Y., Allagulyev M. Application of Machine Learning Methods in Engineering Mechanics: Data Analysis and Prediction of Mechanical Systems Behavior. *Bulletin of Science*, 2024, vol. 1, no. 7, pp. 663–665.
18. Khamrakulov R.D. Optimization of Reinforced Concrete Beams Structure Using Machine Learning Algorithms. *Economics and Society*, 2024, no. 11-2, pp. 912–915.
19. Mordovian Scientists Developed a High-Functional Building Material Using AI, available at: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/91423/> (accessed: 2025-02-01).
20. Bang S., Olsson N. Artificial Intelligence in Construction Projects: A Systematic Scoping Review. *Journal of Engineering, Project, and Production Management*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 224–238.
21. Abioye S.O. et al. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 44.
22. Akinadé O.O. BIM-based software for construction waste analytics using artificial intelligence hybrid models. 2017.
23. Liu Q. Application and research of artificial intelligence in civil engineering intelligent construction. *Theoretical and Natural Science*, 2023, vol. 26, no. 1, pp. 30–36.
24. Wu X., Ghaboussi J., Garrett J.H. Use of neural networks in detection of structural damage. *Computers & Structures*, 1992, vol. 42, no. 4, pp. 649–659.
25. Mitropoulou C.C., Papadrakakis M. Developing fragility curves based on neural network IDA predictions. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, no. 12, pp. 3409–3421.
26. Kamolov S. Machine learning methods in civil engineering: a systematic review. *Annals of Mathematics and Computer Science*, 2024, vol. 21, pp. 181–191.
27. Awolusi T.F. et al. Application of Artificial Intelligence (AI) in Civil Engineering. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2025, vol. 547, pp. 15–46.
28. Huang J.S., Liew J.X., Liew K.M. Data-driven machine learning approach for exploring and assessing mechanical properties of carbon nanotube-reinforced cement composites. *Composite Structures*, 2021, vol. 267.
29. Awolusi T.F. et al. Performance comparison of neural network training algorithms in the modeling properties of steel fiber reinforced concrete. *Heliyon*, 2019, vol. 5, no. 1.
30. Razavi Tosee S.V. et al. Predicting Crack Width in CFRP-Strengthened RC One-Way Slabs Using Hybrid Grey Wolf Optimizer Neural Network Model. *Buildings*, 2022, vol. 12, no. 11.
31. Park D.Y., Yun S.H. Construction Cost Prediction Using Deep Learning with BIM Properties in the Schematic Design Phase. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 12.
32. Abioye S.O. et al. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 44.
33. Abbas E.F., Abbas E.F., Al-Zwainy F.M.S. Automat Bill of Quantities for School Buildings Projects Using BIM. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 2024, vol. 31, no. 3, pp. 125–142.
34. Deepa G., Niranjana A.J., Balu A.S. A hybrid machine learning approach for early cost estimation of pile foundations. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2023.

35. Rashad A. et al. Developing preliminary cost estimates for foundation systems of high-rise buildings. *International Journal of Construction Management*, 2024.
36. Rane N. Role of ChatGPT and Similar Generative Artificial Intelligence (AI) in Construction Industry. *Social Science Research Network*, 2023.
37. Khan A.A. et al. Integrating Building Information Modelling and Artificial Intelligence in Construction Projects: A Review of Challenges and Mitigation Strategies. *Technologies*, 2024, vol. 12, no. 10.
38. Arba D. Future Directions of Cost and Productivity Estimating using Artificial Intelligence (AI). 2021.
39. Egwim C.N. et al. Artificial Intelligence in the Construction Industry: A Systematic Review of the Entire Construction Value Chain Lifecycle. *Energies*, 2023, vol. 17, no. 1, p. 182.
40. Sun H., Burton H.V., Huang H. Machine learning applications for building structural design and performance assessment: State-of-the-art review. *Journal of Building Engineering*, 2021, vol. 33.
41. Lu J. Application of Artificial Intelligence Technology in Bridge Construction and Maintenance. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2023, vol. 75, pp. 330–337.
42. In Tomsk, Researchers Teach Artificial Intelligence to Monitor the Condition of Roads and Bridges, available at: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/novosti-podvedomstvennykh-uchrezhdeniy/50655/> (accessed: 2025-02-01).
43. Brown L., Green P. Natural Language Processing Techniques for Construction Document Management. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2019, vol. 33, no. 4, 04019025.
44. Manning C.D., Schütze H. Foundations of Statistical Natural Language Processing. MIT Press, 1999.
45. Devlin J., Chang M.W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *NAACL-HLT*, 2019, pp. 4171–4186.
46. Honnibal M., Montani I. spaCy 2: Natural Language Understanding with Bloom Embeddings. *arXiv preprint arXiv:1710.09412*, 2017.
47. Kim G.H., An S.H., Kang K.I. Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning. *Building and Environment*, 2004, vol. 39, no. 10, pp. 1235–1242.
48. Marinelli M., Dimitriou L., Fragkakis N., Lambropoulos S. Non-parametric bill-of-quantities estimation of concrete road bridges' superstructure: An artificial neural networks approach. In A.B. Raidén & E. Aboagye-Nimo (Eds.), *Proceedings of the 31st Annual ARCOM Conference*, 2015, pp. 853–862.
49. García de Soto B., Adey B.T., Fernando D. A hybrid methodology to estimate construction material quantities at an early project phase. *International Journal of Construction Management*, 2016.
50. Gransberg D.D., Jeong H.D., Karaca I., Gardner B. Top-down construction cost estimating model using an artificial neural network: Project summary report (MDT Project Number: 8227-001). Iowa State University, Institute for Transportation, 2016.
51. Hakami W., Hassan A. Preliminary construction cost estimate in Yemen by artificial neural network. *Baltic Journal of Real Estate Economics and Construction Management*, 2019, vol. 7, no. 1, pp. 110–122.