

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 69.058

DOI 10.17513/snt.39763

**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ВИДОВ КОНТРОЛЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ И ПРОБЛЕМЫ ИХ РАЗВИТИЯ****Акулов А.О., Рада А.О., Кононова С.А.***ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», Кемерово,**e-mail: rada.ao@kemsu.ru*

Активно развивается внедрение цифровых технологий в сферу строительства для решения задач строительного контроля и в целом управления жизненным циклом объекта. Цель исследования – сравнить традиционные и цифровые технологии контроля строительства, определить наиболее перспективные ниши использования цифровых технологий для организации строительства и управления жизненным циклом. В ходе исследования проанализирован корпус зарубежных и отечественных публикаций. Установлено, что традиционный инструментальный строительный контроль связан с высокими затратами, субъективными ошибками, отличается сравнительно низкой скоростью. Поэтому перспективно внедрение цифровых технологий, в частности создание BIM-моделей как цифровых двойников строительных объектов. Показано, что опубликовано большое число исследований (преимущественно авторов из США и Китая), где рассматриваются научные основы и практика создания цифровых двойников. Обсуждаются достоинства, недостатки, сфера применения таких моделей. Цифровой двойник решает задачу не просто строительного контроля, но и информационной поддержки принятия решений на всем жизненном цикле объекта строительства. В то же время создание BIM-модели связано со значительными начальными затратами. Для построения цифровых моделей часто используется лазерное сканирование (наземное, мобильное, воздушное). Каждый из этих методов имеет определенные преимущества и может использоваться в определенной сфере. В частности, для контроля и управления дорожным хозяйством перспективно мобильное лазерное сканирование. Результаты исследования могут представлять интерес для исследователей и практиков, связанных с применением цифровых технологий в строительстве.

Ключевые слова: строительный контроль, цифровой двойник, BIM-модель, лазерное сканирование, дорожное хозяйство, трехмерная модель, облако точек, строительный объект

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2022-1195 от 30.09.2022, заключенное между Минобрнауки России и Федеральным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Кемеровский государственный университет».

**ANALYSIS OF MODERN TYPES OF CONTROL
OF CONSTRUCTION WORKS AND PROBLEMS OF THEIR DEVELOPMENT****Akulov A.O., Rada A.O., Kononova S.A.***Kemerovo State University, Kemerovo, e-mail: rada.ao@kemsu.ru*

The introduction of digital technologies in the construction industry is actively developing to solve the problems of construction control and, in general, manage the life cycle of an object. The purpose of the study is to compare traditional and digital construction control technologies, to identify the most promising niches for the use of digital technologies for construction organization and life cycle management. In the course of the study, a corpus of foreign and domestic publications was analyzed. It has been established that traditional instrumental construction control is associated with high costs, subjective errors, and is characterized by a relatively low speed. Therefore, the introduction of digital technologies is promising, in particular, the creation of BIM models as digital twins of construction projects. It is shown that a large number of studies have been published (mainly authors from the USA and China), which discuss the scientific foundations and practice of creating digital twins. The advantages, disadvantages, scope of such models are discussed. The digital twin solves the problem of not just construction control, but also information support for decision-making throughout the entire life cycle of a construction project. At the same time, the creation of a BIM model is associated with significant initial costs. To build digital models, laser scanning is often used (ground, mobile, and airborne). Each of these methods has certain advantages and can be used in a certain area. In particular, mobile laser scanning is promising for the control and management of the road sector. The results of the study may be of interest to researchers and practitioners associated with the use of digital technologies in construction.

Keywords: construction control, digital twin, BIM model, laser scanning, road facilities, 3D model, point cloud, building object

The work was carried out with the financial support of the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, agreement No. 075-15-2022-1195 dated September 30, 2022, concluded between the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation and the federal budgetary educational institution of higher education «Kemerovo State University».

Быстрый рост объемов строительных работ в российской экономике (на 40% только в 2017–2021 гг. [1, с. 78]), а также усложнение возводимых объектов [2, 3] обуславливают новые вызовы по научно-методическому обеспечению технологии и организации строительства, в том числе контролю работ, управлению жизненным циклом, включая эксплуатацию зданий и сооружений. Осуществление надежного и эффективного контроля подрядчика со стороны заказчика – важнейшая научно-техническая задача развития отрасли, поскольку строительный контроль выполняет такие функции, как проверка соблюдения сроков, полноты, качества, последовательности выполнения операций, обеспечение соответствия объектов требованиям законодательства и др. [4, 5].

Основными проблемами строительного контроля являются необходимость выделения значительных ресурсов (человеческих, временных, финансовых), зависимость от квалификации, мотивации, добросовестности исполнителей [6]. Вообще говоря, далеко не все заказчики имеют компетентных специалистов и адекватную материально-техническую базу для такого контроля. Кроме того, строительный контроль призван обеспечивать нормальную коммуникацию участников процесса, формируемая информационная база должна быть прозрачной и доступной, что далеко не всегда имеет место на практике [7]. Иными словами, человеческий фактор и громоздкость контроля создают риски расхождения строящихся объектов с проектными параметрами. Так, по словам главы ФБУ «Росстройконтроль» В. Щербинина, «одной из основных проблем при реализации строительных проектов является несоответствие документации реальной ситуации» [8]. Таким образом, нередки ситуации, когда запланировано одно, а в нарушение прав и законных интересов заказчика, потребителя, общества строится нечто другое.

Опыт использования цифровых технологий для решения самых различных научных и производственных задач свидетельствует, что использование беспилотной съемки, цифровых двойников, больших данных, дистанционного сканирования и зондирования объектов, искусственного интеллекта, нейронных сетей резко повышает результативность, эффективность, качество контроля, мониторинга, анализа объектов управления, делает их объективными, независимыми от человеческого фактора [9, 10]. В настоящее время активно развивается использование цифровых технологий в целях повышения скорости, качества, надежности строительного контроля, а также исклю-

чения злоупотреблений (отметим, что в современных реалиях получение службами контроля качества денег так же зависит от сроков сдачи объекта, как и у самих строителей). Однако их внедрение в сложную консервативную строительную отрасль связано с новыми трудностями, ограничениями. Поэтому цифровизация строительного контроля, несомненно, имеет значительные перспективы, однако не менее серьезной ошибкой были бы ее идеализация и спонтанное форсированное внедрение без учета отраслевых особенностей. Поэтому необходим объективный анализ преимуществ, достижений, ограничений, проблем использования цифровых технологий в строительном контроле по сравнению с традиционными.

Цель исследования – сравнить традиционные и цифровые технологии контроля строительства, определить наиболее перспективные ниши использования цифровых технологий для организации строительства и управления жизненным циклом.

Материалы и методы исследования

Исследование основано на библиографическом поиске и последующем критическом анализе научных публикаций, посвященных проблемам строительного контроля, в том числе с использованием цифровых технологий. Используются базы данных «Scopus» и «Российский индекс научного цитирования». Глубина поиска, учитывая динамику развития цифровых технологий, была ограничена в основном пятью годами, т.е. 2019–2023 гг., хотя по отдельным вопросам традиционного контроля целесообразно цитирование некоторых более ранних работ.

Результаты исследования и их обсуждение

Традиционный строительный контроль, как указывается в специальной литературе, основан на физическом выезде специалистов на строительную площадку, где они по преимуществу проводят различные инструментальные измерения (замеры), отборы проб для последующего анализа, а также те или иные испытания [11, 12]. Как правило, строительный контроль начинается с визуального осмотра, в ходе которого можно получить общее представление о ходе работ, обнаружить явные нарушения [13]. Затем чаще всего проводится оценка точности геометрических параметров объекта (прогибы, перемещения, соблюдение габаритов, положение элементов относительно осей и рисков и др.) с использованием нивелиров, прогибомеров, тахеометров [14]. Также необходимым элементом контроля является проверка качества материалов

и конструкций, в частности прочности бетона, его температуры, времени затвердевания. Для этого применяется ультразвуковое сканирование, сдавливание, оценка пластических деформаций и др. [15, 16]. Также контролируется ширина раскрытия трещин, чрезмерная величина которой оказывает негативное влияние на долговечность арматуры и конструкции в целом [17]. Наряду с этим может быть целесообразной проверка теплоизолирующих свойств стен, дверей, окон путем тепловизионной съемки, оценка уровня звукоизоляции строения [18].

Теоретико-методические основы традиционного строительного контроля достаточно хорошо разработаны и, более того, закреплены в различных стандартах и методических рекомендациях. Однако традиционная парадигма строительного контроля, как частично отмечалось ранее, предполагает непосредственное присутствие специалистов на месте и сверку результатов работ с проектом в ручном режиме, составление технических отчетов по результатам. При этом возникает проблема высоких трудозатрат (тем более острая, что нормы финансирования работ по контролю в зависимости от сметной стоимости в России намного ниже мирового уровня), накопления больших объемов информации в аналоговых форматах, которые затруднительно хранить и обрабатывать. В результате страдает полнота и точность данных, не обеспечивается прозрачность полученной информации, возникает объективный конфликт отношений заказчика, контролера и подрядчика. Эти проблемы активно обсуждаются в работах российских специалистов по строительному контролю [19–21]. Даже переход таких традиционных инструментальных средств, как склерометры или нивелиры, на электронный формат получения и обработки данных не решает соотвествующих проблем.

Это обуславливает внедрение в процессы строительного контроля цифровых технологий, которые позволяют снизить влияние названных ограничений. В настоящее время существует ряд работ по цифровизации строительного контроля. Чаще всего рассматривается технология информационного моделирования зданий (от англ. Building Information Modeling, BIM) [22, 23]. По данным [24], мировой рынок информационного моделирования зданий в 2022 г. составил 6,4 млрд долл. США, а в 2032 г. он возрастет до 20,0 млрд долл. США. Согласно данным обзора [25], технология BIM не просто позволяет обеспечить устойчивое развитие отрасли на основе инноваций, но и организовать ее работу в рамках современных трендов цифровизации, интеграции

в системы больших данных, единых информационных баз. BIM значительно шире, чем просто строительный контроль, поскольку охватывает все этапы жизненного цикла объекта. Ее данные пополняют и используют все стейкхолдеры процесса [26]. Добавим, что в ряде стран создание BIM-моделей де-факто или де-юре уже обязательно, в России с 2021 г. введена норма о наличии информационных моделей объектов, возводимых за счет бюджетной системы [27]. Вместе с тем известны и иные технологии, способствующие созданию цифрового двойника строительного объекта, повышению эффективности контроля, снижению затрат, например дополненная реальность [28].

К основным цифровым технологиям строительства принято относить в настоящее время, наряду с BIM, дополненную и виртуальную реальность (AR/VR), лазерное сканирование, робототехнику, 3D-печать, сборные конструкции и платформы, аналитическое программное обеспечение, блокчейн, Интернет вещей, решения для машинного обучения [29, 30]. Разные сферы применения цифровых технологий в строительстве изучены в различной степени. Так, согласно [31], чаще всего изучаются вопросы поиска дефектов качества бетона, арматуры, а также отклонения геометрических параметров. Для обнаружения трещин относительно широко применяются компьютерное зрение, лазерное сканирование, съемку в инфракрасном спектре. При оценке правильности геометрических параметров и регистрации данных в BIM задействуют уже упомянутые модели дополненной реальности. В еще одном обзоре отмечается роль цифровых технологий в автоматизации строительства как отрасли, а также большое внимание исследователей к фотограмметрии и лазерному сканированию как средствам получения данных [32].

«Твердым ядром» представлений о цифровой модели строительного объекта следует считать положения о создании его «цифрового двойника» (основой такого двойника как раз и является BIM). Хотя строительство отстает от многих других отраслей в этой сфере, постепенно исследования такого рода появляются, в них достаточно часто упоминается съемка с беспилотных воздушных судов (БВС) как источник информации для двойника [33]. В целом к наиболее распространенным способам формирования информационного массива по объекту строительства относят лазерное сканирование, данные геоинформационных систем, компьютерное зрение, умные сенсоры, Интернет вещей, идентификацию по RFID-меткам и др. [34].

В [35] обсуждается построение BIM-модели здания на основе информации относительно размеров, формы объекта, проектной конфигурации, взаимосвязи элементов в соответствующей программной среде. Это позволяет всем участникам процесса работать с моделью, что дает возможность вести мониторинг, немедленно предпринимать корректирующие действия при наличии отклонений. В работе [36] представлена конкретная пятиуровневая архитектура такой BIM-модели, включающая базовый слой (информационно-аппаратный), собственно модель (базовый проект, сведения о ходе строительства, отклонениях), уровень, где данные обрабатываются, а также средства предоставления доступа пользователям. Применение данной модели позволило повысить эффективность строительства крупных тоннелей в Китайской Народной Республике. Наряду с эффективностью исследователи отмечают такое преимущество BIM (как и дополненной реальности), как повышение безопасности на строительной площадке [37]. В [38] также обсуждается роль цифровых технологий и информационных моделей для интеграции строительства в модель устойчивого развития, максимально продуктивного использования ограниченных ресурсов. Следующим этапом развития цифровизации строительства может стать внедрение искусственного интеллекта в процесс принятия рациональных решений [39]. В таблице обобщены преимущества и ограничения применения BIM-модели в современном строительстве.

Один из центральных вопросов построения цифровых моделей объектов строительства (трехмерных) – рациональные средства и методы сбора, обработки, ис-

пользования информации, обладающие необходимым уровнем точности, скорости, приемлемой стоимостью [40]. Перспективной технологией видится лазерное сканирование, поскольку оно имеет низкую себестоимость, высокую скорость, дает возможность создавать точные цифровые копии, в том числе на сложных поверхностях и малодоступных участках. Технология лазерного сканирования, как известно, базируется на учете направления отраженного от изучаемой поверхности лазерного луча и времени такого отражения, в результате чего формируется 3D-модель в виде облака точек [41]. В современной практике находят применение несколько методов лазерного сканирования:

1. Наземное лазерное сканирование ведется с использованием наземных трехмерных сканеров, создающих плотные облака точек с достаточно высокой точностью и скоростью съемки (миллионы точек в минуту). Они содержат данные о цвете, интенсивности излучения [42]. К достоинствам данной технологии относятся большая точность и детализация данных съемки, высокая скорость, возможность проведения съемок внутри помещений. С ее помощью удобно вести съемку труднодоступных поверхностей на расстоянии. Ограничениями наземного лазерного сканирования являются зависимость от погодных условий, невозможность сканирования поверхностей с высокой гладкостью (например, стекол). Кроме того, по такой технологии возможна съемка только тех объектов, которые находятся в прямой видимости, а результаты съемки должны подвергаться дополнительной привязке к геодезическим координатам [43].

Преимущества и ограничения BIM-моделей для управления строительством

Преимущества	Ограничения
<p>Возможность сквозного контроля и управления на всех этапах жизненного цикла.</p> <p>Включение в единую модель всей значимой для принятия решений информации (техническое состояние, геометрические характеристики элементов и др.).</p> <p>Ускорение процессов проектирования и контроля.</p> <p>Сокращение субъективных ошибок, обусловленных человеческим фактором.</p> <p>Интеграция модулей и блоков, созданных в разных программных продуктах для строительного проектирования.</p> <p>Модель является трехмерной, а также динамичной во времени, что по сравнению с плоскостными чертежами, выполненными на определенный момент времени (четвертое измерение – 4D), повышает качество информационного обеспечения.</p> <p>Использование открытых стандартов обмена информацией</p>	<p>BIM-модель хорошо подходит для визуализации объекта, построения архитектурных форм, но менее удобна для конкретных конструктивных и инженерных расчетов.</p> <p>При переходе на BIM-модель могут быть утрачены устоявшиеся рабочие практики, методы и инструменты.</p> <p>Попадание в зависимость от поставщика программного обеспечения для построения BIM-модели.</p> <p>Высокие первоначальные затраты времени на создание BIM-модели</p>

2. Мобильное лазерное сканирование отличается тем, что сканер располагается на каком-либо носителе (автомобиль, моторная лодка), съемка ведется в процессе движения. Существующие технические средства позволяют проводить сканирование при скорости до 90–100 км/ч. Данный метод используется преимущественно при исследовании и контроле линейных (и реже – площадных) объектов, таких как дороги, мосты, трубопроводы, линии тепловых сетей, электропередач. Он имеет несколько больший интервал между точками – от 1 до 10 см [44], что ограничивает его применение на отдельных строительных объектах. Но эта же особенность является преимуществом при съемках в масштабах городов, районов, а также на больших расстояниях. Поскольку большинство искусственных поверхностей имеют геометрически правильную форму, мобильное лазерное сканирование хорошо выявляет деформации, свидетельствующие о нарушениях. Так, в [45] описывается успешное применение мобильного лазерного сканирования для мониторинга деформации анкерных подпорных конструкций на дорогах общего пользования, где по плотному облаку точек рассчитываются участки с нарушениями, требующими внимания.

3. Воздушное лазерное сканирование, как видно из названия, предполагает съемку с летательного аппарата, в современных условиях чаще всего с БВС. Обычно одновременно проводится аэрофотосъемка, что позволяет построить цифровой ортофотоплан местности (пример применения такой технологии для принятия решений в сфере объектов недвижимости приведен в [9]). Воздушное лазерное сканирование также предназначено для работы с большими площадями и протяженными линейными объектами, хотя в [46] демонстрируется возможность использования БВС для дистанционного бесконтактного строительного контроля. Сравнение результатов воздушного и мобильного сканирования в [47] показало хорошую сходимость данных. Как известно, съемка с БВС широко используется для получения цифровых двойников зданий, сооружений, районов, городов, поэтому нередко лазерное сканирование совмещается с установлением геодезических координат. Это позволяет реализовать масштабные проекты построения «цифровых двойников» городов [48]. Преимуществом воздушной съемки в определенных условиях может стать исключение рисков для оператора при проведении работ в опасных зонах [49]. Однако в ситуации административных запретов

и ограничений на полеты БВС, введенных в значительном количестве регионов России, мобильное лазерное сканирование может стать методом выбора.

По нашему мнению, каждый из рассмотренных методов имеет свою нишу, где является наиболее продуктивным. В частности, для выполнения строительного контроля непосредственно на каком-либо здании, сооружении перспективно наземное сканирование, для проведения инженерно-исследовательских работ – воздушное. Для таких объектов, как дороги, наилучшим образом подходит мобильное сканирование с его высокой производительностью и возможностью мониторинга не только на этапе контроля, но и в период действия гарантийных обязательств, т.е. на протяжении разных этапов жизненного цикла.

Заключение

Проведенный обзор показывает, что вследствие объективных недостатков традиционного ручного инструментального строительного контроля в отрасль постепенно интегрируются цифровые технологии, в частности создание цифровых двойников. Они решают масштабные управленческие задачи на всех стадиях жизненного цикла, наиболее признанной и распространенной технологией является BIM-модель. Уже существуют кейсы успешного ее применения, хотя данная модель имеет не только преимущества, но и определенные ограничения. Для построения BIM-модели большую роль играют методы сбора информации, в частности лазерное сканирование. В работе показано, что каждый из видов сканирования (наземное, мобильное, воздушное) имеет определенные конкурентные преимущества. Так, для контроля дорожного строительства в период гарантийных сроков, принятия решений о ремонте в будущем хорошо подходит наземное мобильное сканирование, хорошо выявляющее деформации гладких поверхностей. Данная технология перспективна для использования в рамках реализации нацпроекта «Безопасные и качественные дороги».

Список литературы

1. Копылов И.А. Строительство в России 2021: отраслевой оптимизм. Часть 2 // Технологии бетонов. 2021. № 3. С. 78–80.
2. Лемешко М.В. Тенденции развития промышленного строительства в России на современном этапе // Экономика строительства. 2023. № 3. С. 21–27.
3. Jadhav O., Minde P., Yadhav A., Gaidhankar D. A review of emerging trends & advances in construction technology in the Indian scenario // Materials Today: Proceedings. 2023. Vol. 77, Is. 3. P. 897–904.

4. Олейник П.П., Улитина А.Д. Строительный контроль как стратегия повышения качества зданий и сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 4. С. 22–27.
5. Dennehy G., Kennedy B., Spillane J. Building control (amendment) regulations 2014: integration and compliance in large Irish construction organizations // International Journal of Building Pathology and Adaptation. 2023. Vol. 41, Is. 1. P. 225–237.
6. Кузьмина Т.К., Бабушкина Д.Д., Волков Р.В., Коблюк Д.А. Усовершенствование системы строительного контроля при производстве строительно-монтажных работ // Строительное производство. 2022. № 4. С. 24–29.
7. Макаров А.Н. Априорные риски строительных процессов в системе контроля качества // Строительное производство. 2022. № 4. С. 29–33.
8. Стройконтроль назвал одной из основных проблем несоответствие документов реальной ситуации // Интерфакс-Недвижимость. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://realty.interfax.ru/news/articles/130930> (дата обращения: 10.06.2023).
9. Rada A.O., Kuznetsov A.D. Digital inventory of agricultural land plots in the Kemerovo Region // Foods and Agricultural Materials. 2022. Vol. 10, Is. 2. P. 206–215.
10. Спивак И.Е., Столярова Т.А., Завьялова С.Е., Лысенко А.А. Информационные и цифровые технологии в промышленности и строительстве // Строительство и недвижимость. 2022. № 2. С. 149–154.
11. Zhang X. Research on methods to increase the effectiveness of construction site management // World Constructions. 2017. Vol. 6, Is. 3. DOI: 10.18686/wc.v6i3.106.
12. Araszkiwicz K., Bochenek M. Control of construction projects using the Earned Value Method – case study // Open Engineering. 2019. Vol. 9, Is. 1. P. 186–195.
13. Цопа Н.В., Карпушкин А.С., Горин А.К. Исследования теоретических и методических особенностей процедуры проведения строительного контроля // Экономика строительства и природопользования. 2019. № 4. С. 91–101.
14. Попов Е.В., Раскаткина О.В. Использование фотоизображений с целью определения геометрических параметров крупногабаритных объектов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Т. 19, № 3. С. 45–54.
15. Коревицкая М.Г., Бруссер М.И., Кузеванов Д.В., Анцибор А.В. Актуализация правил контроля и оценки прочности бетона по ГОСТ 18105 // Строительные материалы. 2018. № 8. С. 66–68.
16. Подмазова С.А., Глушкова М.В. О необходимости входного контроля бетона на стройплощадке // Вестник НИЦ «Строительство». 2019. Т. 22, № 3. С. 85–89.
17. Герасимов Е.П. О нормировании надежности по раскрытию нормальных трещин изгибаемых железобетонных элементов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25, № 1. С. 142–151.
18. Крышов С.И. Проблемы звукоизоляции строящихся зданий // Жилищное строительство. 2017. № 6. С. 8–10.
19. Топчий Д.В. Организационно-технические решения по обеспечению качества строительно-монтажных работ на различных этапах жизненного цикла объекта строительства // Вестник Московского государственного строительного университета. 2023. Т. 18. Вып. 2. С. 283–292.
20. Логанина В.И. Оценка достоверности контроля качества строительных материалов // Вестник Пензенского государственного университета архитектуры и строительства. 2019. № 2. С. 22–31.
21. Штанько М.А., Весова Л.М. Проблемы операционного контроля качества строительно-монтажных работ // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса: материалы международной научно-практической конференции. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет. 2022. С. 142–145.
22. Chen Y., Wang X., Liu Z., Cui J., Osmani M., Demian P. Exploring Building Information Modeling (BIM) and Internet of things (IoT) integration for sustainable building // Buildings. 2023. Vol. 13, Is. 2. No. 288. DOI: 10.3390/buildings13020288.
23. Fargnoli M., Lombardi M. Building Information Modelling (BIM) to enhance occupational safety in construction activities: research trends emerging from one decade of studies // Buildings. 2020. Vol. 10, Is. 6. Article no. 98. DOI: 10.3390/buildings10060098.
24. Building Information Modelling Market Outlook (2022–2032) // Fact.MR. [Electronic resource]. URL: <https://www.factmr.com/report/4658/building-information-modeling-market> (date of access: 10.06.2023).
25. Ferdosi H., Abbasianjahromi H., Banihashemi S., Ravanshadnia M. BIM applications in sustainable construction: scientometric and state-of-the-art review // International Journal of Construction Management. 2023. Vol. 23, Is. 12. P. 1969–1981.
26. Xu X., Mumford T., Zou P. Life-cycle building information modelling (BIM) engaged framework for improving building energy performance // Energy and Buildings. 2021. Vol. 231. Article no. 110496. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110496.
27. Постановление Правительства РФ от 05.03.2021 № 331 «Об установлении случая, при котором застройщиком, техническим заказчиком, лицом, обеспечивающим или осуществляющим подготовку обоснования инвестиций, и (или) лицом, ответственным за эксплуатацию объекта капитального строительства, обеспечиваются формирование и ведение информационной модели объекта капитального строительства» (в ред. от 20.12.2022 г. № 2357). [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/400424628/> (дата обращения: 15.06.2023).
28. Nassereddine H., Hanna A.S., Veeramani D., Lotfallah W. Augmented reality in the construction industry: use-cases, benefits, obstacles, and future trends // Frontiers in Built Environment. 2022. Vol. 8. No. 730094. DOI: 10.3389/fbuil.2022.730094.
29. Singh V. Digitalization, BIM ecosystem, and the future of built environment // Engineering Construction and Architectural Management. 2019. Vol. 17. P. 1–18.
30. Olanipekun A.O., Sutrisna M. Facilitating digital transformation in construction – A systematic review of the current state of the art // Frontiers in Built Environment. 2021. Vol. 7. No. 660758. DOI: 10.3389/fbuil.2021.660758.
31. Luo H., Lin L., Chen K., Antwi-Afari M.F., Chen L. Digital technology for quality management in construction: A review and future research directions // Developments in the Built Environment. 2022. Vol. 12. No. 100087. DOI: 10.1016/j.dibe.2022.100087.
32. Manzoor B., Othman I., Pomares J.C. Digital technologies in the architecture, engineering and construction (AEC) industry – A bibliometric-qualitative literature review of research activities // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18, Is. 11. No. 6135. DOI: 10.3390/ijerph18116135.
33. Su S., Zhong R.Y., Jiang Y. Digital twin and its applications in the construction industry: A state-of-art systematic review // Digital Twin. 2022. Vol. 2. No. 15. DOI: 10.12688/digitaltwin.17664.1.
34. Sacks R., Brilakis I., Pikas E., Xie H., Girolami M. Construction with digital twin information systems // Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1. No. E14. DOI: 10.1017/dce.2020.16.
35. Jiang Y. Intelligent building construction management based on BIM digital twin // Computational Intelligence and Neuroscience. 2021. Vol. 2021. Article ID 4979249. DOI: 10.1155/2021/4979249.
36. Liu N., Guo D., Song Z., Zhong S., Hu R. BIM-based digital platform and risk management system for mountain tunnel construction // Scientific Reports. 2023. Vol. 13. No. 7585. DOI: 10.1038/s41598-023-34525-w.

37. Afzal M., Shafiq M.T., Al Jassmi H. Improving construction safety with virtual-design construction technologies – A review // *Journal of Information Technology in Construction*. 2021. Vol. 26. P. 319–340.
38. Knippers J., Kropp C., Menges A., Sawodny O., Weiskopf D. Integrative computational design and construction: Rethinking architecture digitally // *Civil Engineering Design*. 2021. Vol. 3. P. 123–135.
39. Abioye S.O., Oyedele L.O., Akanbi L., Ajayi A., Delgado J.M., Bilal M., Akinade O.O., Ahmed A. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. No. 103299. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103299.
40. Baghalzadeh Shishehgharkhaneh M., Keivani A., Moehler R.C., Jelodari N., Roshdi Laleh S. Internet of Things (IoT), Building information modeling (BIM), and digital twin (DT) in construction industry: A review, bibliometric, and network analysis // *Buildings*. 2022. Vol. 12, Is. 10. No. 1503. DOI: 10.3390/buildings12101503.
41. Rashdi R., Martínez-Sánchez J., Arias P., Qiu Z. Scanning technologies to building information modelling: A review // *Infrastructures*. 2022. Vol. 7, Is. 4. No. 49. DOI: 10.3390/infrastructures7040049.
42. Aryan A., Bosché F., Tang P. Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 125. No. 103551. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103551.
43. Wu C., Yuan Y., Tang Y., Tian B. Application of terrestrial laser scanning (TLS) in the architecture, engineering and construction (AEC) industry // *Sensors*. 2022. Vol. 22, Is. 1. No. 265. DOI: 10.3390/s22010265.
44. Wang C., Wen C., Dai Y., Yu S., Liu M. Urban 3D modeling with mobile laser scanning: a review // *Virtual Reality & Intelligent Hardware*. 2020. Vol 2, Is. 3. P. 175–212.
45. Kalenjuk S., Lienhart W., Rebhan M.J. Processing of mobile laser scanning data for large-scale deformation monitoring of anchored retaining structures along highways // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2021. Vol. 36, Is. 6. P. 678–694.
46. Бузало Н.А., Кундрюцков Д.Н., Пономарев Р.Р. Применение беспилотных летательных аппаратов при обследовании зданий и сооружений // *Строительство и архитектура*. 2022. Т. 10. № 1. С. 6–10.
47. Siwiec J. Comparison of airborne laser scanning of low and high above ground level for selected infrastructure objects // *Journal of Applied Engineering Sciences*. 2018. Vol. 8, Is. 2. P. 89–96.
48. Tarsha Kurdi F., Awrangjeb M., Munir N. Automatic filtering and 2D modeling of airborne laser scanning building point cloud // *Transactions in GIS*. 2021. Vol. 25, Is. 1. P. 164–188.
49. Кучинская Г., Ставская М. Применение наземного лазерного сканирования в современных условиях // *ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021. № 1. С. 160–169.