

Применение технологий информационного моделирования в «зеленом» строительстве: обзор зарубежного опыта

Чжоу Шижу, Ш. Сяо, Л.И. Миронова, Н.И. Фомин, Чэнь Янян

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Аннотация: В статье представлен краткий обзор зарубежного опыта по применению технологий информационного моделирования (ТИМ) в «зеленом» строительстве. В работе выполнена наукометрическая оценка публикаций по теме ТИМ в «зелёном» строительстве. В результате обзора установлено, что в последнее время ТИМ находит все более широкое применение в области «зеленого» строительства, формируя новый этап эффективности использования ресурсов и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Показано, что развитие ТИМ не только оптимизирует процессы проектирования и строительства, но и позволяет оценить экологическую устойчивость здания в течение всего его жизненного цикла. Наряду с этим, применение ТИМ для «зеленого» строительства имеет ряд проблем и ограничений. К ним относятся несоответствие программного обеспечения ТИМ «зеленым» стандартам, ограниченное взаимодействие между приложениями ТИМ, нехватка профессиональных пользователей и высокие начальные инвестиции при внедрении технологии ТИМ

Ключевые слова: технологии информационного моделирования, «зеленое» строительство, устойчивое развитие, жизненный цикл здания, управление ресурсами, энергоэффективность и экологичность.

Введение

В современной строительной отрасли всё большее применение находят технологии информационного моделирования зданий (далее ТИМ). Такие технологии способствуют повышению эффективности использования материальных ресурсов, контролю времени и стоимости проектов [1-3], а также упрощает взаимодействие между участниками строительного процесса, обеспечивая совершенствование цепочек основных этапов жизненного цикла (далее ЖЦ) здания: проектирование, строительство и эксплуатация [4-5].

Значительный интерес исследователей по всему миру также вызывает концепция «зеленого» строительства, целью которой является минимизация воздействия на окружающую среду в ходе строительства и эксплуатации зданий и сооружений, экономия ресурсов (включая энергию) и создание

здоровых и комфортных условий жизни людей [6-7]. Такой подход к строительству основан на принципах устойчивого развития, обусловленных стремлением обеспечить баланс между потреблением природных ресурсов и их способностью к восстановлению. Благодаря высокой эффективности использования ресурсов, положительному влиянию на окружающую среду и долгосрочной экономической выгоде, такой способ организации производства востребован в строительной отрасли [8-9].

Для «зеленого» строительства применение ТИМ является мощным инструментом, предоставляя подробную и точную информацию на всех этапах ЖЦ, ТИМ обеспечивает достижение цели устойчивого развития национального строительного комплекса. В данной статье представлен обзор исследований по применению ТИМ в «зеленом» строительстве ряда стран.

Наукометрический анализ области исследования

В рамках проведенного исследования был использован поисковый запрос (((AK= (Green Building)) AND (AK=(BIM)) OR AK= (Building Information Modeling))) в базе научных публикаций «Web of Science Core Collection», который позволил получить 4133 результата. Среди обнаруженных публикаций оказались не только статьи в рецензируемых научных журналах, но также материалы конференций, сборники докладов и монографии. Полученные данные были импортированы в VOSviewer для анализа интенсивности совместного применения в исследованиях ключевых слов и построения наглядной графической модели (Рис. 1).

Графическая модель на Рис. 1 демонстрирует следующий тренд: в последние годы широкое распространение получили исследования, связанные с изучением ТИМ в контексте экологического строительства. Особенно высокий интерес вызывают темы, связанные с использованием виртуальной реальности, численного моделирования методом конечных элементов, поддержкой геоинформационных систем и технологии интернета

вещей. Отдельно следует отметить, что применение искусственного интеллекта в ТИМ и «зеленом» строительстве также является новым устойчивым исследовательским трендом.

Графическая модель результатов информационного поиска для выявления вовлеченности исследователей из разных стран по проблемам применения ТИМ в строительстве продемонстрировала следующее.

Китай, США, Великобритания и Австралия выделяются среди других стран как по количеству опубликованных результатов исследований, так и по интенсивности международного сотрудничества в этих публикациях (Рис. 2). При этом Китай демонстрирует относительно высокую интенсивность международного сотрудничества, по сравнению с другими странами, что подчеркивает важность и ценность исследовательского опыта Китая в области ТИМ и его внедрения в строительную практику других стран.

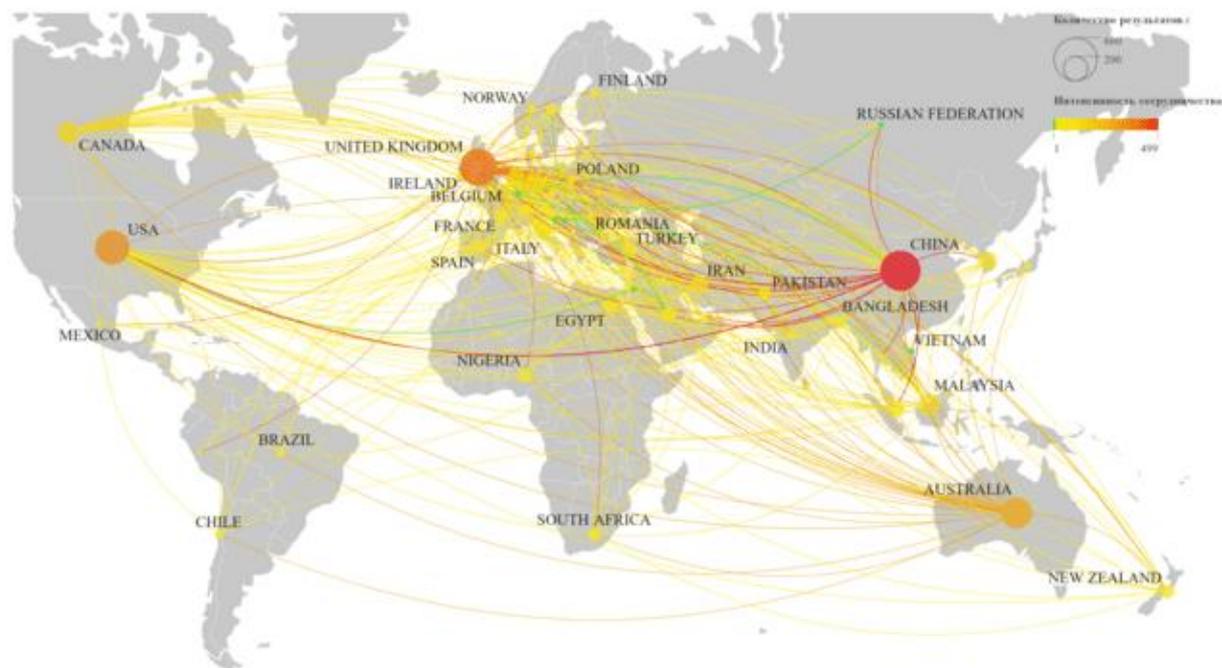


Рис. 2. Интенсивность международного сотрудничества в публикациях, посвященных ТИМ (графическая модель)

Практические возможности ТИМ в «зеленом» строительстве

В настоящее время достаточно много исследователей занимаются анализом возможностей применения ТИМ в «зеленом» строительстве.

Ansa и его коллеги выполнили обзор и систематизацию научных публикаций, посвященных применению ТИМ в контексте «зеленого» строительства, обнаружив ключевую роль ТИМ в анализе и оценке экологических зданий с использованием специализированных программных комплексов. Исследователи обстоятельно проанализировали статьи и программные комплексы, чтобы определить возможности инструментов ТИМ в обеспечении требований стандарта GBAS (китайский стандарт «зеленого» строительства) [10].

В исследовании *Lu* и его коллег выполнена оценка практической интеграции ТИМ с этапами проектирования, строительства и эксплуатации «зеленых» зданий на основе анализа научных публикаций и возможностей

инструментов ТИМ. Установлена связь между этапами инвестиционно-строительного проекта, экологическими требованиями и атрибутами ТИМ, при этом отмечено слабое взаимодействие между различными приложениями ТИМ и ограниченная поддержка некоторых инструментов ТИМ на этапах строительства и эксплуатации. Выявлена потребность в специальных отраслевых стандартах, регламентирующих практическое применение «зелёного» ТИМ [11].

В работе *Sao* и других исследователей проанализированы результаты применения ТИМ на этапе строительства «зеленых» зданий. Выявлены четыре основные области, в которых функции ТИМ могут существенно улучшить качество строительных проектов, оптимизировать взаимодействие участников инвестиционно-строительного цикла, а также способы хранения и управления данными на протяжении всего ЖЦ-объектов строительства [12].

В работе *Muller* и его коллег выполнен обстоятельный анализ взаимосвязей этапов ЖЦ современных «зеленых» зданий при помощи инструментов ТИМ. Установлено, что ТИМ имеет важное значение для управления этапами ЖЦ здания, вплоть до его рациональной утилизации [13].

Как показывают исследования в разных странах, применение ТИМ для «зеленого» строительства обеспечивает повышение уровня экологичности не только этапа строительства, но и эксплуатации здания. В исследовании *Farzad Jalaei* и *Ahmad Jrade* выполнена интеграция инструментов ТИМ и программ оценки энергопотребления для анализа требований систем сертификации «зеленых» зданий. Разработан способ, объединяющий возможности ТИМ и программ оценки энергопотребления с показателями сертификации «зеленых» зданий на ранних этапах проектирования. Такой

способ обеспечивает возможность сравнительной оценки проектных решений для их отбора по критериям энергоэффективности [14].

Quan и его коллеги использовали методы свёрточных нейронных сетей (CNN от англ. Convolutional Neural Network) для оценки применения ТИМ на этапе проектирования «зеленых» зданий. Из анализа этапов ЖЦ «зеленых» зданий, они выявили недостатки в существующих методах оценки эффективности ТИМ, после чего предложили модель на основе CNN. Эта модель предназначена для оценки эффективности использования ТИМ на разных этапах ЖЦ с учетом изменения показателей комплексной ценности (экономической, экологической, социальной, функциональной, физической, управленческой и ценности, обусловленной безопасностью здания) [15]. Предложенная модель была успешно апробирована, продемонстрирована возможность прогноза ценности с высокой точностью за счет применения ТИМ.

В исследовании *Mohammed* решается проблема отсутствия унифицированного метода для реализации принципов устойчивого развития строительства (включая проектирование и строительство) на этапах инвестиционно-строительного проекта, а также использования для этого возможностей ТИМ. Разработанная в ходе исследования модель применения ТИМ позволяет осуществлять управление инструментами ТИМ не только для обеспечения принципов устойчивости, но также требуемой производительности строительных процессов. Модель реализуется за счет комплексного учета требований и признаков принципов устойчивого развития строительства, каждый из которых связан с платформой ТИМ [16].

В исследовании, выполненном *Liu* и коллегами, также рассмотрен вариант интеграции ТИМ с принципами устойчивого развития, при этом сделан вывод о том, что рациональное применение ТИМ позволяет не только выйти за рамки анализа и управления строительными процессами, но и

обеспечить возможность оценки влияния строительного объекта на окружающую среду [17].

Ahuja и его коллеги провели сравнительный анализ ТИМ и принципов бережливого (lean) и «зеленого» строительства, исследуя взаимосвязи между различными функциями ТИМ и их влиянием на результаты проектирования и строительства по критериям эффективности и сокращения различных потерь (принцип бережливого строительства) и экологической устойчивости. В результате исследования 16 объектов было выделено четыре ключевые функции ТИМ:

- моделирование систем MEP, от англ. mechanical / electrical / plumbing (вентиляция / электроснабжение / водоснабжение и канализация);
- анализ энергопотребления и воздействия на окружающую среду;
- анализ возможности строительства;
- анализ строительных конструкций [18].

В контексте нарастающих глобальных и местных экологических проблем Малайзии *Zulkefli* и его коллеги исследовали потенциал улучшения экологической эффективности существующих зданий путём интеграции ТИМ с практиками, реализующими принципы устойчивого развития, исходя из особенностей строительной отрасли Малайзии. Выполненный обзор применения ТИМ и анализ достигнутой устойчивости малазийского строительного комплекса (включая государственные инициативы по реформированию строительной отрасли) позволили выявить ключевые области, в которых применение ТИМ позволяет повысить экологическую эффективность эксплуатируемых зданий [19].

Udding и другие исследователи проанализировали практику применения ТИМ на территории Пондишери (Индия), в сочетании с анализом особенностей местных строительных материалов для оценки возможностей «зеленого» строительства. Сделан вывод о важной роли ТИМ

для проектирования конструкций из местных строительных материалов, обеспечивающих снижение углеродного следа [20].

С учетом вышеизложенного, можно резюмировать, что ТИМ повышают качество проектов «зеленого» строительства. Причем обеспечение качества проектных решений возможно даже на этапах предварительного проекта, благодаря информационной насыщенности цифровых моделей, а также комбинации сведений из различных областей строительного проектирования: землеустройство, архитектура и т. д. [21]. Отдельно следует отметить, что использование ТИМ позволяет осуществлять качественный строительный контроль строящегося объекта, на основе анализа и изменения цифровой модели объекта на этапах ЖЦ [22].

Guo и другие исследователи, сочетая ТИМ с анализом требований «зеленого» строительства, разработали систему на платформе ТИМ для быстрой оценки «зеленых» зданий. Методика оценки включает пять компонентов: несущий остов, внешнюю оболочку, системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, освещение и технологическое оборудование, а также дополнительные функции. Апробация метода продемонстрировала его эффективность [23].

Huang и его коллеги изучили перспективы применения ТИМ в развитии «зеленого» строительства. С помощью экспертной оценки установлено, что ТИМ вносит значительный вклад в улучшение качества строительства «зеленых» зданий. Выявлен потенциал ТИМ для повышения качества проектных решений, детализировки рабочих чертежей [24].

Raouf с коллегами использовали метод функционального моделирования для оценки качества деятельности участников ЖЦ здания. В результате исследования определены факторы, определяющие качество различных процессов ЖЦ [25].

Согласно статистическим данным, полученных от *Noor* и других исследователей, ТИМ обеспечивает лучшую визуализацию, в сравнении с традиционной технологией CAD (от англ. Computer-assisted design), а также позволяет более технологично совершенствовать качество проектных решений [26]. Согласно статистической информации, использование ТИМ в большей степени ориентировано на выполнение требований стандартов «зеленого» строительства. Так, используя ТИМ, возможно оценивать потребление энергии и других ресурсов в период строительства и достаточно точно прогнозировать энергоэффективность здания на этапе его эксплуатации [27][28][29].

Кроме того, технология ТИМ обладает возможностями к проектированию реконструкции здания, связанной с существенным повышением его экологичности. В исследовании *Guo* и его коллег раскрыты инструментальные возможности ТИМ, на примере, реализованном инструментами ТИМ, показано повышение «экологической производительности» реконструированного здания на 31,5 % [23].

Als и его коллеги представили модель использования ТИМ для повышения производительности процесса проектирования. Такая модель позволяет проектировщикам разрабатывать множество вариантов проектных решений и оценивать их экологическую эффективность. Предложенный подход к проектированию обеспечивает решение задачи многоцелевой оптимизации в проектировании [30].

Zhuang и другие исследователи также разработали модель решения задачи интегрирования и обработки данных на протяжении всего ЖЦ здания для «зеленого» строительства [31].

В исследовании *Yuan* и его коллег была предложена модель, которая объединяет ТИМ, анализ стоимости этапов жизненного цикла и энергосбережения, анализ стоимости для оценки и оптимизации

ограждающих конструкций «зеленых» зданий. Модель позволяет определить проектную стратегию для достижения баланса между энергоэффективностью объекта и затратами на реализацию этапов его ЖЦ [32].

В исследовании *Zhaou* его коллег была предложена основанная на ТИМ модель для оптимизации показателей энергосбережения здания, включая углеродный след от его эксплуатации. Исследователи применили усовершенствованный генетический алгоритм для достижения баланса между углеродным следом эксплуатации здания, показателями энергосбережения и освещением. Апробация модели показала, что показатели энергоэффективности здания могут быть улучшены, при этом снижаются затраты на его освещение [33].

В исследовании *El-Diraby* и его коллег было предложено использование онлайн-системы Green 2.0 с использованием передовых инструментов ТИМ и инструментов моделирования энергоэффективности и методов анализа социальных сетей для управления процессами ЖЦ. Система извлекает информацию из пользовательских взаимодействий и визуализирует ее, что позволяет непрерывно изменять цифровую модель здания и улучшать процесс управления им [34].

Заключение

В последние годы ТИМ находит все более широкое применение в области «зеленого» строительства, формируя новый этап эффективности использования ресурсов и минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Развитие ТИМ не только оптимизирует процессы проектирования и строительства, но и позволяет оценить экологическую устойчивость здания в течение всего его ЖЦ.

Важными преимуществами ТИМ в «зеленом» строительстве является повышение качества взаимодействия между участниками ЖЦ. Благодаря глубокой интеграции ТИМ с различными программными продуктами оценки

у проектировщиков появляется возможность комплексного учета экологических и энергосберегающих требований в проектных решениях.

Вместе с этим, применение ТИМ для «зеленого» строительства имеет ряд проблем и ограничений. К ним относятся несоответствие программного обеспечения ТИМ «зеленым» стандартам, ограниченное взаимодействие между приложениями ТИМ, нехватка профессиональных пользователей и высокие начальные инвестиции при внедрении технологии ТИМ. В настоящее время существует необходимость в разработке и стандартизации процедур ТИМ для их масштабного внедрения в практику «зеленого строительства, требуются совместные усилия научного и отраслевого сообщества.

В целом, ТИМ является мощным инструментом для достижения целей «зеленого» строительства, а его технологическое развитие и интеграция в практику способствует повышению качества и устойчивости строительных объектов, ускоряя переход строительной отрасли к устойчивому развитию.

Литература

1. Li J. et al. A Project-Based Quantification of BIM Benefits // International Journal of Advanced Robotic Systems. SAGE Publications, 2014. Vol. 11, № 8. P. 123.
2. Bryde D., Broquetas M., Volm J.M. The project benefits of Building Information Modelling (BIM) // International Journal of Project Management. 2013. Vol. 31, № 7. pp. 971–980.
3. Mesároš P., Mandičák T., Behúnová A. Use of BIM technology and impact on productivity in construction project management // Wireless Netw. 2022. Vol. 28, № 2. pp. 855–862.
4. Крюков К.М., Кулешов А.А. Методология экономического обоснования применения технологии информационного моделирования // Инженерный вестник Дона, 2020. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6608



5. Фомин В.О., Баржанов А.Б, Бреус Н.Л. Совершенствование метода определения предполагаемой (предельной) стоимости строительства // Инженерный вестник Дона, 2022. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7778
 6. Zuo J., Zhao Z.-Y. Green building research—current status and future agenda: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 30. pp. 271–281.
 7. Dwaikat L.N., Ali K.N. The economic benefits of a green building – Evidence from Malaysia // Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 18. pp. 448–453.
 8. Ries R. et al. The Economic Benefits of Green Buildings: A Comprehensive Case Study // The Engineering Economist. Taylor & Francis, 2006. Vol. 51, № 3. pp. 259–295.
 9. Zhao C., Liu M., Wang K. Monetary valuation of the environmental benefits of green building: A case study of China // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 365. P. 132704.
 10. Ansah M.K. et al. A review and outlook for integrated BIM application in green building assessment // Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 48. P. 101576.
 11. Lu Y. et al. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions // Automation in Construction. 2017. Vol. 83. pp. 134–148.
 12. Cao Y., Kamaruzzaman S.N., Aziz N.M. Green Building Construction: A Systematic Review of BIM Utilization: 8 // Buildings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 12, № 8. P. 1205.
 13. Muller M.F. et al. A systematic literature review of interoperability in the green Building Information Modeling lifecycle // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 223. pp. 397–412.
-



14. Jalaei F., Jrade A. Integrating building information modeling (BIM) and energy analysis tools with green building certification system to conceptually design sustainable buildings. // J. Inf. Technol. Constr. Citeseer, 2014. Vol. 19. pp. 494–519.
 15. Wen Q. et al. Assessing the Effectiveness of Building Information Modeling in Developing Green Buildings from a Lifecycle Perspective: 23 // Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 12, № 23. P. 9988.
 16. Mohammed A.B. Applying BIM to achieve sustainability throughout a building life cycle towards a sustainable BIM model // International Journal of Construction Management. Taylor & Francis, 2022. Vol. 22, № 2. pp. 148–165.
 17. Liu Z. et al. Transition from building information modeling (BIM) to integrated digital delivery (IDD) in sustainable building management: A knowledge discovery approach based review // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 291. P. 125223.
 18. Ahuja R., Sawhney A., Arif M. Driving lean and green project outcomes using BIM: A qualitative comparative analysis // International Journal of Sustainable Built Environment. 2017. Vol. 6, № 1. pp. 69–80.
 19. Zulkefli N.S., Mohd-Rahim F.A., Zainon N. Integrating Building Information Modelling (BIM) and Sustainability to Greening Existing Building: Potentials in Malaysian Construction Industry: 3 // International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology. 2020. Vol. 11, № 3. pp. 76–83.
 20. Uddin M.N. et al. Building information modeling (BIM) incorporated green building analysis: an application of local construction materials and sustainable practice in the built environment // J Build Rehabil. 2021. Vol. 6, № 1. P. 13.
-

21. Abanda F.H., Tah J.H.M., Cheung F.K.T. BIM in off-site manufacturing for buildings // *Journal of Building Engineering*. 2017. Vol. 14. pp. 89–102.
 22. Zhao X. A scientometric review of global BIM research: Analysis and visualization // *Automation in Construction*. 2017. Vol. 80. pp. 37–47.
 23. Guo K. et al. BIM-based green building evaluation and optimization: A case study // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 320. P. 128824.
 24. Huang B. et al. Contribution and obstacle analysis of applying BIM in promoting green buildings // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 278. P. 123946.
 25. Raouf A.M., Al-Ghamdi S.G. Framework to evaluate quality performance of green building delivery: construction and operational stage // *International Journal of Construction Management*. Taylor & Francis, 2023. Vol. 23, № 2. pp. 253–267.
 26. Mohd Noor S.N.A., Junaidi S., Ramly M.K.A. Adoption of building information modelling (bim): factors contribution and benefits // *International Conference On Global Business and Social Sciences (ICGBSS 2018)* At: The Everly Putrajaya Malaysia. URL: researchgate.net/publication/328737140_ADOPTION_OF_BUILDING_INFORMATION_MODELLING_BIM_FACTORS_CONTRIBUTION_AND_BENEFITS
 27. Carvalho J.P. et al. Integrating BIM-Based LCA and Building Sustainability Assessment: 18 // *Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2020. Vol. 12, № 18. P. 7468.
 28. Veselka J. et al. Recommendations for Developing a BIM for the Purpose of LCA in Green Building Certifications: 15 // *Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2020. Vol. 12, № 15. P. 6151.
-

29. Röck M. et al. LCA and BIM: Visualization of environmental potentials in building construction at early design stages // *Building and Environment*. 2018. Vol. 140. pp. 153–161.
30. Rahmani Asl M. et al. BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization // *Energy and Buildings*. 2015. Vol. 108. pp. 401–412.
31. Zhuang D. et al. A performance data integrated BIM framework for building life-cycle energy efficiency and environmental optimization design // *Automation in Construction*. 2021. Vol. 127. P. 103712.
32. Yuan Z. et al. BIM-VE-Based Optimization of Green Building Envelope from the Perspective of both Energy Saving and Life Cycle Cost: 19 // *Sustainability*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 12, № 19. P. 7862.
33. Zhao L., Zhang W., Wang W. BIM-Based Multi-Objective Optimization of Low-Carbon and Energy-Saving Buildings: 20 // *Sustainability*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 14, № 20. P. 13064.
34. El-Diraby T., Krijnen T., Papagelis M. BIM-based collaborative design and socio-technical analytics of green buildings // *Automation in Construction*. 2017. Vol. 82. pp. 59–74.

References

1. Li J. et al. SAGE Publications, 2014. Vol. 11, № 8. P. 123.
 2. Bryde D., Broquetas M., Volm J.M. *International Journal of Project Management*. 2013. Vol. 31, № 7. P. 971–980.
 3. Mesároš P., Mandičák T., Behúnová A. *Wireless Netw.* 2022. Vol. 28, № 2. P. 855–862.
 4. Kryukov K.M., Kuleshov A.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2020. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2020/6608
-



5. Fomin V.O., Barzhanov A.B, Breus N.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022. №7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2022/7778
 6. Zuo J., Zhao Z.-Y. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 30. pp. 271–281.
 7. Dwaikat L.N., Ali K.N. Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 18. pp. 448–453.
 8. Ries R. et al. The Engineering Economist. Taylor & Francis, 2006. Vol. 51, № 3. pp. 259–295.
 9. Zhao C., Liu M., Wang K. Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 365. P. 132704.
 10. Ansah M.K. et al. Sustainable Cities and Society. 2019. Vol. 48. P. 101576.
 11. Lu Y. et al. Automation in Construction. 2017. Vol. 83. pp. 134–148.
 12. Cao Y., Kamaruzzaman S.N., Aziz N.M. Buildings. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 12, № 8. P. 1205.
 13. Muller M.F. et al. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 223. pp. 397–412.
 14. Jalaei F., Jrade A. J. Inf. Technol. Constr. Citeseer, 2014. Vol. 19. pp. 494–519.
 15. Wen Q. et al. Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 12, № 23. P. 9988.
 16. Mohammed A.B. International Journal of Construction Management. Taylor & Francis, 2022. Vol. 22, № 2. pp. 148–165.
 17. Liu Z. et al. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 291. P. 125223.
 18. Ahuja R., Sawhney A., Arif M. International Journal of Sustainable Built Environment. 2017. Vol. 6, № 1. pp. 69–80.
 19. Zulkefli N.S., Mohd-Rahim F.A., Zainon N. International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology. 2020. Vol. 11, № 3. pp. 76–83.
-



20. Uddin M.N. et al. J Build Rehabil. 2021. Vol. 6, № 1. P. 13.
21. Abanda F.H., Tah J.H.M., Cheung F.K.T. Journal of Building Engineering. 2017. Vol. 14. pp. 89–102.
22. Zhao X. Automation in Construction. 2017. Vol. 80. pp. 37–47.
23. Guo K. et al. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 320. P. 128824.
24. Huang B. et al. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 278. P. 123946.
25. Raouf A.M., Al-Ghamdi S.G. International Journal of Construction Management. Taylor & Francis, 2023. Vol. 23, № 2. pp. 253–267.
26. Mohd Noor S.N.A., Junaidi S., Ramly M.K.A. International Conference On Global Business and Social Sciences (ICGBSS 2018) .At: The Everly Putrajaya Malaysia. URL: researchgate.net/publication/328737140_ADOPTION_OF_BUILDING_INFORMATION_MODELLING_BIM_FACTORS_CONTRIBUTION_AND_BENEFITS
27. Carvalho J.P. et al. Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 12, № 18. P. 7468.
28. Veselka J. et al. Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 12, № 15. P. 6151.
29. Röck M. et al. Building and Environment. 2018. Vol. 140. pp. 153–161.
30. Rahmani Asl M. et al. Energy and Buildings. 2015. Vol. 108. pp. 401–412.
31. Zhuang D. et al. Automation in Construction. 2021. Vol. 127. P. 103712.
32. Yuan Z. et al. Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 12, № 19. P. 7862.
33. Zhao L., Zhang W., Wang W. Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 14, № 20. P. 13064.
34. El-Diraby T., Krijnen T., Papagelis M. Automation in Construction. 2017. Vol. 82. pp. 59–74.

Дата поступления: 10.04.2024 Дата публикации: 11.07.2024
