

Возможности искусственного интеллекта и автоматизации процессов проектирования в строительстве: библиометрический анализ

Дмитрий Викторович Слепушкин¹, Дмитрий Юрьевич Бурлов²

¹ Московский инновационный университет; г. Москва, Россия;

² Московский финансово-промышленный университет «Синергия»; г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие технологий искусственного интеллекта (ИИ) в строительном секторе происходит неравномерно, однако потенциал машинного обучения и искусственного интеллекта (AI/ML-технологий) в этой сфере огромен. Цель исследования — выполнить библиометрический анализ научных публикаций о развитии технологий ИИ и автоматизации в строительном проектировании. Новизна исследования заключается в комплексном анализе трендов и динамики исследований ИИ в строительстве на основе обширной выборки научных публикаций. Практическая значимость состоит в выявлении перспективных направлений применения AI/ML-технологий для развития инноваций и оптимизации процессов в строительной отрасли.

Материалы и методы. Проанализировано 16 819 научных статей, опубликованных в период с 1955 по 2023 г., индексируемых на платформе OpenAlex. Выборка осуществлялась по поисковым запросам, связанным с ИИ в строительстве в целом, а также по отдельным направлениям: BIM-моделированию, генеративному проектированию и цифровым двойникам (ЦД). Используются методы библиометрического анализа, статистического анализа, кластеризация исследований проведена с помощью VOSviewer 1.6.20.

Результаты. Исследования о применении возможностей ИИ в строительстве получили активный импульс к развитию после 2020 г. Направления ЦД и BIM-технологий только начинают рассматриваться с точки зрения возможностей AI/ML-технологий, генеративное проектирование развивается быстрее за счет более раннего старта исследований. Выявлены ключевые страны, университеты и тематические кластеры в каждом направлении.

Выводы. Результаты исследования показывают перспективные направления применения AI/ML-технологий в строительной сфере. Дальнейшие исследования ЦД, BIM-моделирования и генеративного проектирования могут способствовать развитию инноваций и улучшению процессов проектирования, строительства и управления объектами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: искусственный интеллект, нейросети, автоматизация, строительство, проектирование

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Слепушкин Д.В., Бурлов Д.Ю. Возможности искусственного интеллекта и автоматизации процессов проектирования в строительстве: библиометрический анализ // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 3. С. 440–455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Викторович Слепушкин, dv737@mail.ru.

Artificial intelligence and automation of design processes in construction: a bibliometric analysis

Dmitrii V. Slepushkin¹, Dmitrii Yu. Burlov²

¹ Moscow Innovation University; Moscow, Russian Federation;

² Moscow Financial and Industrial University "Synergy"; Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The development of artificial intelligence technologies in the construction sector is uneven; however, but the potential of AI/ML technologies in this field is enormous. The aim of the research is to conduct a bibliometric analysis of scientific publications on the development of artificial intelligence and automation technologies in construction design. The novelty of the research lies in a comprehensive analysis of AI research trends and dynamics in construction based on an extensive specimen of scientific publications. The practical significance consists in identifying promising areas for the application of AI/ML technologies for the development of innovations and optimization of processes in the construction industry.

Materials and methods. 16,819 scientific papers published between 1955 and 2023, indexed on the OpenAlex platform, were analyzed. The specimen was selected based on search queries related to artificial intelligence in construction in general, as well as in specific areas: BIM modelling, generative design, and digital twins. Methods of bibliometric analysis and statistical analysis were used, and research clustering was performed using VOSviewer 1.6.20.

Results. Research on the application of artificial intelligence capabilities in construction received an active impetus for development after 2020. The areas of "digital twins" and BIM technologies are just beginning to be considered from the perspective of AI/ML technology capabilities, while generative design is developing faster due to an earlier start of research. Key countries, universities, and thematic clusters in each direction were identified.

Conclusions. The research results show promising areas for the application of AI/ML technologies in the construction field. Further research on “digital twins”, BIM modelling, and generative design can contribute to the development of innovations and the improvement of design, construction, and facility management processes.

KEYWORDS: artificial intelligence, neural networks, automation, construction, design

FOR CITATION: Slepushkin D.V., Burlov D.Yu. Artificial intelligence and automation of design processes in construction: a bibliometric analysis. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(3):440-455. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.3.440-455 (rus.).

Corresponding author: Dmitrii V. Slepushkin, dv737@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие цифровизации повсеместно трансформирует экономические и социальные процессы, расширяя сферу охвата на ранее затрагиваемые аспекты и области научной и практической деятельности. Данная тенденция относится и к технически сложным отраслям — авиационной и космической промышленности, биотехнологиям, строительству и другим, где наблюдается постепенное внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ) и автоматизации процессов.

Искусственный интеллект рассматривается сегодня как стратегическое преимущество во всех сферах человеческой жизнедеятельности. Вместе с тем развитие его в различных секторах экономики происходит неравномерно и зависит от сложности бизнес-процессов, степени риска и необходимых затрат на проведение научно-исследовательских разработок. Однако использование подобных технологий сопряжено с ростом потенциальных рисков разного рода, которые могут возникнуть вследствие ошибок или неверного применения технологий ИИ. Интеграция новых цифровых инструментов, нейросетей сопровождается не только практико-ориентированной деятельностью, но и расширением области научных исследований, формируя необходимый базис для принятия качественных решений и минимизируя возможные негативные последствия.

Цель настоящей научной статьи заключается в проведении библиометрического анализа исследований о применении технологий искусственного интеллекта в строительстве и потенциале их использования в проектировании.

Достижение поставленной цели возможно за счет последовательного решения следующих задач: осуществление теоретического обзора исследований в рамках рассматриваемой темы, формирование выборки научных статей для дальнейшего библиометрического анализа, библиометрический анализ, обобщение полученных результатов исследования.

Вопросы применения ИИ все чаще становятся объектом научных исследований в самых разных областях, одна из таких областей — строительство и строительное проектирование. По данным аналитического отчета компании McKinsey & Company строительная сфера являлась одной из наименее оцифрованных отраслей экономики, хотя отдельные виды деятельности в строительстве успешно приме-

няют нейросетевые технологии и расширяют сферу такого использования.

Современные исследования подтверждают, что внедрение элементов ИИ позитивно отражается на снижении издержек в строительстве, сокращении ошибок, позволяет решать наиболее остро стоящие в строительной отрасли проблемы — перерасходы денежных средств, материалов, нарушения сроков строительства [1, с. 137, 138; 2, с. 250]. Возможности машинного обучения и искусственного интеллекта (так называемые AI/ML-технологии) расширяют их применение в строительной индустрии, позволяя решать сложные задачи в процессе архитектурного проектирования, автоматизации производственных процессов, упрощая функционал в таких областях, как планирование строительства, управление рисками в строительных проектах, обеспечение процессов контроля качества, повышение безопасности при строительстве, документационное обеспечение строительных проектов [3, 4].

Ряд исследований отечественных и зарубежных ученых посвящены изучению комплексных изменений в строительной сфере под воздействием технологий искусственного интеллекта. М.Б. Караманянц приводит основные векторы внедрения ИИ в строительстве на современном этапе. Наиболее востребованные области:

- проектирование зданий и сооружений;
- обеспечение процессов контроля качества и мер безопасности, в том числе путем внедрения инструментария риск-анализа;
- автоматизация строительных работ;
- поддержка управленческих решений в строительстве и автоматизация менеджмента проектов;
- снижение затрат на маркетинг при продаже строительных объектов;
- автоматизация управления запасами и логистикой в строительстве [5, с. 142].

Проведенный анализ показывает, что наиболее быстроразвивающимися сферами применения AI/ML-технологии в строительстве является BIM-моделирование, технологии цифровых двойников (ЦД) объектов и обеспечение процессов в архитектурном проектировании (также в исследованиях употребляется термин «генеративное проектирование»).

Н.М. Комаров и В.Г. Жаров указывают, что технология BIM — аббревиатура от Building Information Modeling, т.е. представляет собой информационную

виртуальную модель здания, которая описывает его существенные параметры и взаимосвязи [6, с. 77]. Использование подобных моделей позволяет оптимизировать процессы управления и эксплуатации зданий за счет взаимно интегрированных технологий строительного проектирования и функционального моделирования, что фактически делает технологию BIM универсальной и возможной для использования любым участником процесса строительства и моделирования зданий [7, с. 190, 191]. Внедрение нейросетевых моделей и инструментария ИИ существенно расширяет возможности BIM-моделирования, при этом развитие происходит как на теоретическом уровне, так и на практическом, что за счет взаимной синергии полученных результатов позитивно отражается на эффективности реализации строительных проектов [8; 9, с. 212].

Второе направление, где повсеместно внедряются технологии ИИ, — генеративное проектирование. Область автоматизации архитектурного проектирования в большей степени исследована зарубежными авторами. Так, обзорная статья о применении ИИ в архитектуре позволяет определить передовые области, в которых технологии AI/ML наиболее востребованы [10]. Проанализирована информация, изложенная в 75 научных статьях, полученные результаты систематизированы по темам. Авторами настоящего исследования дополнительно выполнен семантический анализ полученных результатов, который позволил определить, что основная область применения ИИ сегодня — это дизайн (преимущественно дизайн фасадов, дизайн макетов зданий). В общей сложности использование новых технологий в дизайне описывается в 22,7 % проанализированных авторами статьях. Также технологии ИИ востребованы при моделировании зданий (16 % проанализированных научных статей) и создании цифровых макетов (11 % проанализированных научных статей).

Достаточно внимания уделяется развитию синтезированных направлений деятельности в строительстве, где происходит взаимная интеграция возможностей оцифровки строительных процессов — BIM-моделирование и формирование ЦД зданий, управление строительством (SEM) и архитектурное проектирование [11, 12].

Третьим направлением, в рамках которого проявляется значительный интерес к технологиям ИИ, является формирование цифровых двойников — «виртуальных копий физических объектов, действий или систем <...> виртуальные модели зданий и инфраструктурных проектов для отслеживания прогресса, выявления надвигающихся проблем и повышения эффективности» [13, с. 357]. Создание моделей ЦД служит логическим продолжением цифрового моделирования, такая концепция впервые была представлена в США в 2003 г., фактически расширив уже существовавшую на тот момент BIM-технологию [14, с. 59; 15].

Технология ЦД значительно совершенствуется за счет применения методов машинного обучения, получая возможность анализировать большие объемы данных (в том числе исторических) и использовать соответствующие алгоритмы ИИ для улучшения прогнозов. Ключевой момент в этом случае — аналитические возможности AI/ML, которые позволяют выявлять скрытые закономерности и взаимосвязи в данных, что, в свою очередь, повышает точность и надежность прогнозов, предоставляемых цифровым двойником [16]. Текущая практика применения ЦД показывает, что существует три уровня моделирования в зависимости от степени автоматизации процессов:

- цифровая модель (Digital model), где данные и информация об обеих системах (реальной и виртуальной) передаются и обновляются вручную в обоих направлениях. Например, инженеры могут вносить изменения в виртуальную модель на основе сведений из реальной системы и наоборот;
- цифровая тень (Digital shadow), здесь информационный поток автоматизирован в одном направлении — от физической системы к ее виртуальной версии. Например, данные с датчиков в реальном времени могут автоматически обновлять виртуальную модель, но для принятия решений или корректировки действий требуется вмешательство инженера;
- цифровой близнец (Digital twin) — полностью интегрированная система в двунаправленный автоматический поток данных между реальной системой и ее ЦД, где данные непрерывно синхронизируются в прямом и обратном направлении. Внедрение AI/ML-технологий наиболее эффективно и достоверно именно в моделях цифровых близнецов.

Несмотря на имеющиеся перспективы, внедрение технологий ИИ в строительную сферу сопряжено со значительным количеством рисков и ограничений. Н.В. Городнова указывает, что до сих пор значимым ограничением для развития AI/ML-технологий является банальная несовместимость используемых информационных систем для проектирования в строительстве, логистических процессов в строительных проектах и сбора данных [17, с. 92]. Кроме того, индивидуальность каждого отдельно взятого проекта в строительстве также существенно ограничивает возможности автоматизации процессов в части проектирования за счет необходимости учета индивидуальных характеристик зданий, параметров их оснований, специфики природно-климатических условий. Как следствие, объем инвестиционных затрат не только на внедрение таких систем, но и на их достройку снижает рентабельность строительных проектов, ограничивая возможности применения технологии ИИ.

К аналогичным выводам приходят Е.К. Терешко и И.А. Рудская, считающие, что именно отсутствие информационного программного обеспечения (продукта), позволяющего объединять всю поступающую

информацию из различных систем, обеспечивающих строительный процесс, а также синхронизировать его — основное «узкое место» для дальнейшего развития BIM-проектирования. Тормозящими факторами выступают отсутствие квалифицированного персонала, в компетенции которого входит владение соответствующим программным обеспечением, а также «устоявшаяся система строительного производства “заказчик – генподрядчик – субподрядчик 1 ... n – конечный исполнитель работ”» [18, с. 27].

В строительной сфере наблюдается определенное сопротивление применению технологий AI/ML, а также трехмерного моделирования с применением BIM-технологий, обусловленное «старением» кадрового состава и трудностями с адаптацией к новым технологиям. Одной из причин кадрового сопротивления является недостаточность обучения и подготовки персонала для работы с BIM-технологиями, которая становится источником непонимания преимуществ и возможностей, а также неполного использования потенциала технологии. Как следствие, несмотря на достаточное количество программных решений, онлайн-платформ, такие ресурсы часто не используются в соответствии с имеющимся у них потенциалом [19, с. 309, 310].

Исследователи Университета Западной Англии (University of West of England — UWE) выявили четыре группы факторов, которые рассматриваются как сдерживающие развитие технологий цифровизации и автоматизации в строительном проектировании, и проранжировали их в порядке влияния [20, 21]. Установлено, что преимущественно ограничителями выступают экономические факторы — со стороны подрядчика (в первую очередь) и со стороны клиента (во вторую очередь). При этом влияние экономических факторов и рентабельности проекта намного сильнее влияет на подрядчика — оценка степени влияния возрастает почти вдвое (с 15,05 % у клиента до 31,3 % у подрядчика). В данном случае сдерживающими факторами выступают изначально низкий уровень выделенного бюджета на НИОКР в строительной сфере, фрагментированный характер строительства, а также слабая поддержка инноваций со стороны государственного сектора. Со стороны клиента влияет преимущественно сокращение общего размера бюджета на реализацию проекта. Также исследователями выделяются группы технико-культурных факторов (сюда отнесены общее сопротивление изменениям, слабая подготовленность кадров к новым технологиям работы) и внешнеэкономические факторы (низкая окупаемость инвестиций и недостаточность спроса на новые технологии).

Австралийские исследователи провели национальное исследование о восприятии технологий ИИ в строительной сфере, что позволило определить типовые ограничения [22]. Стоит отметить, что в целом отношение к новым нейросетевым технологиям и AI/ML-инструментам в строительстве преимущественно

положительное, а перспективы рассматриваются общественностью в два раза чаще, чем возможные ограничения. Опасения главным образом вызваны безопасностью данных при их использовании, фактическим отсутствием возможностей для внедрения нейросетевых технологий, увеличением финансовых рисков строительного проекта, не соответствующих полученному результату.

Целесообразно обозначить потенциальные перспективы AI/ML-технологий в строительной сфере. И.Н. Горбова, Р.Р. Аванесова и М.М. Мусаев ориентируются в первую очередь на получение социально позитивного результата от внедрения новых технологий, который будет выражен в следующем:

- улучшение качества жизни и инфраструктуры;
- повышение уровня инноваций;
- технологическое развитие;
- рост экономики [23, с. 50].

Г.Г. Кашеварова сужает область исследований, рассматривая влияние на деятельность отдельно взятого инженера-строителя [24, с. 175]. С такой точки зрения внедрение технологий ИИ позволяет значительно упростить и снизить временные, трудовые и финансовые затраты в обеспечении надзорных процессов на строительных площадках, автоматизации обнаружения дефектов и расчета (перерасчета) потенциальных рисков проекта. Расширение возможностей ИИ в строительстве должно быть реализовано системно, не только с позиции отдельно взятого сотрудника, но и в рамках отдельно взятого бизнес-процесса или группы процессов [25, с. 205; 26; 27, с. 509].

Не менее важно изучение и совершенствование потенциальных возможностей расширения объема аналитической обработки данных (на основании поступающей информации), направленной на снижение уровня неопределенности при принятии решений. Необходимо экстраполировать возможности применения технологий ИИ не только на сферу практического применения, но и на область теоретическую — требуется актуализация образовательных программ в сфере строительства, предполагающая внедрение тренировочного процесса использования ИИ в инженерное образование (не только в рамках отдельных дисциплин, но и за счет расширения практико-ориентированного образования в уже существующих, традиционных предметах по ФГОС) [28, с. 92; 29, 30].

Таким образом, проведенный анализ показывает разносторонность проводимых исследований, которые посвящены как текущей практике применения ИИ в строительной индустрии, так и потенциальным перспективам. Представленное исследование направлено на выявление основных направлений изучения в рамках рассматриваемой темы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проанализировано 16 819 научных статей, опубликованных в период с 1955 по 2023 г. включительно и индексируемых на платформе научной литературы

с открытым API — OpenAlex. Выборка научных статей для анализа осуществлялась по поисковому запросу «artificial intelligence and the construction industry and automation and design», а также по отдельным исследовательским направлениям с запросами «artificial intelligence and BIM-modeling», «artificial intelligence and generative design in construction», «artificial intelligence and digital twins in construction» за аналогичный временной период.

Для проведения исследования по сформированной выборке использованы методы библиометрического анализа, статистического анализа, выполнена кластеризация исследований при помощи компьютерной программы VOSviewer 1.6.20.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Количество научных публикаций по вопросам возможного применения или теоретического развития концепций ИИ с каждым годом становится все больше. В последние годы количество научных статей в рассматриваемой области растет в геометрической прогрессии, а потенциальный охват тем существенно расширяется.

Проведенный анализ открытого научного каталога OpenAlex показывает, что количество публикаций со словосочетанием «искусственный интеллект» (artificial intelligence) с 1800 г. по настоящее время составляет 919 тыс. единиц. Наибольшее количество исследований о возможностях ИИ проводится в сфере медицины, бизнеса и в поле этических вопросов (темы расположены в порядке убывания количества научных публикаций). Наибольшая доля исследований представлена в последние годы, в 2023 г. количество научных публикаций достигло 122 828 единиц или почти 13,4 % от всех публикаций за последние два столетия (к сравнению, количество публикаций в 1800 г. — 11 ед., а в 1900 — около двухсот).

За аналогичный период времени количество научных публикаций о развитии ИИ в строительстве составило всего 72 тыс. ед., т.е. каждая тринадцатая научная публикация освещает вопросы применимости ИИ к строительной сфере (запрос формировался по словосочетанию «artificial intelligence» и «construction industry»). По итогам 2023 г. количество научных публикаций достигло 9 тыс. ед., пиковое значение отмечено в 2022 г. — более 9,8 тыс. ед.

Заинтересованность в исследованиях об ИИ в строительной сфере в мировом сообществе сформировалась на несколько десятилетий позже начала стремительного развития исследований по данному вопросу (рис. 1).

Влияние технологий ИИ на возможности автоматизации в строительной сфере исследованы путем библиометрического анализа открытой базы данных Open Alex. На первом этапе была сформирована выборка по запросу, объединяющему искусственный интеллект, автоматизацию проектирования и строительную сферу («artificial intelligence and the construction industry and automation and design»). Объем выборки для анализа составил 16 819 ед.

По рассматриваемой теме публикации появляются только с 1950-х гг. и имеют следующую динамику (рис. 2).

Визуально представленный период возможно разделить на 4 этапа развития исследований в рассматриваемой области.

1. С 1955 по 1979 г. — этап формирования интереса к исследованиям о возможностях ИИ в автоматизации процессов строительства. На данном этапе количество публикаций крайне мало — в общей сложности опубликовано 212 исследований (1,3 % от общей выборки). В среднем ежегодно публикуется около 8 исследований, за исключением 1966 г., когда было опубликовано 84 научные статьи после публикации отчета Национальной комиссии по технологи-

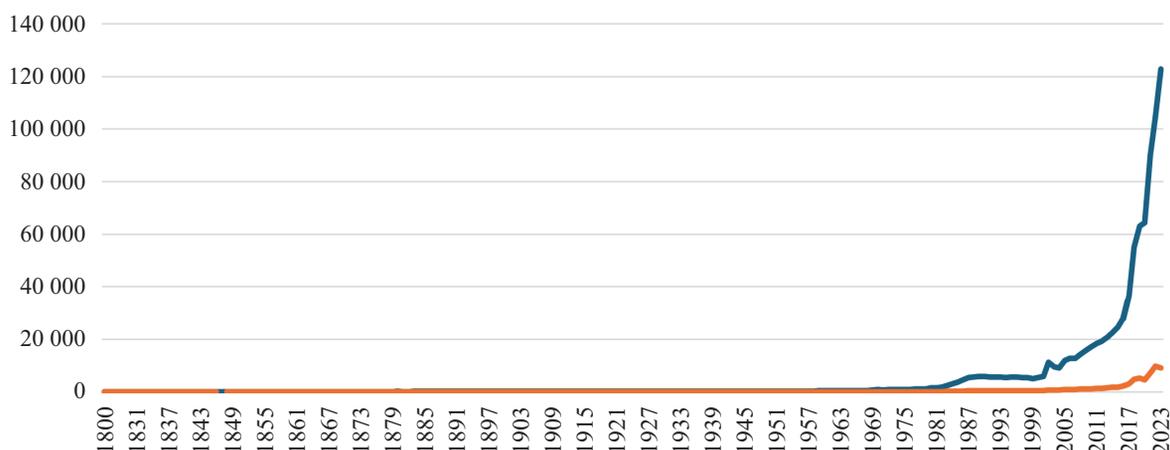


Рис. 1. Количество научных публикаций об использовании искусственного интеллекта в целом и в строительной отрасли в 1800–2023 гг., ед.

Fig. 1. The number of scientific publications on the use of artificial intelligence in general and in the construction industry in 1800–2023, units

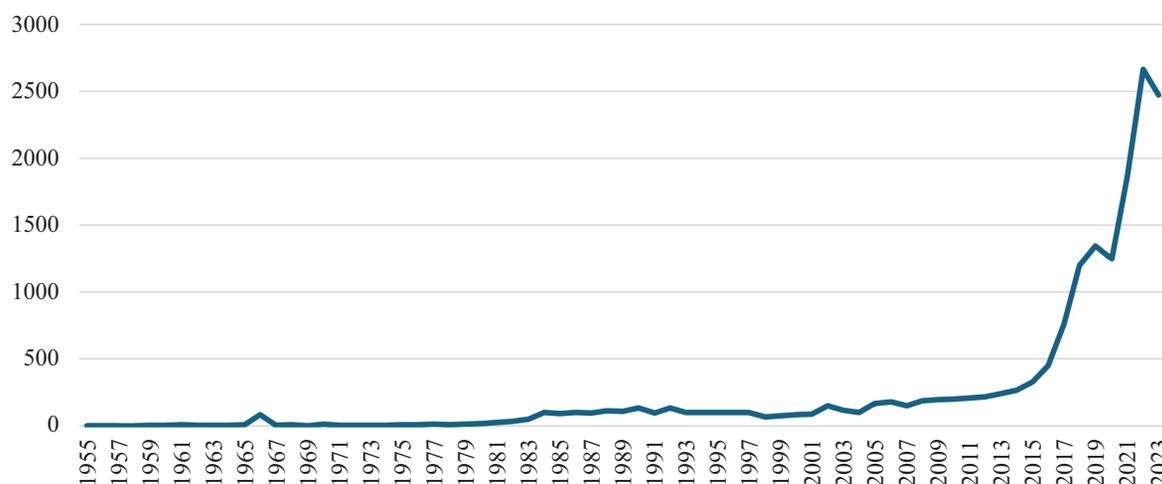


Рис. 2. Количество научных публикаций по рассматриваемой теме в 1955–2023 гг., ед.

Fig. 2. The number of scientific publications on the topic in 1955–2023, units

ям, автоматизации и экономическому прогрессу США о необходимости развивать сегмент автоматизации. В рассматриваемый период времени не наблюдается стабильного роста научных публикаций, однако за счет небольших количественных значений средний прирост показателя ежегодно составляет 82,2 %.

2. 1980–2007 гг. — период накопления потенциала научных исследований. В рассматриваемом периоде опубликовано 2759 исследовательских материалов (16,4 % от общей выборки). Для этого этапа характерно появление не только научных статей, но также отчетов, книг. В среднем ежегодно публикуется 99 исследований, а средний прирост публикаций год к году составляет только 13,3 %. Динамика публикационной активности неоднозначна, так как наблюдалось некоторое охлаждение интереса к теме в период с 1998 по 2001 г.

3. С 2008 по 2016 г. — фаза стабильного развития научной области, отмечается стабильный рост исследований, появляются научные диссертации. В этом периоде опубликовано 2291 исследований

(13,6 % от общей выборки), в среднем ежегодно публикуется 225 исследований, средний прирост показателя составляет 13,7 %.

4. 2017–2023 гг. — этап резкого развития научной области, который характеризуется существенным увеличением исследований. Всего за 7 лет опубликована основная масса всех научных исследований — 11 560 ед., что составляет 68,8 % от общей выборки. Несмотря на незначительное замедление публикационной активности в 2020 г. в связи с макроэкономическими шоками, средние показатели публикаций составляют 1650 ед. в год, средний прирост показателя количества публикаций год к году — 31,1 %. В 2022 г. наблюдается пиковое значение количества научных исследований — более 2,6 тыс. ед. Для данного этапа характерно не только количественное, но и качественное развитие рассматриваемой области исследования (табл. 1).

В рассматриваемых периодах наблюдается сдвиг от небольших, фрагментарных исследований в сторону фундаментальных научных трудов.

Табл. 1. Распределение публикаций по типу исследований

Table 1. Distribution of publications by type of research

| Тип публикации Type of publication | Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|--|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| | 1955–1979 | | 1980–2007 | | 2008–2016 | | 2017–2023 | | Всего / In total | |
| | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % |
| Научная статья Scientific paper | 206 | 97,2 | 2485 | 90,1 | 1885 | 82,3 | 8974 | 77,6 | 13 550 | 80,6 |
| Глава в книге Chapter in the book | 1 | 0,5 | 107 | 3,9 | 234 | 10,2 | 988 | 8,5 | 1330 | 7,9 |
| Паратекст Paratext | 0 | 0,0 | 15 | 0,5 | 30 | 1,3 | 512 | 4,4 | 557 | 3,3 |

| Тип публикации Type of publication | Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period | | | | | | | | | |
|---|--|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| | 1955–1979 | | 1980–2007 | | 2008–2016 | | 2017–2023 | | Всего / In total | |
| | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % |
| Диссертация Dissertation | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 23 | 1,0 | 402 | 3,5 | 425 | 2,5 |
| Книга Book | 0 | 0,0 | 13 | 0,5 | 44 | 1,9 | 328 | 2,8 | 385 | 2,3 |
| Отчет Report | 5 | 2,4 | 110 | 4,0 | 24 | 1,0 | 237 | 2,1 | 376 | 2,2 |
| Другие типы исследований Other types of research | 0 | 0,0 | 29 | 1,1 | 51 | 2,2 | 116 | 1,0 | 196 | 1,2 |
| Всего In total | 212 | 100,0 | 2759 | 100,0 | 2291 | 100,0 | 11 560 | 100,0 | 16 819 | 100,0 |

Как можно наблюдать, количество диссертаций в абсолютных значениях начинает расти только с начала 2000-х гг. С конца 1980-х гг. также отмечается расширение типов исследований — публикуются книги, отчеты.

Среди стран лидерство по количеству публикаций удерживает США, однако общий анализ тенденций показывает, что в последний анализируемый период лидерские позиции перешли к Китаю. Традиционно перспективы изучения возможностей применения ИИ для автоматизации процессов в строительной сфере наблюдаются у трех стран — США, Китая и Великобритании. Одной из первых стран, активно развивавшихся в данном направлении, была Канада (период 1980–2007), которая затем снизила свою исследовательскую активность в этом направлении (табл. 2).

Стоит отметить, что Россия также входит в первую двадцатку стран, занимающихся исследованиями в рассматриваемой области, но в российских вузах широко не распространены подобные исследования. Наибольшее количество исследований опубликовано авторами Российской академии наук (отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН) в общем количестве 50 ед. Также в данном направлении проводится исследовательская деятельность учеными Уральского федерального университета, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Московского государственного строительного университета. Однако эти исследования преимущественно затрагивают вопросы развития энергетических и энергоснабженческих систем при строительстве, либо являются узкоспециализированными (например, научные ста-

Табл. 2. Распределение публикаций по странам

Table 2. Distribution of publications by country

| Страна Country | Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period | | | | | | | | | |
|---------------------------------|--|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| | 1955–1979 | | 1980–2007 | | 2008–2016 | | 2017–2023 | | Всего / In total | |
| | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % |
| США USA | 97 | 45,8 | 902 | 32,7 | 371 | 16,2 | 1277 | 11,0 | 2647 | 15,7 |
| Китай China | 0 | 0,0 | 91 | 3,3 | 340 | 14,8 | 1733 | 15,0 | 2164 | 12,9 |
| Великобритания Great Britain | 8 | 3,8 | 281 | 10,2 | 191 | 8,3 | 954 | 8,3 | 1434 | 8,5 |
| Германия Germany | 1 | 0,5 | 81 | 2,9 | 118 | 5,2 | 628 | 5,4 | 828 | 4,9 |

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

| Страна Country | Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period | | | | | | | | | |
|------------------------|--|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| | 1955–1979 | | 1980–2007 | | 2008–2016 | | 2017–2023 | | Всего / In total | |
| | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % |
| Индия India | 1 | 0,5 | 42 | 1,5 | 91 | 4,0 | 496 | 4,3 | 630 | 3,7 |
| Италия Italy | 0 | 0,0 | 35 | 1,3 | 67 | 2,9 | 492 | 4,3 | 594 | 3,5 |
| Канада Canada | 1 | 0,5 | 114 | 4,1 | 67 | 2,9 | 372 | 3,2 | 554 | 3,3 |
| Австралия Australia | 0 | 0,0 | 85 | 3,1 | 72 | 3,1 | 385 | 3,3 | 542 | 3,2 |
| Франция France | 0 | 0,0 | 98 | 3,6 | 90 | 3,9 | 322 | 2,8 | 510 | 3,0 |
| Испания Spain | 0 | 0,0 | 35 | 1,3 | 93 | 4,1 | 359 | 3,1 | 487 | 2,9 |
| Бразилия Brazil | 0 | 0,0 | 20 | 0,7 | 64 | 2,8 | 322 | 2,8 | 406 | 2,4 |
| Россия Russia | 3 | 1,4 | 15 | 0,5 | 55 | 2,4 | 320 | 2,8 | 393 | 2,3 |
| Другие Other | 101 | 47,6 | 960 | 34,8 | 672 | 29,3 | 3900 | 33,7 | 5630 | 33,5 |
| Всего In total | 212 | 100,0 | 2759 | 100,0 | 2291 | 100,0 | 11 560 | 100,0 | 16 819 | 100,0 |

ты о выявлении дефектов в строительстве при помощи метода кластеризации, автоматизация подготовки ремонтной документации, применение интеллектуальных систем в строительном управлении и т.д.).

Также выполнен анализ распределения публикаций по сферам исследования (табл. 3).

Из приведенной информации видно, что представители научной сферы преимущественно проводят исследования в области промышленного инжиниринга, однако, с начала 2000-х гг. возрастает интерес к применению технологий ИИ при строительстве зданий и сооружений и в гражданском строительстве — по-

Табл. 3. Распределение публикаций по сфере исследования

Table 3. Distribution of publications by field of research

| Тип публикации Type of publication | Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period | | | | | | | | | |
|---|--|-----|---------------------------------------|------|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|------|---------------------------------------|------|
| | 1955–1979 | | 1980–2007 | | 2008–2016 | | 2017–2023 | | Всего In total | |
| | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % |
| Промышленный инжиниринг Industrial engineering | 8 | 3,8 | 308 | 11,2 | 216 | 9,4 | 1160 | 10,0 | 1692 | 10,1 |
| Строительство зданий и сооружений Construction of buildings and structures | 1 | 0,5 | 118 | 4,3 | 101 | 4,4 | 630 | 5,4 | 850 | 5,1 |

| Тип публикации Type of publication | Количество опубликованных статей по периодам Number of published papers by period | | | | | | | | | |
|--|--|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| | 1955–1979 | | 1980–2007 | | 2008–2016 | | 2017–2023 | | Всего In total | |
| | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % | Абсолютное значение Absolute value | % |
| Проектирование систем управления Design of control systems | 5 | 2,4 | 185 | 6,7 | 205 | 8,9 | 339 | 2,9 | 734 | 4,4 |
| Электротехника и электроника Electrical and Electronics Engineering | 1 | 0,5 | 66 | 2,4 | 101 | 4,4 | 398 | 3,4 | 566 | 3,4 |
| Машиностроение Mechanical engineering | 2 | 0,9 | 143 | 5,2 | 114 | 5,0 | 261 | 2,3 | 520 | 3,1 |
| Гражданское строительство Civil engineering | 0 | 0,0 | 20 | 0,7 | 16 | 0,7 | 129 | 1,1 | 165 | 1,0 |
| Архитектура Architecture | 1 | 0,5 | 15 | 0,5 | 14 | 0,6 | 60 | 0,5 | 90 | 0,5 |
| Другие Other | 194 | 91,5 | 1904 | 69,0 | 1524 | 66,5 | 8583 | 74,2 | 12 202 | 72,5 |
| Всего In total | 212 | 100,0 | 2759 | 100,0 | 2291 | 100,0 | 11 560 | 100,0 | 16 819 | 100,0 |

казатель удельного веса по рассматриваемым этапам стабильно возрастает. Снизилась востребованность в научных исследованиях по направлению «проектирование систем управления», «электротехника и электроника», «машиностроение» и «архитектура». Количество исследований по этим направлениям растет медленнее, что обуславливает снижение удельного веса таких научных публикаций. Отметим, что большая часть научных статей опубликована на английском языке (более 96 %), но данные нельзя рассматривать как показательные. На втором месте по количеству

расположены исследования, опубликованные на русском языке с удельным весом 0,6 %.

Более показательна статистика по анализу отдельных направлений исследований (табл. 4).

Направление генеративного проектирования начало развиваться раньше остальных, что обусловило большую проработанность в научных исследованиях. Анализ публикационной активности по направлениям представлен на рис. 3.

Как можно видеть, генеративное проектирование получило более активное развитие еще в начале

Табл. 4. Анализ научных публикаций и их периодизации по отдельным направлениям исследований

Table 4. Analysis of scientific publications and their periodization in certain areas of research

| Направление исследований в строительстве The direction of research in construction | Количество опубликованных исследований Number of published studies | В том числе опубликованные в анализируемый период с 1955 по 2023 г. Including those published in the analyzed period from 1955 to 2023 | Общий охватываемый период публикации, гг. The total period of publication covered, years |
|---|---|---|---|
| Применение технологии цифровой двойник Application of the digital twin | 5485 | 5392 | 1857–2024 |
| BIM-моделирование BIM modelling technology | 3716 | 3653 | 1860–2024 |
| Генеративное проектирование Generative design | 9425 | 9240 | 1827–2024 |

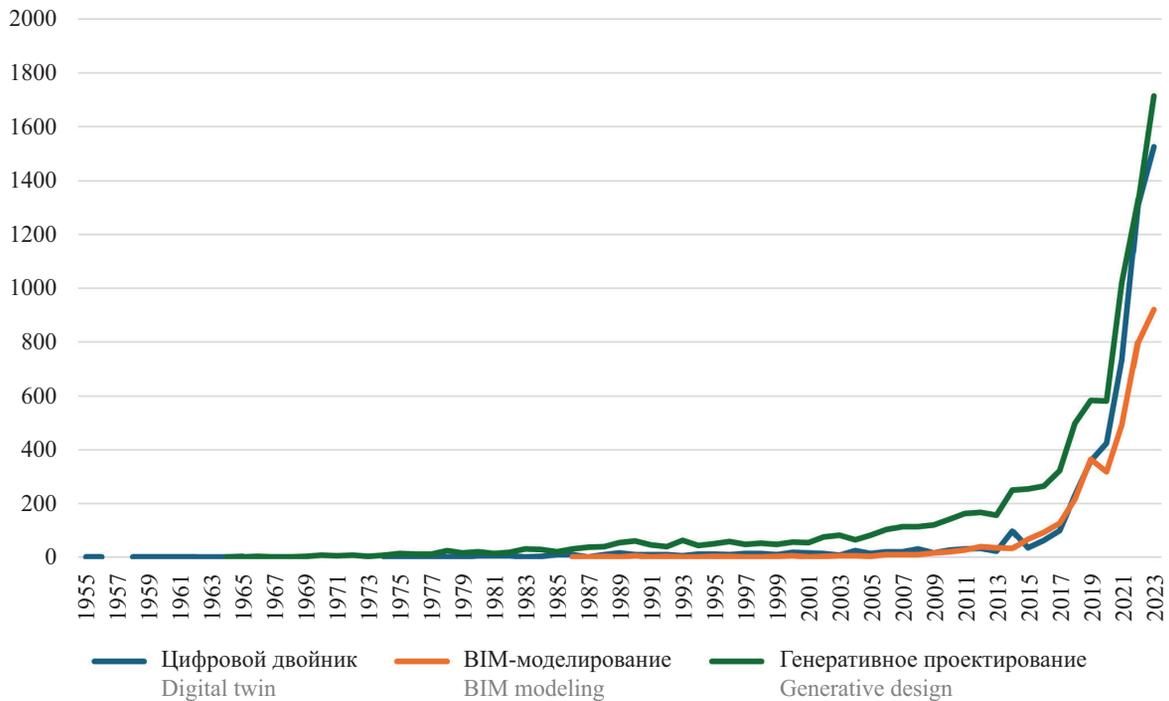


Рис. 3. Публикационная активность по направлениям исследований в 1955–2023 гг., ед.

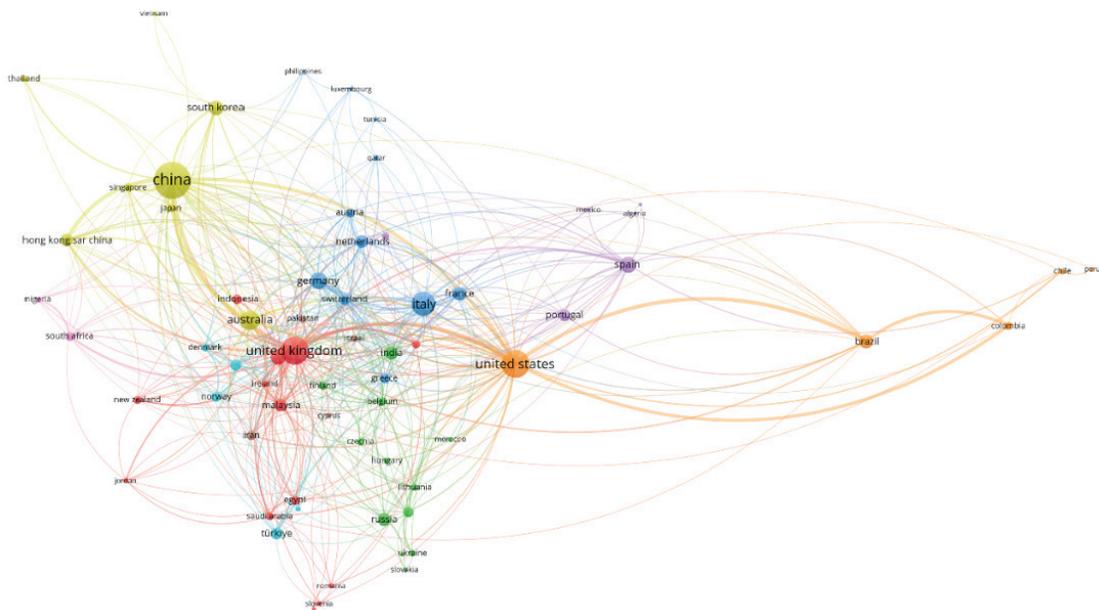
Fig. 3. Publication activity in research areas in 1955–2023, units

1990-х гг., в то время как остальные цифровые двойники и BIM-моделирования стали объектами активного исследования только ближе к 2010 гг.

Также следует отметить, что направления генеративное проектирование и цифровой двойник преимущественно изучаются следующими университетами: Лондонский университет (192 и 81 публикация соответственно), Калифорнийский университет (190 и 67 публикация соответственно), Китайская академия наук (116 и 54 публикации соответственно). Направ-

ление BIM-моделирования в основном исследуется в университетах Италии — Миланский политехнический университет (71 публикация, также активно проводит исследования по разработке цифровых двойников — 57 публикаций), Сапиенца — Римский университет (56 публикаций), Туринский политехнический университет (42 публикации).

При помощи программы VOSviewer были построены кластерные карты взаимодействия по странам, которые показывают, что в области BIM-



a

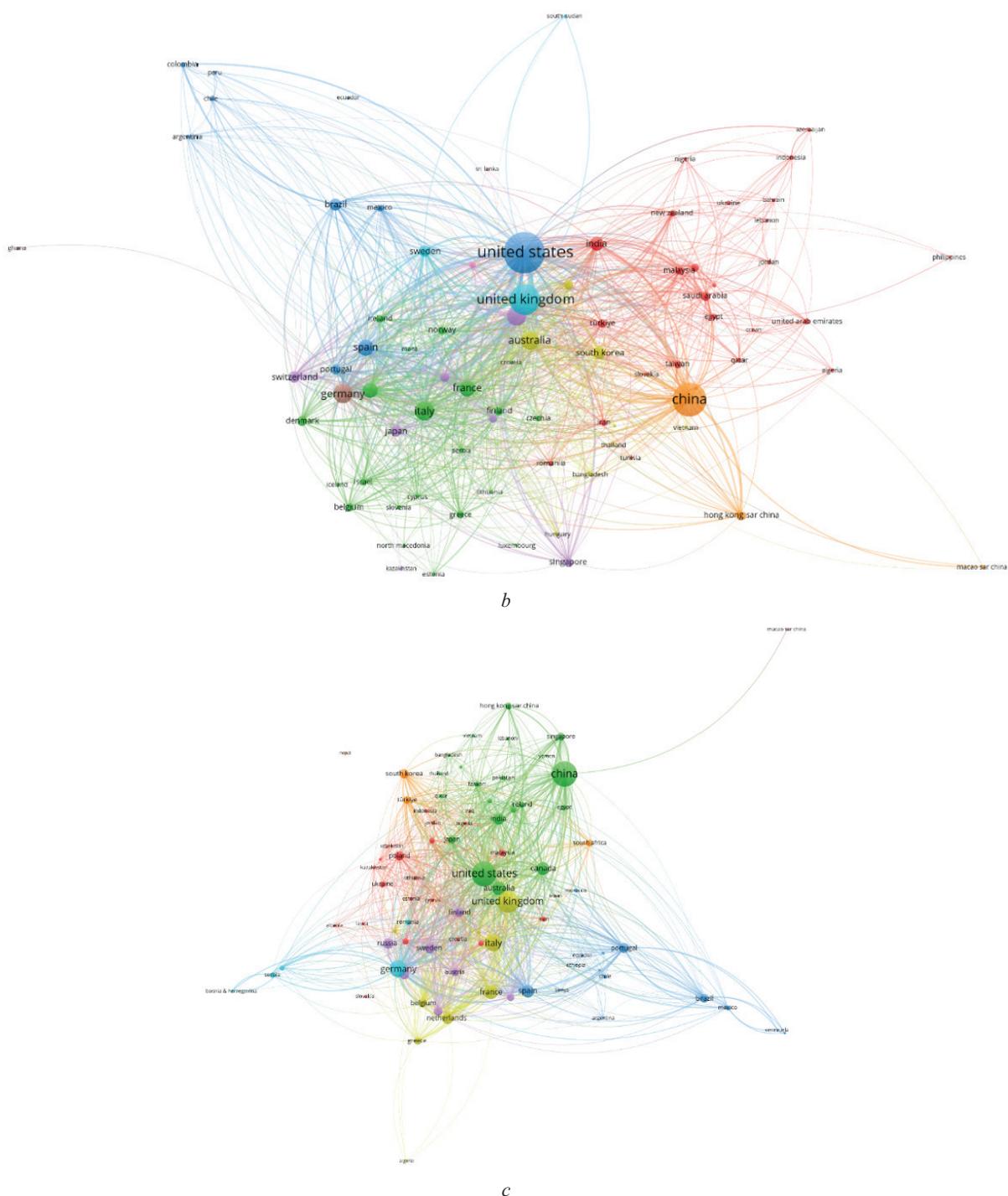


Рис. 4. Кластерная карта научного сотрудничества по исследованию применения искусственного интеллекта: *a* — в BIM-моделировании; *b* — в генеративном проектировании; *c* — в области разработки цифровых двойников

Fig. 4. Cluster map of scientific cooperation on the study of the use of artificial intelligence: *a* — in BIM modelling; *b* — in generative design; *c* — in the development of digital twins

моделирования основными кластерами научных исследований являются Великобритания, которая имеет широкое межстрановое взаимодействие, Китай, а также США. Россия в данной области сотрудничает преимущественно с Китаем, США, Канадой, Италией, Египтом, Индией, Нидерландами, Казахстаном (рис. 4).

В области генеративного проектирования сотрудничество более развито, а взаимосвязи между исследователями различных стран более обширны. Аналогично можно выделить три крупных кластера — США, Великобританию и Китай, а также три меньших кластера — Германию, Канаду и Австралию (рис. 4, *b*).

Табл. 5. Сводные результаты направлений исследований по итогам кластерного анализа по ключевым словам

Table 5. Summary results of research directions based on the results of cluster analysis by keywords

| Направление исследований в строительстве The direction of research in construction | Подтемы в обозначенных направлениях исследований Subtopics in the designated areas of research | Четкость кластеров Cluster clarity |
|---|--|---------------------------------------|
| Применение технологии цифровой двойник Application of the digital twin | Применение компьютерных наук в инжиниринге, социальное восприятие технологий, экономическая эффективность технологии Application of computer science in engineering, social perception of technology, economic efficiency of technology | Средняя Average |
| ВМ-моделирование BIM modelling technology | Применимость в различных областях инженерного дела (архитектура, строительство, электрика, сфера городского строительства и т.д.), формирование баз данных и управление ими, экологическое воздействие Applicability in various fields of engineering (architecture, construction, electrics, urban construction, etc.), database generation and management, environmental impact | Средняя Average |
| Генеративное проектирование Generative design | Возможности применения машинного обучения и глубокого обучения, текущее применение в строительной сфере, влияние на экономические показатели, влияние на общественность The possibilities of applying machine learning and deep learning, current applications in the construction sector, impact on economic indicators, impact on the public | Высокая High |

В России исследования в данном направлении развиты в меньшей степени, а основными направлениями межгосударственного сотрудничества являются научные исследования с обозначенными выше крупными исследователями, а также с Японией, Италией, Францией, Южной Кореей, Сингапуром, Индией и некоторыми другими.

В сфере создания ЦД кластеризация по основным странам сохраняется неизменной, однако количество научных публикаций российских исследователей более заметно (рис. 4, с).

Исследования в РФ осуществляются преимущественно совместно со специалистами таких стран, как США, Китай, Великобритания, Германия, Италия, Франция, Нидерланды, Южная Корея, Испания, Португалия, Индия и др.

По каждому из направлений также выполнен кластерный анализ и выявлены ключевые направления исследований по каждой из тем на основании ключевых слов (параметры — type of analysis «Co-occurrence», unit of analysis «Concepts»), которые представлены в табл. 5.

Анализ данных позволяет сделать вывод о характере и структуре исследований в области строительства в рамках трех выявленных направлений. Как можно видеть, все представленные направления держат в фокусе инновации в строительстве, поскольку одно из значимых направлений исследования — применение современных технологических подходов для улучшения процессов проектирования и управления в строительстве. Также особое внимание уделяется вопросу эффективности использования новых технологий и их восприятию (одобрению или неодобрению) со стороны общественности. Целесообразно предположить, что оценка новых технологий со сторо-

ны общественности связана с потенциальными рисками использования AI/ML-технологий. Генеративное проектирование выделяется среди трех направлений как наиболее четкое и однородное, в то время как применение технологии ЦД и ВМ-моделирование имеют среднюю степень четкости кластеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ современных научных публикаций показал явную тенденцию к увеличению исследований о возможностях ИИ в строительной сфере. Несмотря на то, что строительство является одной из наименее оцифрованных областей, с 2017 г. наблюдается устойчивый тренд на необходимость развития возможностей цифровой экономики в строительстве. Наиболее востребованными в настоящий момент выступают исследования о необходимости внедрения технологий в такие разработки, как цифровой двойник, ВМ-моделирование и генеративное проектирование. Потенциально исследователи находятся в поиске способов снижения затрат на строительство, минимизации рисков в строительных проектах и повышения качества менеджмента. Более развитая из рассматриваемых направлений исследований — область генеративного проектирования, в то время как технология ЦД и ВМ-моделирование находятся на ранней стадии исследований и характеризуются нечеткостью кластеров по ключевым направлениям исследований. Следовательно, данные вопросы рассматриваются исследователями с различных сторон, чтобы получить более полное понимание их потенциала и применимости в строительной отрасли. Дальнейшие исследования в этих областях могут способствовать развитию инноваций и улучшению процессов проектирования, строительства и управления объектами.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Газаров А.Р. Преимущества использования искусственного интеллекта в сфере строительства // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 136–139. EDN DZQOPN.
2. Колчин В.Н. Специфика применения технологии «искусственного интеллекта» в строительстве // Инновации и инвестиции. 2022. № 3. С. 250–253. EDN JJLECU.
3. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications // Automation in Construction. 2022. Vol. 141. P. 104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440
4. Rafsanjani H.N., Nabizadeh A.H. Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture, engineering, and construction (AEC) industry // Computers in Human Behavior Reports. 2023. Vol. 11. P. 100319. DOI: 10.1016/j.chbr.2023.100319
5. Караманянц М.Б. Изменения строительной отрасли при активном внедрении технологии с применением искусственного интеллекта (ИИ) // Экономика строительства. 2023. № 9. С. 141–145. EDN SBRLCQ.
6. Комаров Н.М., Жаров В.Г. Управление инженерными системами интеллектуального здания с использованием технологий информационного и инфографического моделирования // Сервис plus. 2013. № 2. С. 74–81. EDN QAXENX.
7. Волков А.А., Батов Е.И. Системотехника функционального моделирования интеллектуальных зданий // Вестник МГСУ. 2015. № 10. С. 188–193. EDN UMUGLZ.
8. Каширинур М.М., Николюк В.А. Возможности искусственного интеллекта в строительной индустрии // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 1. С. 163–178. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178. EDN KRQYWZ.
9. Плешко М.С., Пошев А.У.Б. Модернизация методов решения прикладных задач в строительстве с применением BIM-технологий // Инновации и инвестиции. 2021. № 5. С. 209–212. EDN DZLGSI.
10. Pena M.L.C., Carballal A., Rodríguez-Fernández N., Santos I., Romero J. Artificial intelligence applied to conceptual design : a review of its use in architecture // Automation in Construction. 2021. Vol. 124. P. 103550. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103550
11. Pan Y., Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management : a critical review and future trends // Automation in Construction. 2021. Vol. 122. Pp. 103517. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517
12. Urbieto M., Urbieto M., Laborde T., Villarreal G., Rossi G. Generating BIM model from structural and architectural plans using Artificial Intelligence // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 78. P. 107672. DOI: 10.1016/j.job.2023.107672
13. Шананин В.А., Лосев К.Ю. Создание цифровых двойников в строительстве при помощи искусственного интеллекта // Инновации и инвестиции. 2023. № 6. С. 357–360. EDN NXXOJC.
14. Алтынцев М.А., Карпук П.А. Создание метрической имитационной модели «цифрового двойника» активным методом дистанционного зондирования земли // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25. № 4. С. 58–67. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-58-67. EDN VZKWTI.
15. Delgado J.M.D., Oyedele L. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing // Advanced Engineering Informatics. 2021. Vol. 49. P. 101332. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101332
16. Kreuzer T., Papapetrou P., Zdravkovic J. Artificial intelligence in digital twins – a systematic literature review // Data & Knowledge Engineering. 2024. Vol. 151. P. 102304. DOI: 10.1016/j.datak.2024.102304
17. Городнова Н.В. Применение искусственного интеллекта и нанотехнологий в инвестиционно-строительной сфере России // Вестник НГУЭУ. 2021. № 3. С. 81–95. DOI: 10.34020/2073-6495-2021-3-081-095. EDN KWCGFR.
18. Терешко Е.К., Рудская И.А. Цифровой потенциал строительного комплекса: понятие, сущность и проблемы развития // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2020. Т. 13. № 3. С. 27–40. DOI: 10.18721/JE.13302. EDN QNGQIV.
19. Young D., Panthi K., Noor O. Challenges involved in adopting BIM on the construction jobsite // EPI Series in Built Environment. 2021. DOI: 10.29007/f8r3
20. Abioye S.O., Oyedele L.O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J.M.D., Bilal M. et al. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 44. P. 103299. DOI: 10.1016/j.job.2021.103299
21. Delgado J.M.D., Oyedele L., Ajayi A., Akanbi L., Akinade O., Bilal M. et al. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption // Journal of Building Engineering. 2019. Vol. 26. P. 100868. DOI: 10.1016/j.job.2019.100868
22. Regona M., Yigitcanlar T., Xia B., Li R.Y.M. Artificial intelligent technologies for the construction industry: how are they perceived and utilized in Australia? //

Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. 2022. Vol. 8. Issue 1. P. 16. DOI: 10.3390/joitmc8010016

23. Горбова И.Н., Аванесова Р.Р., Мусаев М.М. Цифровая трансформация строительной отрасли России // Вестник Академии знаний. 2023. № 2 (55). С. 46–51. EDN EDFXIZ.

24. Кашеварава Г.Г. «Искусственный интеллект», или «логические рассуждения и разумные решения» в технической диагностике объектов строительства // Academia. Архитектура и строительство. 2023. № 4. С. 166–180. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-166-180. EDN SYDNNW.

25. Чудаева А.А., Барышев Д.В. Инкорпорация цифровых технологий в строительство: текущая ситуация и перспективы // Теория и практика общественного развития. 2023. № 6 (182). С. 198–205. DOI: 10.24158/tipor.2023.6.25. EDN SXCDXC.

26. Hunde B.R., Woldeyohannes A.D. Future prospects of computer-aided design (CAD) : a review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended

reality, and 3D printing // Results in Engineering. 2022. Vol. 14. P. 100478. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100478

27. Oluleye B.I., Chan D.W., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review // Sustainable Production and Consumption. 2023. Vol. 35. Pp. 509–524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002

28. Лёвин Б.А., Пискунов А.А., Поляков В.Ю., Савин А.В. Искусственный интеллект в инженерном образовании // Высшее образование в России. 2022. Т. 31. № 7. С. 79–95. DOI: 10.31992/0869-3617-2022-31-7-79-95. EDN KCNAPI.

29. Hanafy N.O. Artificial intelligence's effects on design process creativity: “A study on used A.I. Text-to-Image in architecture” // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 80. P. 107999. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107999

30. Ko J., Ennemoser B., Yoo W., Yan W., Clayton M.J. Architectural spatial layout planning using artificial intelligence // Automation in Construction. 2023. Vol. 154. P. 105019. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105019

Поступила в редакцию 20 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 1 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 14 ноября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Викторович Слепушкин — аспирант; Московский инновационный университет; 107564, г. Москва, ул. Краснобогатая, д. 10; SPIN-код: 4234-0485, РИНЦ ID: 1260200; dv737@mail.ru;

Дмитрий Юрьевич Бурлов — кандидат экономических наук, доцент; Московский финансово-промышленный университет «Синергия»; 125315, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 80 Б; SPIN-код: 3365-5590, РИНЦ ID: 282537, ORCID: 0009-0008-5269-635; budim2022@yandex.ru.

Вклад авторов:

Слепушкин Д.В. — идея, сбор и обработка материала, написание исходного текста, итоговые выводы.

Бурлов Д.Ю. — научное руководство, концепция исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Gazarov A.R. Advantages of using artificial intelligence in the field of construction. *Izvestiya Tula State University*. 2020; 4:136-139. EDN DZQOPN. (rus.).

2. Kolchin V.N. The specifics of the use of “Artificial intelligence” technology in construction. *Innovation & Investment*. 2022; 3:250-253. EDN JJLECU. (rus.).

3. Baduge S.K., Thilakarathna S., Perera J.S., Arashpour M., Sharafi P., Teodosio B. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. *Automation in Construction*. 2022; 141:104440. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104440

4. Rafsanjani H.N., Nabizadeh A.H. Towards human-centered artificial intelligence (AI) in architecture, engineering, and construction (AEC) industry. *Computers in Human Behavior Reports*. 2023; 11:100319. DOI: 10.1016/j.chbr.2023.100319

5. Karamanyants M.B. Changes in the construction industry with the active implementation of technology using artificial intelligence (AI). *Economy of Construction*. 2023; 9:141-145. EDN SBRLCQ. (rus.).

6. Komarov N.M., Zharov V.G. Management of engineering systems of an intelligent building using information and infographic modeling technologies. *Service Plus*. 2013; 2:74-81. EDN QAXENX. (rus.).

7. Volkov A.A., Batov E.I. System Engineering of Functional Modeling of Intelligent Buildings. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2015; 10:188-193. EDN UMOGLZ. (rus.).

8. Kashiripoor M.M., Nikolyyuk V.A. Artificial intelligence in construction industry. *Journal of Construction and Architecture*. 2024; 26(1):163-178. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-1-163-178. EDN KRQYWZ. (rus.).

9. Pleshko M.S., Poshev A.U.B. Modernization of methods for solving applied problems in construction with the use of BIM technologies. *Innovation & Investment*. 2021; 5:209-212. EDN DZLGSJ. (rus.).
10. Pena M.L.C., Carballal A., Rodríguez-Fernández N., Santos I., Romero J. Artificial intelligence applied to conceptual design : a review of its use in architecture. *Automation in Construction*. 2021; 124:103550. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103550
11. Pan Y., Zhang L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management : a critical review and future trends. *Automation in Construction*. 2021; 122:103517. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517
12. Urbietta M., Urbietta M., Laborde T., Villarreal G., Rossi G. Generating BIM model from structural and architectural plans using Artificial Intelligence. *Journal of Building Engineering*. 2023; 78:107672. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107672
13. Shaninin V.A., Losev K.Yu. Creating digital doubles in construction using artificial intelligence. *Innovation & Investment*. 2023; 6:357-360. EDN NXXOJC. (rus.).
14. Altyntsev M.A., Karpik P.A. Creating metric simulated model of a “Digital twin” by the active earth remote sensing method. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*. 2020; 25(4):58-67. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-58-67. EDN VZKWTI. (rus.).
15. Delgado J.M.D., Oyedele L. Digital Twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. *Advanced Engineering Informatics*. 2021; 49:101332. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101332
16. Kreuzer T., Papapetrou P., Zdravkovic J. Artificial intelligence in digital twins : a systematic literature review. *Data & Knowledge Engineering*. 2024; 151:102304. DOI: 10.1016/j.datak.2024.102304
17. Gorodnova N.V. Application of artificial intelligence and nanotechnology in the investment and construction sector in Russia. *Vestnik NSUEM*. 2021; 3:81-95. DOI: 10.34020/2073-6495-2021-3-081-095. EDN KWCGFR. (rus.).
18. Tereshko E.K., Rudskaia I.A. Digital potential of the construction complex: concept, essence and problems of development. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2020; 13(3):27-40. DOI: 10.18721/JE.13302. EDN QNGQIV. (rus.).
19. Young D., Panthi K., Noor O. Challenges involved in adopting BIM on the construction jobsite. *EPiC Series in Built Environment*. 2021. DOI: 10.29007/f8r3
20. Abioye S.O., Oyedele L.O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J.M.D., Bilal M. et al. Artificial intelligence in the construction industry : a review of present status, opportunities and future challenges. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44:103299. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103299
21. Delgado J.M.D., Oyedele L., Ajayi A., Akanbi L., Akinade O., Bilal M. et al. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*. 2019; 26:100868. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100868
22. Regona M., Yigitcanlar T., Xia B., Li R.Y.M. Artificial intelligent technologies for the construction industry: how are they perceived and utilized in Australia? *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2022; 8(1):16. DOI: 10.3390/joitmc8010016
23. Gorbova I.N., Avanesova R.R., Musaev M.M. Digital transformation of the Russian construction industry. *Bulletin of the Academy of Knowledge*. 2023; 2(55):46-51. EDN EDFXIZ. (rus.).
24. Kashevarova G.G. “Artificial intelligence” or “Logical discussion and reasonable solutions” in technical diagnostics of construction projects. *Academia. Architecture and Construction*. 2023; 4:166-180. DOI: 10.22337/2077-9038-2023-4-166-180. EDN SYDNNW. (rus.).
25. Chudaeva A.A., Baryshev D.V. Incorporation of digital technologies into construction: current situation and prospects. *Theory and Practice of Social Development*. 2023; 6(182):198-205. DOI: 10.24158/tpor.2023.6.25. EDN SXCDXC. (rus.).
26. Hunde B.R., Woldeyohannes A.D. Future prospects of computer-aided design (CAD) : a review from the perspective of artificial intelligence (AI), extended reality, and 3D printing. *Results in Engineering*. 2022; 14:100478. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100478
27. Oluleye B.I., Chan D.W., Antwi-Afari P. Adopting Artificial Intelligence for enhancing the implementation of systemic circularity in the construction industry : a critical review. *Sustainable Production and Consumption*. 2023; 35:509-524. DOI: 10.1016/j.spc.2022.12.002
28. Levin B.A., Piskunov A.A., Poliakov V.Yu., Savin A.V. Artificial intelligence in engineering education. *Higher Education in Russia*. 2022; 31(7):79-95. DOI: 10.31992/0869-3617-2022-31-7-79-95. EDN KCNAPJ. (rus.).
29. Hanafy N.O. Artificial intelligence’s effects on design process creativity: “A study on used A.I. Text-to-Image in architecture”. *Journal of Building Engineering*. 2023; 80:107999. DOI: 10.1016/j.jobe.2023.107999
30. Ko J., Ennemoser B., Yoo W., Yan W., Clayton M.J. Architectural spatial layout planning using artificial intelligence. *Automation in Construction*. 2023; 154:105019. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.105019

Received September 20, 2024.

Adopted in revised form on October 1, 2024.

Approved for publication on November 14, 2024.

BIOTNOTES: **Dmitrii V. Slepushkin** — postgraduate student; **Moscow Innovation University**; 10 Krasnobogatyrskaya st., Moscow, 107564, Russian Federation; SPIN-code: 4234-0485, ID RSCI: 1260200; dv737@mail.ru;

Dmitrii Yu. Burlov — Candidate of Economic Sciences, Associate Professor; **Moscow Financial and Industrial University “Synergy”**; 80 B, Leningradsky prospekt, Moscow, 125315, Russian Federation; SPIN-code: 3365-5590, ID RSCI: 282537, ORCID: 0009-0008-5269-635; budim2022@yandex.ru.

Contribution of the authors:

Dmitrii V. Slepushkin — idea, collection of material, processing of material, writing of the source text, final conclusions.

Dmitrii Yu. Burlov — scientific leadership, research concept.

The authors declare no conflict of interest.