

Управление точностью и скоростью процессов автоматизированного мониторинга строительных работ в условиях использования новых технологий

Артём Олегович Рада* , Александр Дмитриевич Кузнецов , Анатолий Олегович Акулов ,
Николай Юрьевич Коньков 

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: rada.ao@kemsu.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Существующие технологии автоматизированного строительного контроля не позволяют пользователю выбирать уровень детализации. В то же время в условиях применения нанотехнологий растет потребность в расширении возможностей мониторинга и контроля объектов строительства. Цель исследования – разработка, программная реализация и апробация технологии управления скоростью и точностью построения трехмерных моделей по плотным облакам точек для автоматизированного мониторинга строительных работ. **Материалы и методы.** Исследование базируется на методологии недровых данных, включая метод построения деревьев октантов. Используются беспилотное воздушное судно с лазерным воздушным сканером, наземный сканирующий тахеометр, специализированное программное обеспечение, в том числе разработанное при участии авторов веб-приложение «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу». **Результаты и обсуждение.** В ходе исследования разработана и получила программную реализацию технология, позволяющая пользователю выбирать необходимое соотношение между точностью, степенью детализации данных мониторинга и контроля строительных работ и затратами времени, потребностями в вычислительной мощности. Сравнению подлежат проект строительного объекта, представленный в виде информационной модели здания, и трехмерная модель реального объекта, полученная из плотного облака точек. Степень точности сравнения устанавливается путем выбора используемого уровня октодеревьев. По умолчанию в веб-приложении используется восьмой уровень. Однако на ранних этапах строительства, когда геометрические параметры плотного облака точек существенно отклоняются от проектных границ, можно использовать девятый, десятый и другие уровни. В этом случае повышается точность и степень детализации. Положительные и отрицательные отклонения визуализируются красным и синим цветами, соответственно, что позволяет пользователю вести мониторинг и контроль хода работ на объекте. **Выводы.** Разработанная технология может использоваться заказчиками и другими лицами, принимающими решения для контроля и мониторинга работ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нанотехнология, наноматериалы, мониторинг строительных работ, строительный контроль, цифровые технологии, информационная модель здания, лазерное сканирование, плотные облака точек.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, № соглашения 075-15-2022-1195 от 30.09.2022 г.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рада А.О., Кузнецов А.Д., Акулов А.О., Коньков Н.Ю. Управление точностью и скоростью процессов автоматизированного мониторинга строительных работ в условиях использования новых технологий // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15. № 6. С. 583–591. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-6-583-591>. – EDN: SWDELD.

ВВЕДЕНИЕ

В современном строительстве активно внедряются нанотехнологии, новые материалы с уникаль-

ными свойствами, новые способы физико-химической трансформации традиционных материалов. Это позволяет создавать здания и сооружения с уникальными характеристиками, существенно снижать

сроки работ, а также сокращать затраты на всех стадиях жизненного цикла объекта. Однако очевидно, что использование нанотехнологий связано с более высокими рисками, как и любая технологическая инновация вследствие отсутствия опыта и меньшей предсказуемости процессов. Поэтому использование нанотехнологий в строительстве требует развития возможностей автоматизированного мониторинга и контроля для оценки ситуации и принятия решений. Это может быть достигнуто только с использованием цифровых технологий.

Комплексная цифровизация процессов, оборудования, объектов управления, деятельности человека является важнейшим глобальным трендом технологического развития экономики [1, 2]. Хорошо известны и неоднократно описаны в литературе такие преимущества цифровых технологий (например, беспилотной техники, Интернета вещей, теплового, лазерного сканирования объектов и др.), как высокая скорость [3], большая точность [4], независимость от квалификации и добросовестности исполнителей [5], значительное повышение качества информационного обеспечения управленческих решений [6] и др.

Центральное место в процессе цифровизации различных отраслей материального производства занимает создание «цифровых двойников» объектов управления — моделей в информационной среде, практически полностью воспроизводящих реальность в режиме онлайн [7, 8]. Использование таких двойников для контроля, мониторинга ситуации не только дает лицам, принимающим решения, исчерпывающую информацию (которая ранее была недоступной), но и обеспечивает выбор оптимальных управленческих воздействий, рациональное планирование, возможность опережающих действий (не дожидаться явного проявления проблем) [9, 10].

Хотя строительную отрасль нередко характеризуют как «консервативную» [11], в нее достаточно активно проникают цифровые технологии. В обзоре [12] выделены основные направления цифровизации строительства, к которым отнесены информационное моделирование зданий с использованием BIM-моделей, дополненная и виртуальная реальность, лазерное сканирование, робототехника, трехмерная печать, Интернет вещей, специализированное программное обеспечение, цифровые двойники, блокчейн. В другой обзорной статье [13] рассматривается применение компьютерного зрения, Интернета вещей, BIM-моделей для управления качеством в строительстве и сокращения количества дефектов, обусловленных недостаточной квалификацией, низкой мотивацией персонала и другими причинами.

В обзоре работ по преимуществам цифровых технологий в строительстве выделены такие преимущества, как повышение качества визуализации, улучшение обмена данными между участниками, повышение производительности, сокращение строительных отходов [14]. В частности, при определенных условиях использование цифровых технологий может способствовать реализации ESG-повестки и росту устойчивости экономики строительства [15].

Внедрение цифровых технологий в строительство сталкивается с определенными проблемами, связанными с барьерами контроля и компетентности [16]. Отставание строительства от других видов экономической деятельности в цифровизации обусловило также медленные темпы роста производительности труда. Однако пандемия COVID-19 послужила мощным стимулом широкого повсеместного внедрения цифровых технологий [17]. Специалисты поддерживают мнение о том, что цифровизация становится «новой нормой» для строительной отрасли [18, 19]. Российские авторы также отмечают как важность внедрения цифровых технологий в строительство, так и проблемы, связанные с необходимостью значительных инвестиций, дефицитом квалифицированных специалистов [20, 21, 22].

Одна из основных цифровых технологий, наиболее важных для развития строительства, — это создание и эксплуатация цифровых двойников строительных объектов в виде BIM-моделей. Опубликовано значительное число работ, где рассматривается использование BIM-моделей для проектирования зданий, сооружений, контроля строительных работ. Они считаются технологией, которая значительно ускоряет строительство, обеспечивает снижение затрат и высокий уровень качества выполнения работ в соответствии с проектом [23]. Рынок строительного информационного моделирования оценивается в 7,9 млрд. долл. США в 2023 г. с перспективой роста до 15 млрд. долл. США в 2028 г.¹ Следует отметить, что в ряде стран мира уже достаточно давно использование BIM является обязательным при строительстве за счет средств государственного бюджета [24].

Для построения BIM-моделей используется информация о состоянии объекта строительства, полученная с использованием различных технологий — лазерное сканирование, Интернет вещей, тепловизионная съемка и др. [25], чтобы иметь полную и точную картину реального мира для принятия решений. Данные модели охватывают все стадии жизненного цикла зданий, включая планирование, проектирование, собственно строительство, эксплуатацию, утилизацию [26]. Важным преимуществом

¹ Building Information Modeling Market. 2028. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/building-information-modeling-market-95037387.html> (дата обращения 20.10.2023).

информационного моделирования зданий являются широкие возможности для визуализации, включая трехмерную визуализацию, а также точность измерений [27].

Эти особенности BIM-моделей позволяют решать широкий круг технических задач. Например, в [28] описана информационная модель медицинского комплекса, созданная с целью сокращения распространения внутрибольничных инфекций. Авторами исследования [29] рассматривается кейс использования BIM-модели для проектирования максимально энергоэффективных зданий, а также минимизации отходов.

Одна из основных проблем при разработке и эксплуатации BIM-модели — это рациональная организация сбора и обработки большого объема информации, характеризующей строительный объект. После завершения проектирования и начала строительных работ необходим постоянный мониторинг и контроль объекта строительства. В ограниченный промежуток времени в BIM-модель поступают большие объемы информации, которые необходимо обработать с приемлемой скоростью и точностью [30].

Данная информация затрагивает изменения геометрических параметров строящегося здания, сооружения, объем использованных для строительства материалов за определенные промежутки времени, на определенные даты, а также прочность конструкций, их теплопроводность и др. [31]. Достаточно часто для контроля и мониторинга строительных работ с использованием BIM-моделей применяют данные лазерного сканирования [32]. При использовании лазерных сканеров создаются плотные облака точек, которые затем с применением специального программного обеспечения преобразуются в трехмерные модели реального объекта строительства [33].

Такой подход к созданию цифровых двойников зданий уже можно считать классическим, традиционным. Однако он чаще всего применяется, как показывает анализ ряда научных работ, для одноразового построения цифровых моделей достаточно крупных объектов [34, 35]. Использование лазерного сканирования для оперативного автоматизированного мониторинга и контроля строительных работ обсуждается реже [36]. Это обусловлено тем, что существующие технологии не позволяют пользователям полноценно выбирать соотношение между качеством (точностью) построения модели с одной стороны и затратами на лазерное сканирование и обработку данных (временными и финансовыми издержками) — с другой стороны. В то же время в практических задачах целесообразно использовать разные уровни детализации информации, содержащейся в плотных облаках точек в зависимости от стадии строительства и других факторов.

Иными словами, целесообразно предоставить возможность пользователям самостоятельно определять уровень детализации и точности трехмерных моделей, построенных на основе плотных облаков точек, не ограничиваясь параметрами, заложенными в программное обеспечение «по умолчанию». Это расширит количество опций пользователей и даст возможность максимально продуктивно использовать вычислительную мощность имеющейся компьютерной техники. В соответствии со сказанным, цель исследования — разработка, программная реализация и апробация технологии управления скоростью и точностью построения трехмерных моделей по плотным облакам точек для автоматизированного мониторинга строительных работ.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При проведении исследования для воздушного и наземного лазерного сканирования объектов строительства применялись следующие технические средства:

1. Беспилотное воздушное судно (БВС) коммерческого класса «DJI Matrice Pro» производства Китайской Народной Республики, тип «гексакоптер», скорость полета — до 65 км/ч, максимальная взлетная масса — 15,5 кг, максимальная высота полета — 2,5 км, дальность связи — 5 км, наибольшая длительность полета — 18 мин, предназначено для эксплуатации при скорости ветра до 8 м/сек. БВС имеет бортовой приемник системы спутниковой навигации (GNSS-приемник).

2. Воздушный лазерный сканер, предназначенный для размещения на БВС марки «АГМ-МС3.200», производства Российской Федерации, частота сканирования — 600 кГц, максимальная дистанция сканирования — 150 м, обзор — 360 градусов, точность определения дальности — 3 см, точность определения координат — 5 см, вес — 1,3 кг.

3. Сканирующий тахеометр «Trimble SX10», производства Соединенных Штатов Америки, скорость сканирования до 26000 точек в секунду в диапазоне до 600 м, размер пучка лазерных лучей 14 мм на 100 м, безотражательный режим до 800 м, дальность измерений по призме до 5500 м, угловая точность 1", минимальное измеряемое расстояние 1 м.

Для обработки плотных облаков точек и построения трехмерных моделей использовалась программа «Credo Скан 3D» (разработчик — ООО «Компания «Кредо-Диалог»», Москва, Российская Федерация). Программная реализация авторских разработок осуществлялась в специализированном веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» (приложение разработано Институтом

цифры Кемеровского государственного университета с участием части авторов данного исследования²).

В исследовании использованы методология недвоичных деревьев данных, метод построения деревьев октантов. Объектами работ было несколько нежилых зданий и сооружений, строящихся в городе Кемерово (Кемеровская область, Кузбасс, Российская Федерация) в 2022–2023 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование включало в себя следующие этапы:

1. Получение данных лазерного сканирования по мере выполнения отдельных этапов строительства для сравнения с проектом, представленным в BIM-модели.
2. Построение октодеревьев для более быстрого поиска координат точек, полученных по результатам лазерного сканирования.
3. Поиск ближайшей отправной точки (референса) для расчета отклонений фактического состояния объекта строительства от планового состояния с помощью алгоритма поиска ближайших точек.
4. Расчет расстояний для каждой точки с последующей визуализацией результатов при помощи цветовой шкалы.

По результатам лазерного сканирования формируются плотные облака с миллиардами точек, поэтому для обработки, хранения и использования соответствующей информации нужны большие вычислительные мощности и (или) значительные временные затраты. Для их снижения может быть использована методология недвоичных деревьев данных, в частности, построение октодеревьев. Это дает возможность ускорить поиск координат каждой точки и группировок близко расположенных точек, снизить потребность в вычислительных мощностях и (или) сократить время проведения работ.

Восьмиричное октодерево предназначено для рекурсивного и регулярного разделения трехмерного пространства в форме куба на ограничивающей области. Каждый следующий уровень деления разделяет куб верхнего уровня (родительский) на 8 дочерних кубов (более низкого уровня). Таким образом, на первом уровне исходный куб (нулевой куб) делится на 8 дочерних кубов первого уровня (см. рис. 1). Затем кубы первого уровня делятся на 8 дочерних кубов второго уровня и т.д.

При этом количество кубов по уровням детализации растет в соответствии с такой пропорцией, когда на первом уровне детализация составляет $8^2 = 64$, на втором уровне — $8^3 = 512$ куба и т.д. По-

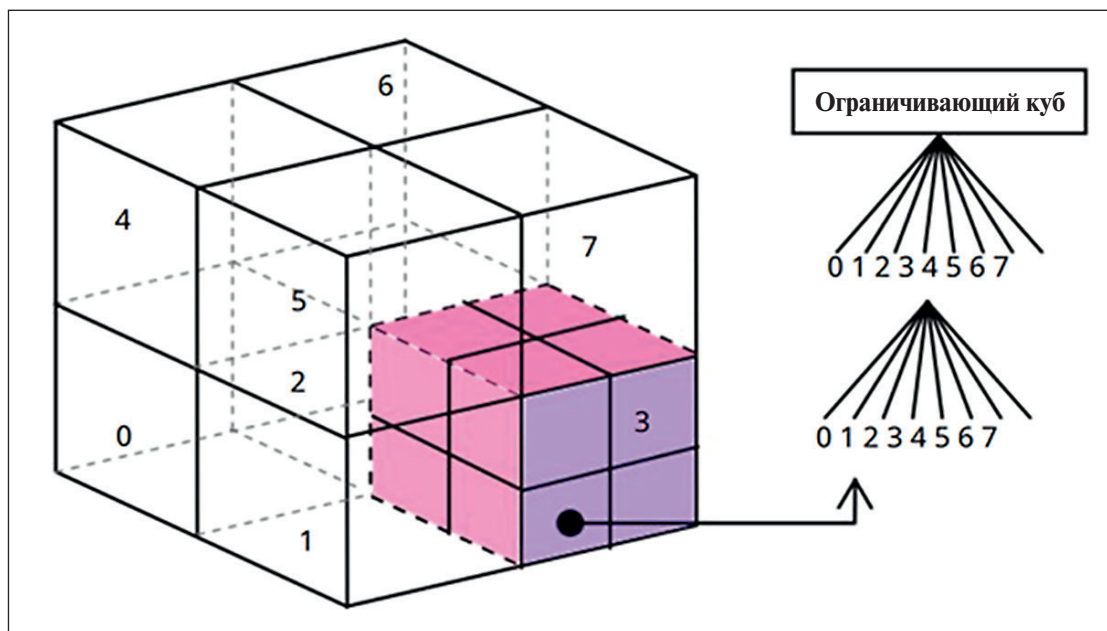


Рис. 1. Общая схема разделения трехмерного пространства с использованием октодеревьев

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Номер свидетельства: RU 2023663552. Номер заявки: 2023662975 Дата регистрации: 24.06.2023. Дата публикации: 24.06.2023. Авторы: Рада А.О., Кузнецов А.Д., Снежков А.М., Зверев Р.Е., Непомнишев И.Л., Черных Г.С., Тимофеев А.Е., Попов П.С., Коньков Н.Ю., Тютиков А.А., Никитина О.И., правообладатель — федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет». URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_54198120_50908639.PDF (дата обращения 15.10.2023).

строение октодеревьев (рекурсия) останавливается либо когда в кубе отсутствуют точки, либо когда достигается максимальный уровень детализации, заданный пользователем. Построение октодеревьев дает возможность быстро определить, какие точки, полученные по результатам лазерного сканирования, лежат в конкретных кубах. Соответственно, ускоряется поиск координат точек, нахождение ближайших соседей и решение аналогичных задач обработки плотных облаков точек.

Древовидная структура октодерева дает возможность использовать схему кодирования, при которой для каждой точки определяется длинный код длиной $3n$ бит, где n — максимальный уровень подразделения октодерева. Для кодирования куба нулевого уровня используются числа от 1 до 7. Например, на рис. 1 число «3» соответствует кубу нулевого уровня (также называемому ячейкой), в котором расположена определенная точка. Каждый бит соответствует положению ячейки относительно родительского куба в одном измерении. Эти числа объединяются для всех последовательных уровней с целью построения кода ячейки. Процесс кодирования идет быстро, так как алгоритмическая сложность кодирования имеет линейный характер, зависит только от количества точек и уровня куба (класс сложности алгоритма — «линейное время», вида $O(n)$).

Далее коды сортировались, чтобы сделать структуру октодерева более удобной для быстрых расчетов. Это дает возможность в короткие сроки находить коды точек плотного облака, а также все точки, лежащие в ячейке заданного уровня I . Повышение скорости поиска достигается за счет того, что рассматриваются только первые $3I$ бит кодов. Временная сложность алгоритма минимальна, поскольку он соответствует классу сложности «линейно-логарифмическое время» ($O(n \log n)$). Структуру октодерева легко поддерживать, поскольку она обладает высокой гибкостью, достаточно удобно добавлять или удалять точки.

На следующем этапе исследования было необходимо разместить исходную BIM-модель (проект здания) и плотные облака точек в единой системе координат. Поскольку BIM-модель создавалась уже с учетом геодезической привязки и системы координат, а реальный объект строится в соответствии с этой моделью, то мониторинг и контроль строительных работ выполняются в одной и той же системе отсчета. Если исходная BIM-модель (проект) и плотные облака точек (результат мониторинга работ) находятся в единой системе координат, то к ним следует применять один и тот же метод построения октодеревьев.

Каждая структура октодерева вычисляется, начиная от одного и того же исходного куба, который

является наименьшим кубом, вмещающим все облака. Следовательно, подобные ячейки во всех октодеревьях пространственно эквивалентны. Поэтому подмножества точек, находящихся в этих ячейках, также сопоставимы, для нахождения ближайших точек, вычисления расстояний между точками необходимо и достаточно сделать выборку кубов с одним и тем же кодом, то есть взять ячейки разных облаков, находящихся в одних и тех же пространственных координатах.

Отличительной особенностью разработанной в исследовании технологии является возможность выбора уровня детализации при сравнении плотных облаков точек с BIM-моделью. Таким образом, у пользователя появляется опция задать приоритет большей точности или большей скорости вычислений в зависимости от конкретных потребностей типа решаемых задач. Для этого используются разные уровни октодеревьев, на которых проводятся вычисления. Чем ниже уровень октодеревьев, тем выше точность расчетов и выше затраты и наоборот.

По умолчанию в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» используется восьмой уровень детализации. Он был определен экспериментально на основе количественных данных о плотности и размере облаков точек. Если точки плотного облака находятся достаточно далеко от BIM-модели (ранний этап строительства, когда построена сравнительно небольшая часть здания), то следует использовать более низкие уровни октодеревьев (девятый, десятый и т.д.) с более высокой степенью детализации. На более поздних этапах можно использовать более низкие уровни детализации, что сокращает время проведения расчетов и (или) потребности в вычислительной мощности.

В результате обработки плотных облаков точек и их сопоставления с исходной BIM-моделью, веб-приложение «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» выводит тепловую карту. Она показывает отклонения фактического состояния объекта строительства от BIM-модели (проекта здания, сооружения). Пример интерфейса программы показан на рис. 2.

Следует отметить, что при сравнении плотных облаков точек с BIM-моделью нужно учесть нормали полигональной сетки последней. Нормаль отражает внешнюю сторону поверхности полигональной сетки. Соответственно, все точки, которые расположены за плоскостью текущего треугольника полигональной сетки, показывают положительное отклонение от BIM-модели (и окрашиваются в красный цвет). Если точка находится на стороне, противоположной

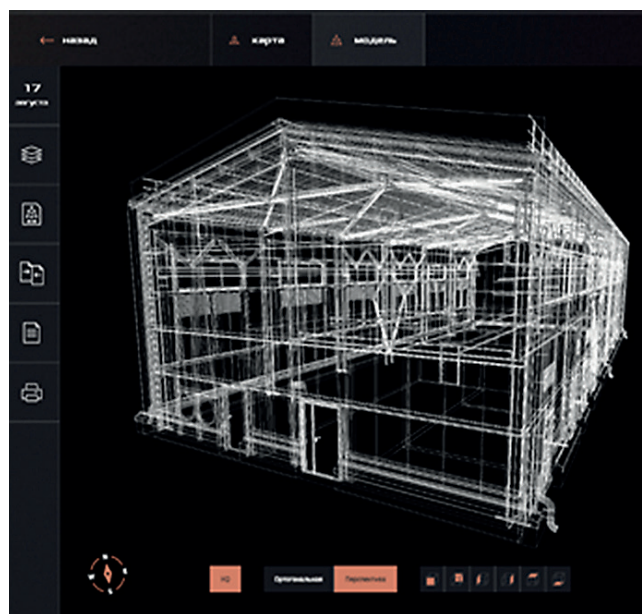
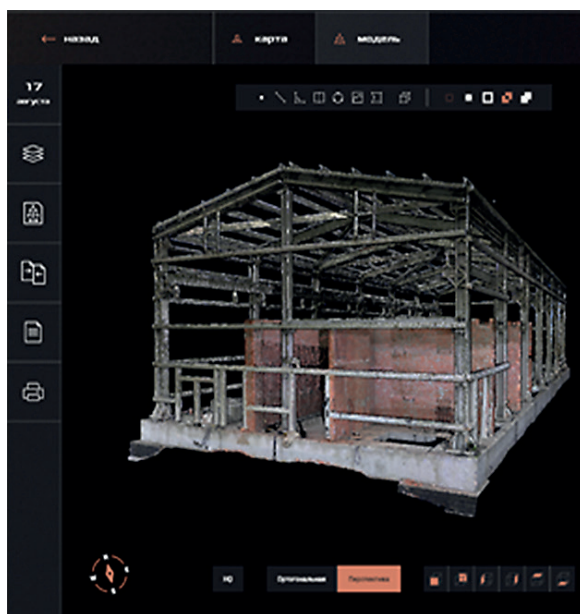


Рис. 2. Пример интерфейса веб-приложения «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» (слева – плотное облако точек, справа – BIM-модель)

направлению нормали, то это означает отрицательное отклонение, которое визуализируется синим цветом.

При анализе отклонений нужно учесть, что в некоторых случаях направление нормалей может быть искажено. Направление нормалей может зависеть от особенностей полигональной сетки, специфики применяемых вычислительных алгоритмов и других факторов. Наиболее рационально задавать нормали определенным образом при проектировании строительного объекта, то есть стандартизировать их на начальном этапе работы.

Веб-приложение «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу», дает возможность пользователю настроить тепловую карту с фиксированными допусками. Пример представлен на рис. 3. Так, часть изображения, выделенная красным цветом, означает положительное отклонение фактического состояния объекта строительства от проекта (BIM-модели) более чем на 5 см. в большую сторону. Это могут быть временные конструкции, запасы материалов и инструмент, расположенные на объекте, а также отклонения геометрических параметров от проекта в ходе строительства (например, большая высота или толщина стен, которая указывает на перерасход материала).

Синяя заливка на рис. 3 обозначает отклонение фактических параметров от проектных в меньшую сторону, когда геометрические параметры реального объекта еще не достигли проектных значений. Таким образом, разработанное веб-приложение дает возможность визуализировать отклонения от проек-

тных значений с необходимой степенью детализации и рациональным использованием вычислительных мощностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в строительную отрасль довольно широко внедряются BIM-модели в качестве цифровых двойников зданий, сооружений, которые позволяют вести мониторинг работ в автоматическом режиме и выявлять отклонения. Такая технология имеет большие производственные и экономические преимущества, но ее использование в определенной степени затрудняется необходимостью сбора и обработки больших объемов информации (миллиарды точек по результатам одного лазерного сканирования), что требует больших вычислительных мощностей и (или) продолжительного времени. Поэтому необходимо разрабатывать программные решения, которые позволяют пользователю выбирать рациональное соотношение скорости и точности мониторинга строительных работ в зависимости от конкретных задач.

В исследовании были использованы данные как наземного, так и лазерного сканирования ряда объектов строительства, что позволило получить плотные облака точек как эмпирическую основу для разработки и апробации технологии мониторинга и контроля строительных работ с возможностью выбора уровня детализации.

С целью обработки информации использована методология октодеревьев, позволяющая снизить

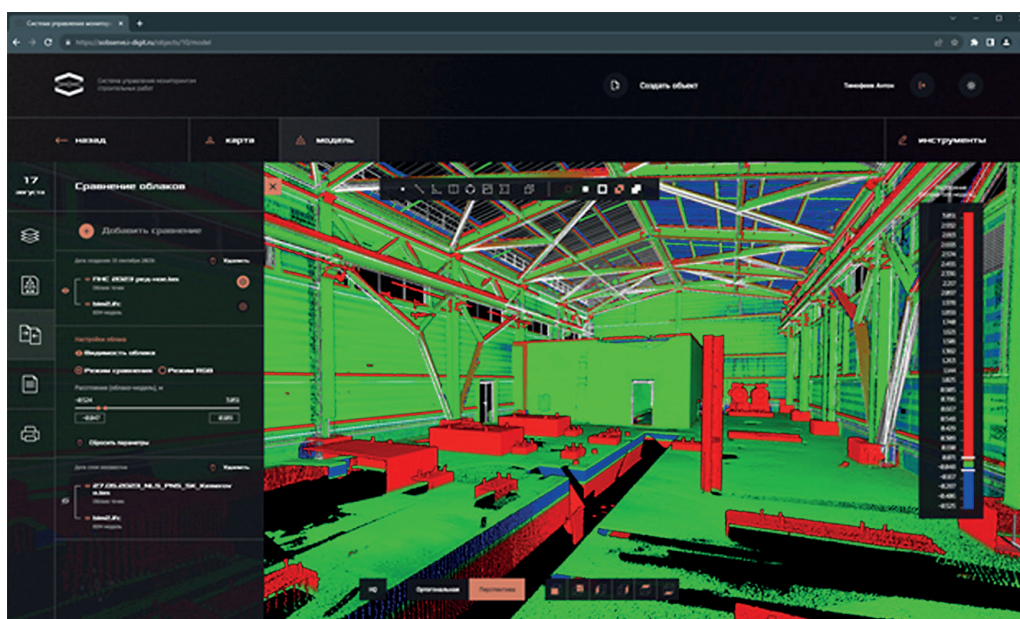


Рис. 3. Пример визуализации результатов сравнения плотного облака точек с BIM-моделью в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу»

потребности в вычислительных ресурсах, т.к. древовидные структуры ускоряют поиск координат точек за счет использования алгоритмов классов сложности «линейное время» и «линейно-логарифмическое время». Также реализовано пространственное подобие проекта в BIM-модели и плотных облаков точек, получаемых в ходе мониторинга и контроля строительных работ. В этом случае можно рассматривать 2 куба (ячейки) из BIM-модели и плотного облака точек, которые представлены в одних и тех же координатах.

В разработанном веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» реализована опция выбора точности детализации, которая зависит от количества используемых уровней октодеревьев. По умолчанию установлен восьмой уровень, но при необходимости, на более ранних этапах строительства с большими отличиями геометрических параметров от проектных, можно выбрать девятый, десятый и более низкие уровни. Затем количество уровней рационально сокращать, что экономит время и вычислительные ресурсы.

В ходе исследования установлен и проанализирован риск некорректной интерпретации информации при сравнении плотного облака точек с BIM-моделью вследствие искажения направления нормалей. Поэтому целесообразно рекомендовать стандартизировать направления нормалей при разработке строительного проекта, то есть на начальном этапе.

После обработки плотных облаков точек в веб-приложении «Система управления мониторингом строительных работ на объектах, прошедших государственную экспертизу» положительные и отрицательные отклонения геометрических параметров работ от проектных визуализируются цветом. Красный цвет означает положительные отклонения, выход геометрических параметров за проектные значения. Синим цветом визуализируются отрицательные отклонения. Это дает возможность пользователям вести автоматизированный оперативный мониторинг хода строительных работ, состояния объектов строительства с выбором необходимого уровня точности и рациональным использованием вычислительных ресурсов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zhang C., Yang Q., Zhang J., Gou L., Fan H. Topic mining and future trend exploration in digital economy research. *Information*. 2023; 14(8): 432. <https://doi.org/10.3390/info14080432>
2. Amankwah-Amoah J., Khan Z., Wood G., Knight G. COVID-19 and digitalization: The great acceleration. *Journal of Business Research*. 2021; 136: 602–611. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.08.011>

3. Shahadat M.M.H., Chowdhury A.H.M.Y, Nathan R.J., Fekete-Farkas M. Digital technologies for firms' competitive advantage and improved supply chain performance. *Journal of Risk and Financial Management*. 2023; 16(2): 94. <https://doi.org/10.3390/jrfm16020094>
4. Jabir B, Rabhi L, Fali N. RNN- and CNN-based weed detection for crop improvement: an overview. *Foods and Raw Materials*. 2021; 9(2): 387–396. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-2-387-396>
5. Chin, H., Marasini, D.P. & Lee, D. Digital transformation trends in service industries. *Service Business*. 2023; 17: 11–36. <https://doi.org/10.1007/s11628-022-00516-6>
6. Calderon-Monge E., Ribeiro-Soriano D. The role of digitalization in business and management: a systematic literature review. *Review of Managerial Science*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11846-023-00647-8>
7. Asad U., Khan M., Khalid A., Lughmani W.A. Human-centric digital twins in industry: a comprehensive review of enabling technologies and implementation strategies. *Sensors*. 2023; 23(8): 3938. <https://doi.org/10.3390/s23083938>
8. Moreno T., Almeida A., Toscano C., Ferreira F., Azevedo A. Scalable Digital Twins for industry 4.0 digital services: a dataspace approach. *Production & Manufacturing Research*. 2023; 11(1): 2173680. <https://doi.org/10.3390/s23083938.10.1080/21693277.2023.2173680>
9. Villalonga A., Negri E., Fumagalli L., Macchi M., Castaño F., Haber R. Local decision making based on distributed digital twin framework. *IFAC-PapersOnLine*. 2020; 53(2): 10568–10573. <https://doi.org/10.1016/j.ifa-col.2020.12.2806>
10. Agrell C., Rognlien Dahl K., Hafver A. Optimal sequential decision making with probabilistic digital twins. *SN Applied Sciences*. 2023; 5: 114. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05316-9>
11. Sepasgozar S.M.E., Khan A.A., Smith K., Romero J.G., Shen X., Shirowzhan S., Li H., Tahmasebinia F. BIM and digital twin for developing convergence technologies as future of digital construction. *Buildings*. 2023; 13(2): 441. <https://doi.org/10.3390/buildings13020441>
12. 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; 7: 660758. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2021.660758>
13. 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; 12: 100087. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2022.100087>
14. 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; 18(11): 6135. <https://doi.org/10.3390/ijerph18116135>
15. Zhang Q., Chan A., Yang Y., Guan J., Choi T. Influence of learning from incidents, safety information flow, and resilient safety culture on construction safety performance. *Journal of Management in Engineering*. 2023; 39(3): <https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-5223>
16. Schnell P., Haag P., Jünger H.C. Implementation of digital technologies in construction companies: establishing a holistic process which addresses current barriers. *Businesses*. 2023; 3(1): 1–18. <https://doi.org/10.3390/businesses3010001>
17. Elrefaey O., Ahmed S., Ahmad I., El-Sayegh S. Impacts of COVID-19 on the use of digital technology in construction projects in the UAE. *Buildings*. 2022; 12(4): 489. <https://doi.org/10.3390/buildings12040489>
18. Papadonikolaki E., Krystallis I., Morgan, B. Digital technologies in built environment projects: review and future directions. *Project Management Journal*. 2022; 53 (5): 501–519. <https://doi.org/10.1177/87569728211070225>
19. Tung Y.-H., Chia F.-C., Yong F. Y.-Y. Exploring the usage of digital technologies for construction project management. *Planning Malaysia*. 2021; 19(17): 13–22. <https://doi.org/10.21837/pm.v19i17.983>
20. Милкина Ю.А., Макарова Е.Е. Внедрение современных информационных технологий в строительную отрасль // Организатор производства. 2021. Т. 29. № 3. С. 101–110. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2021.66.40.010>
21. Волкова Л.В. Совершенствование систем качества в строительстве на основе цифровых технологий // Известия вузов. Строительство. 2023. № 9. С. 68–79. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-777-9-68-79>
22. Романова Е.В., Магера Т.Н. Цифровые технологии в подготовке строителей: социальное взаимодействие в отрасли // Сметно-договорная работа в строительстве. 2022. № 2. С. 59–64. <https://doi.org/10.33920/str-01-2202-09>
23. Almujiabah H. Assessment of building information modeling (BIM) as a time and cost-saving construction management tool: evidence from two-story villas in Jeddah. *Sustainability*. 2023; 15(9): 7354. <https://doi.org/10.3390/su15097354>

24. Kumar B. Building Information Modeling: Road to 2016. *International Journal of 3-D Information Modeling*. 2012; 1(4): 1–7. <http://doi.org/10.4018/ij3dim.2012100101>
25. Casini M. Extended reality for smart building operation and maintenance: a review. *Energies*. 2022; 15(10): 3785. <https://doi.org/10.3390/en15103785>
26. Chiu W.-B. Building information modeling application in engineering design performance prediction. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 2022; 11(1): 28–34. <https://doi.org/10.18178/ijscer.11.1.28-34>
27. Zhou X., Wang M., Liu Y.-S., Wang Q., Guo M., Zhao J. Heterogeneous network modeling and segmentation of building information modeling data for parallel triangulation and visualization. *Automation in Construction*. 2021; 131: 103897. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103897>
28. Rahla Rabia M.P., Sathish Kumar D., Farooq J., Pachauri R.K. Applications of Building Information Modeling for COVID-19 spread assessment due to the organization of building artifacts. *Data Science for COVID-19*. 2022; 2: 319–333. <http://doi.org/10.1016/B978-0-323-90769-9.00009-8>
29. Taher A.H., Elbeltagi E.E. Integrating building information modeling with value engineering to facilitate the selection of building design alternatives considering sustainability. *International Journal of Construction Management*. 2023; 23(11): 1886–1901. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.2021465>
30. Halmetoja E. The conditions data model supporting building information models in facility management. *Facilities*. 2019; 37(7/8): 484–501. <https://doi.org/10.1108/F-11-2017-0112>
31. Abdel-Tawab M., Kineber A.F., Chileshe N., Abanda H., Ali A.H., Almukhtar A. Building information modelling implementation model for sustainable building projects in developing countries: a PLS-SEM approach. *Sustainability*. 2023; 15(12): 9242. <https://doi.org/10.3390/su15129242>
32. Skrzypczak I., Oleniacz G., Leśniak A., Zima K., Mrówczyńska M., Kazak J.K. Scan-to-BIM method in construction: assessment of the 3D buildings model accuracy in terms inventory measurements. *Building Research & Information*. 2022; 50(8): 859–880. <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.2011703>
33. Rashdi R., Martínez-Sánchez J., Arias P., Qiu Z. Scanning technologies to building information modelling: a review. *Infrastructures*. 2022; 7(4): 49. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7040049>
34. Nap M.-E., Chiorean S., Cira C.-I., Manso-Callejo M.-Á., Păunescu V., Șuba E.-E., Sălăgean T. Non-destructive measurements for 3D modeling and monitoring of large buildings using terrestrial laser scanning and unmanned aerial systems. *Sensors*. 2023; 23(12): 5678. <https://doi.org/10.3390/s23125678>
35. Kartini G.A.J., Saputri N.D. 3D Modeling of Bosscha Observatory with TLS and UAV integration data. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*. 2022; 9(1): 37–46. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.9.1.37-46>
36. Ibrahimkhil M.H., Shen X., Barati K., Wang C.C. Dynamic progress monitoring of masonry construction through mobile SLAM mapping and as-built modeling. *Buildings*. 2023; 13(4): 930. <https://doi.org/10.3390/buildings13040930>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рада Артём Олегович – кандидат экономических наук, директор Института цифры Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, rada.ao@kemsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7678-8402>

Кузнецов Александр Дмитриевич – директор Центра геодезии, аэросъемки и кадастровых работ Института цифры Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, adkuz@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1986-3039>

Акулов Анатолий Олегович – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента им. И.П. Поварича Института экономики и управления Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, akuanatolij@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2301-7943>

Коньков Николай Юрьевич – ведущий программист отдела разработок Института цифры Кемеровского государственного университета, г. Кемерово, Россия, n.konkov@i-digit.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3817-4893>

ВКЛАД АВТОРОВ

Рада А.О. – написание разделов «Введение», «Заключение»; общее научное руководство.

Кузнецов А.Д. – написание раздела «Результаты и обсуждение»; организация работ по наземному и воздушному лазерному сканированию.

Акулов А.О. – написание раздела «Методы и материалы»; подготовка списка источников.

Коньков Н.Ю. – проведение экспериментальной части исследования; разработка и программная реализация вычислительных алгоритмов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 08.11.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 05.12.2023.