

ГЕОДЕЗИЯ

УДК 528.48:004.8

DOI 10.52928/2070-1683-2026-45-2-52-59

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ СООТВЕТСТВИЯ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА
ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

канд. техн. наук, доц. И.Е. РАК¹⁾, А.С. ЛАРИН²⁾, канд. техн. наук, доц. Д.А. ГУРА³⁾, А.В. КАБАЦКИЙ⁴⁾
(^{1),4)} Белорусский национальный технический университет, Минск,

²⁾ СП «Кредо-Диалог» ООО, Минск,

³⁾ Кубанский государственный технологический университет, Краснодар,

³⁾ Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар)

¹⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4634-1399>, ²⁾ ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9232-1402>,

³⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2748-9622>, ⁴⁾ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8348-2428>

В статье рассмотрена методика геодезического контроля строительства, обеспечивающая высокую степень автоматизации, точности и оперативности за счет интеграции данных наземного лазерного сканирования, BIM-модели и алгоритмов искусственного интеллекта. Так как условием создания успешной BIM-модели является корректный обмен информацией между различными специалистами, работающими над одним проектом и в различных программных продуктах на всех этапах использования модели, то важно иметь возможность работать в открытом и нейтральном программном продукте. В статье показано, как для этих целей может быть использован файл Industry Foundation Classes (IFC), который позволяет создавать структурированную цифровую модель строительного объекта, воплощающую его виртуальный прототип с закодированной информацией о его физических и функциональных характеристиках.

Ключевые слова: BIM-модели, лазерное сканирование, IFC, геодезический контроль, искусственный интеллект, нейронные сети, анализ отклонений.

Введение. Внедрение цифровых технологий (BIM, облачные сервисы) в процессы проектирования, строительства и эксплуатации объекта позволяет всем участникам этой цепочки управлять им в режиме реального времени. BIM-модель выступает цифровым двойником объекта, который содержит полную информацию о его физических, функциональных и экономических показателях на всех этапах жизненного цикла. Это ужесточило и изменило технологию приемки законченного объекта строительства. Поэтому сегодня остается нерешенным вопрос: как оперативно и точно выполнить сравнение построенного объекта или его отдельных элементов с запроектированной цифровой моделью.

Решением может стать искусственный интеллект (ИИ), а именно: компьютерное зрение, нейросети и машинное обучение. ИИ способен в автоматическом режиме распознавать объекты, классифицировать их и оценивать, насколько фактические параметры соответствуют проектным. Это позволит перейти от выборочного контроля к непрерывному и объективному, реализуемому интеллектуальной системой, а роль человека смещается к оперативному управлению на основе готовых аналитических выводов.

Анализ проблемы. В использовании классических методов инструментального и визуального контроля, зависящих от человеческого фактора, можно выявить три фундаментальные проблемы:

- дискретность и неполнота данных. Методология основана на измерении ограниченного набора «контрольных точек», произвольно или по шаблону выбранных на конструкциях. Такой подход не позволяет оценить непрерывность и плавность геометрических форм. Потенциальные дефекты, такие как локальные прогибы, волнообразность поверхностей или плавные отклонения между точками, остаются невыявленными;

- влияние субъективного человеческого фактора. Точность и воспроизводимость измерений напрямую зависят от квалификации, физиологического состояния и внешних условий. Различные специалисты могут получать различные результаты при обследовании одного узла. Последующая обработка данных – ручное составление эскизов, заполнение таблиц, формирование отчетов – представляет собой трудоемкий, неавтоматизированный процесс, с возможными ошибками и занимающий непропорционально большое время относительно самого процесса измерений. Появляется разрыв во времени между сбором данных и принятием управленческих решений и данные теряют актуальность ещё до завершения их анализа.

- низкая операционная эффективность. Как правило, основой для сравнения проектного решения и фактически законченного объекта являются результаты исполнительных съемок. Сегодня тахеометрическая съемка и съемка, выполняемая спутниковыми методами, по точности, скорости выполнения уступают место лазерному сканированию. Лазерное сканирование обеспечивает прямой, автоматизированный и намного более быстрый способ сбора плотного массива трехмерных данных. Ключевым технологическим преимуществом этого метода

является скорость сканирования, достигающая от 500 тыс. до 2 миллионов измерений в секунду. Это позволяет в течение коротких временных интервалов выполнять детальную и высокоплотную съемку сложных объектов или обширных территорий в пределах рабочего диапазона прибора. Результатом сканирования является так называемое «облако точек» (рисунок 1) – неструктурированный или частично структурированный массив миллионов точек, каждая из которых обладает уникальными пространственными координатами и, зачастую, дополнительными атрибутами (интенсивностью отраженного сигнала, цветовой информацией).



Рисунок 1. – Облако точек исследуемого объекта

Полученное детальное трехмерное цифровое изображение объекта в его реальных метрических свойствах может служить достоверной основой для всего последующего жизненного цикла сооружения и для выявления отклонений от проектной BIM-модели.

Условие создания успешной BIM-модели – возможность корректного обмена информацией с различными специалистами, работающими над одним проектом и в различных программных продуктах на всех этапах использования модели. Ответом на это требование стало появление и развитие открытого, нейтрального к ПО формата Industry Foundation Classes (IFC), который превратился в основу технологической инфраструктуры открытого BIM.

Industry Foundation Classes (IFC) – это открытый международный стандарт (ISO 16739-1:2018) для обмена данными в BIM (информационном моделировании зданий), разработанный консорциумом buildingSMART. Он позволяет передавать 3D-модели и атрибутивную информацию (материалы, объемы) между различными САПР, обеспечивая интероперабельность. Формат независим от конкретного ПО (vendor-neutral) и поддерживает взаимодействие на всех этапах жизненного цикла здания¹.

Файл формата IFC представляет собой структурированный цифровой формат строительного объекта, воплощающий его виртуальный прототип с закодированной информацией о его физических и функциональных характеристиках.

Один из главных инструментов цифрового контроля на основе IFC – это автоматизированная проверка отклонений и правил. Для этого используются специализированные платформы (Solibri Model Checker, Navisworks), которые позволяют формализовать нормативные, технические и корпоративные требования в виде набора алгоритмических правил, применяемых к IFC-модели.

1. Геометрические правила. Например, «прогиб всех сборных плит перекрытия не должен превышать $L/200$ », «Отклонение осей несущих колонн от вертикали – не более 10 мм на всю высоту этажа» и т.д.

2. Семантические правила. Например, каждой бетонной колонне в осях А-Д должно быть присвоено свойство «Класс бетона по прочности на сжатие» (например, В25, В30) или все точки исполнительной съемки, относящиеся к «Красным линиям», должны содержать атрибут «Допустимая погрешность (мм)» со значением не выше 20 мм.

3. Информационные правила (наличие данных, форматы, диапазоны). Например, для всех пикетов (точек трассы) должно быть указано значение атрибута «Проектная высотная отметка» – поле не может быть пустым или у каждого элемента «Наружная стена» должен быть заполнен параметр «Предел огнестойкости (мин)» формат – целое число от 30 до 360.

¹ ISO 16739-1:2024 «Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries». – URL: <https://www.iso.org/standard/84123.html> (дата обращения 01.12.2025).

Фактическая IFC-модель, созданная на основе облака точек, подвергается проверке по этим правилам. Система автоматически идентифицирует элементы, не соответствующие критериям, и генерирует структурированный отчет с классификацией нарушений, что кардинально сокращает время приемочных работ и минимизирует субъективный человеческий фактор.

На каждом этапе решается строго определенная задача, обеспечивая трансформацию исходных геопространственных данных в структурированные, семантически интерпретированные выводы.

Первый этап – формализованное представление объектов информационной модели в виде, пригодном для машинного анализа. Семантическая векторизация выполняет функцию семантического транслятора, преобразующего структурированные данные IFC-файла в векторные описания в многомерном пространстве признаков.

Алгоритм действий векторизации включает в себя:

1. Извлечение семантических и геометрических атрибутов. Для каждого экземпляра объекта (например, IfcColumn) система извлекает иерархический набор признаков:

- категориальные: тип объекта (IfcColumn), предопределенный тип (PredefinedType), назначение (LoadBearing);
- геометрические: абсолютные размеры, объем, ориентация в пространстве (нормаль), координаты точек (центр масс, база);
- топологические и реляционные: идентификаторы связанных элементов (опорные узлы, примыкающие стены, принадлежность к этажу IfcBuildingStorey), тип связи (IfcRelConnects, IfcRelAggregates);
- атрибутивные: значения из Property Sets (материал, класс прочности, огнестойкость).

2. Формирование нормализованного векторного представления. Извлеченные разнородные данные нормализуются и кодируются в единый числовой вектор.

- категориальные признаки преобразуются с использованием методов One-Hot (бинарное кодирование) или Label Encodig (кодирования метками);
- геометрические и числовые признаки масштабируются для устранения влияния единиц измерения;
- для учета контекста в вектор включаются признаки второго порядка, описывающие не сам объект, а его окружение: среднее расстояние до соседних однотипных объектов, плотность элементов в заданном радиусе, доминирующий тип связей. Это позволяет отличать идентичные по форме объекты, занимающие разное структурное положение в модели.

3. Назначение весовых коэффициентов признаками. На основе экспертных правил или методов машинного обучения признаками назначаются веса, отражающие их важность для последующего сопоставления.

На втором этапе задача сводится к оптимизационной проблеме установления попарных соответствий между элементами двух множеств. Алгоритм модуля реализует двухуровневый подход, сочетающий фильтрацию по правилам и нечеткий поиск на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Последовательность работы алгоритма представлена в виде схемы на рисунке 2.

На третьем этапе на основе установленных соответствий выполняется многокритериальный анализ отклонений и происходит формирование управленческих выводов.

Многоуровневая процедура анализа включает в себя:

1) геометрический анализ отклонений. Для каждой установленной пары вычисляют количественные метрики (линейное смещение центра масс, угловое отклонение ориентации, относительную разницу ключевых размеров, минимальное расстояние между поверхностями);

2) семантическую и логическую верификацию. На этом уровне проверяется соответствие объекта не только геометрическим, но и функциональным требованиям. Реализуются правила, проверяющие функциональную корректность, целостность систем, соответствие нормативным контекстам;

3) интеллектуальную классификацию и оценку критичности. На основе вычисленных метрик и результатов логической проверки каждый дефект классифицируется. Для этого применяется модель машинного обучения, обученная на исторических данных о последствиях различных типов отклонений.

- входные признаки классификатора: величина геометрических отклонений, тип элемента, его структурная роль, результаты семантической проверки;
- выход – структурирование дефектов: система присваивает дефекту категорию из иерархической таксономии и уровень критичности (K1-K4).

Критерии критичности K1-K4:

- K1 (Блокирующий) – угроза обрушения, безопасности людей, грубое нарушение норм. Требуется немедленная остановка работ;
- K2 (Критический) – влияет на несущую способность, долговечность, ключевые функции. Требуется безусловного исправления до продолжения следующих этапов;
- K3 (Значительный) – влияет на качество, удобство монтажа последующих конструкций, эстетику. Требуется исправления в установленные технологические окна;
- K4 (Информационный) – отклонение в пределах допустимого, не влияющее на характеристики. Фиксируется из архива.



Рисунок 2. – Схема работы алгоритма искусственных нейронных сетей

Заключительным этапом является интеграция выходных данных всех этапов в структурированный отчет.

Предложенная модульная (поэтапная) архитектура реализует полный цикл преобразования «сырых» данных сравнения в семантически обогащенную, ранжированную по критичности информацию, пригодную для обоснованного принятия управленческих решений в процессе строительного контроля.

Эксперимент. Целью разрабатываемой методики является создание единой цифровой среды для поддержки принятия решений в строительстве, которая взяла бы на себя выполнение рутинных, но трудоемких задач сбора

измерений, обработки и первичного анализа данных, минимизируя влияние человеческого фактора и временные задержки. В конечном итоге это позволит высвободить человеческие ресурсы для решения стратегических, неалгоритмизируемых задач управления, повышая тем самым общую эффективность, качество и технологическую зрелость строительного производства.

Основу данной методологии составляют три взаимодополняющих технологии:

1) наземное лазерное сканирование (НЛС): выступает в роли высокоскоростного, высокоточного сенсора, обеспечивающего полную и непрерывную пространственную фиксацию объекта. НЛС преодолевает проблему дискретности, предоставляя не выборку точек, а детализированный «цифровой слепок» – плотное облако точек, адекватно отражающее реальную геометрию;

2) открытый стандарт IFC: выполняет функцию универсального семантического языка и контейнера данных. IFC обеспечивает трансформацию неструктурированного облака точек в информационную модель, где каждому элементу присваивается тип, свойства и логические связи. Это создает основу для интероперабельности данных между различными программными платформами и этапами жизненного цикла объекта;

3) алгоритмы автоматизированного анализа (включая методы машинного обучения): играют роль аналитического ядра системы. Эти алгоритмы предназначены для автоматического сопоставления фактических данных с проектными, выявления отклонений, их классификации по заданным критериям критичности и формирования структурированных отчетов для принятия решений.

В рамках экспериментальной части исследования требовалось выбрать базовую платформу для реализации концепции интеллектуального аналитического и объясняющего модуля (ХАИ) системы контроля. После проведения сравнительного анализа доступных на момент исследования больших языковых моделей, в качестве основного инструмента была выбрана языковая модель DeepSeek компании DeepSeek AI. Данный выбор был обусловлен оптимальным соотношением «возможность-доступность» и позволил сфокусировать ресурсы исследования на содержательной стороне апробации методики, а не на решении инфраструктурных и финансовых вопросов. В ходе эксперимента модель выполняла функцию интеллектуального ядра, имитирующего работу модуля ХАИ в гипотетической полноценной системе [1].

В качестве демонстрации полного цикла работы интегрированной системы цифрового геодезического контроля рассматривался пример контроля монтажа железобетонной колонны марки КЗ-1 на первом этаже административного здания.

Цель – проверить соответствие фактического положения и геометрии монолитной колонны, возведенной подрядчиком, проектным параметрам, зафиксированным в BIM-модели.

Исходные данные:

1) проектная модель (As-Designed): BIM-модель в формате IFC, где колонна КЗ-1 определена как IfcColumn с точными координатами ($X = -0,210$ м, $Y = 5,200$ м, высотой 8,5 м и свойством `Pset_StructuralLoad.Bearing = True`;

2) физический объект: смонтированная железобетонная колонна.

На объекте вокруг контролируемого узла с использованием фазового лазерного сканера (Faro Focus) была создана сеть станций, обеспечивающая полное покрытие колонны и примыкающих конструкций с перекрытием сканов 30%. Привязка станций была выполнена с помощью тахеометра от пунктов разбивочной основы.

Роль ХАИ. ИИ нужно сообщить тип сканера, параметры съемки. Полученные сканы импортируются в ПО, которое сможет выполнить сшивку сканов (Faro Scene). Выполняется автоматическая регистрация по целевым сферам с остаточной невязкой 2 мм. Из облака точек удаляется шум.

Оператор с помощью инструментов полуавтоматического моделирования выделяет в облаке точек геометрию колонны (рисунок 3). Программа аппроксимирует ее твердотельным телом и создает объект IfcColumn.

В рамках экспериментальной проверки достоверности интеллектуального анализа был применен метод контролируемого внесения погрешностей. Исходные данные, полученные путем высокоточных тахеометрических измерений, подтвердили отсутствие значимых отклонений геометрии возведенных конструкций от проектных параметров. Для тестирования чувствительности и надежности разрабатываемого ИИ-модуля в верифицированную цифровую модель были искусственно, но реалистично внесены заданные геометрические искажения. Целью данного подхода являлась не проверка объекта, а оценка способности алгоритма детектировать и корректно классифицировать смоделированные несоответствия в условиях, когда эталонная модель и модель с внесенными ошибками изначально известны.

Системе вручную присваиваются ключевые атрибуты, унаследованные из проекта: `Name = «КЗ-1»`, `PredefinedType = «COLUMN»`. Автоматически вычисляются и записываются фактические координаты центра, габариты и ориентация. Формируется IFC-файл фактического состояния, содержащий только одну колонну в общей системе координат стройплощадки. Оба IFC-файла (проектный и фактический) загружаются в систему контроля, в нашем случае это `chat.deepseek.com`. Запускается конвейер обработки. ИИ извлекает данные для объекта IfcColumn КЗ-1 из обеих моделей. Устанавливает соответствие и выявляет отклонения. Выполняет классификацию и оценку критичности. Все эти процессы происходят «внутри» ИИ, оператору нужно только загрузить данные и ожидать окончания обработки.

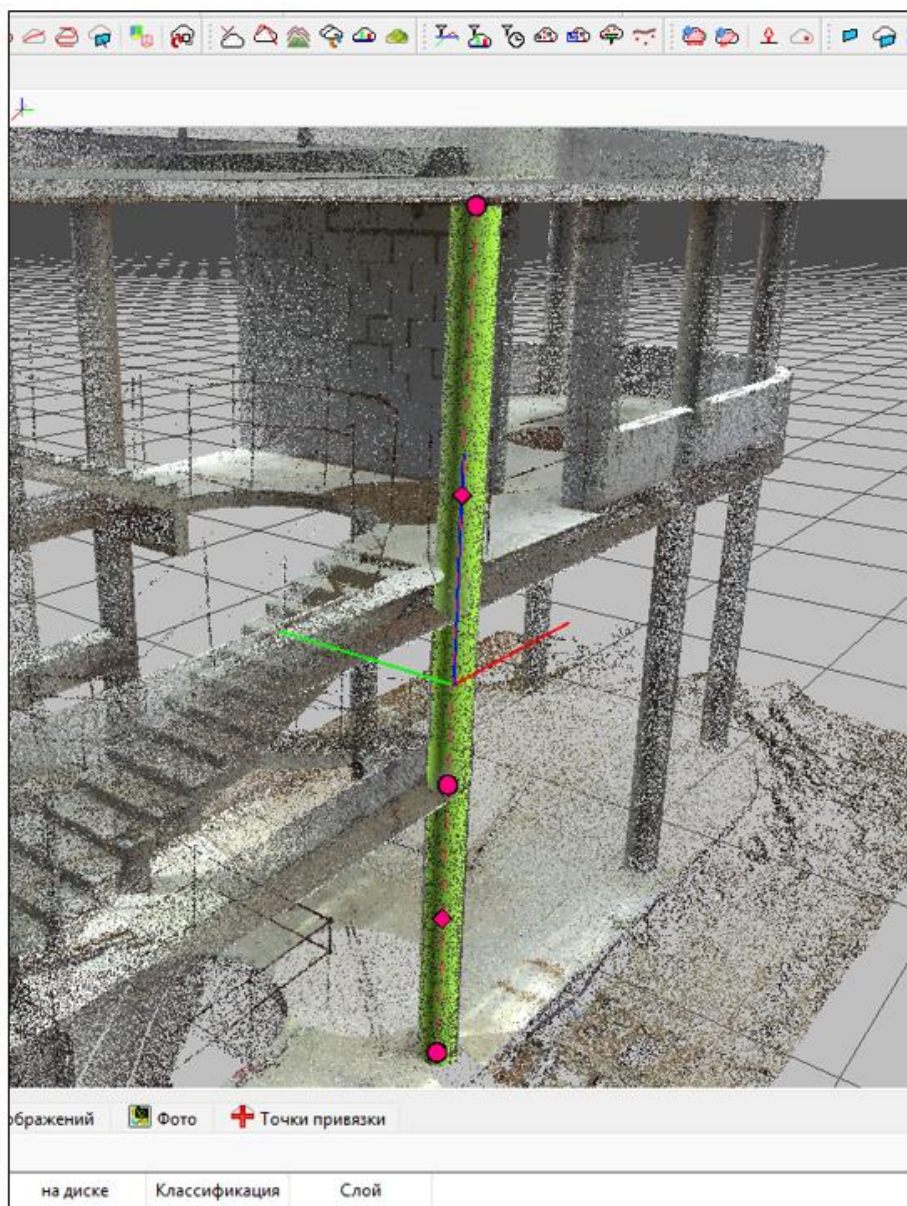


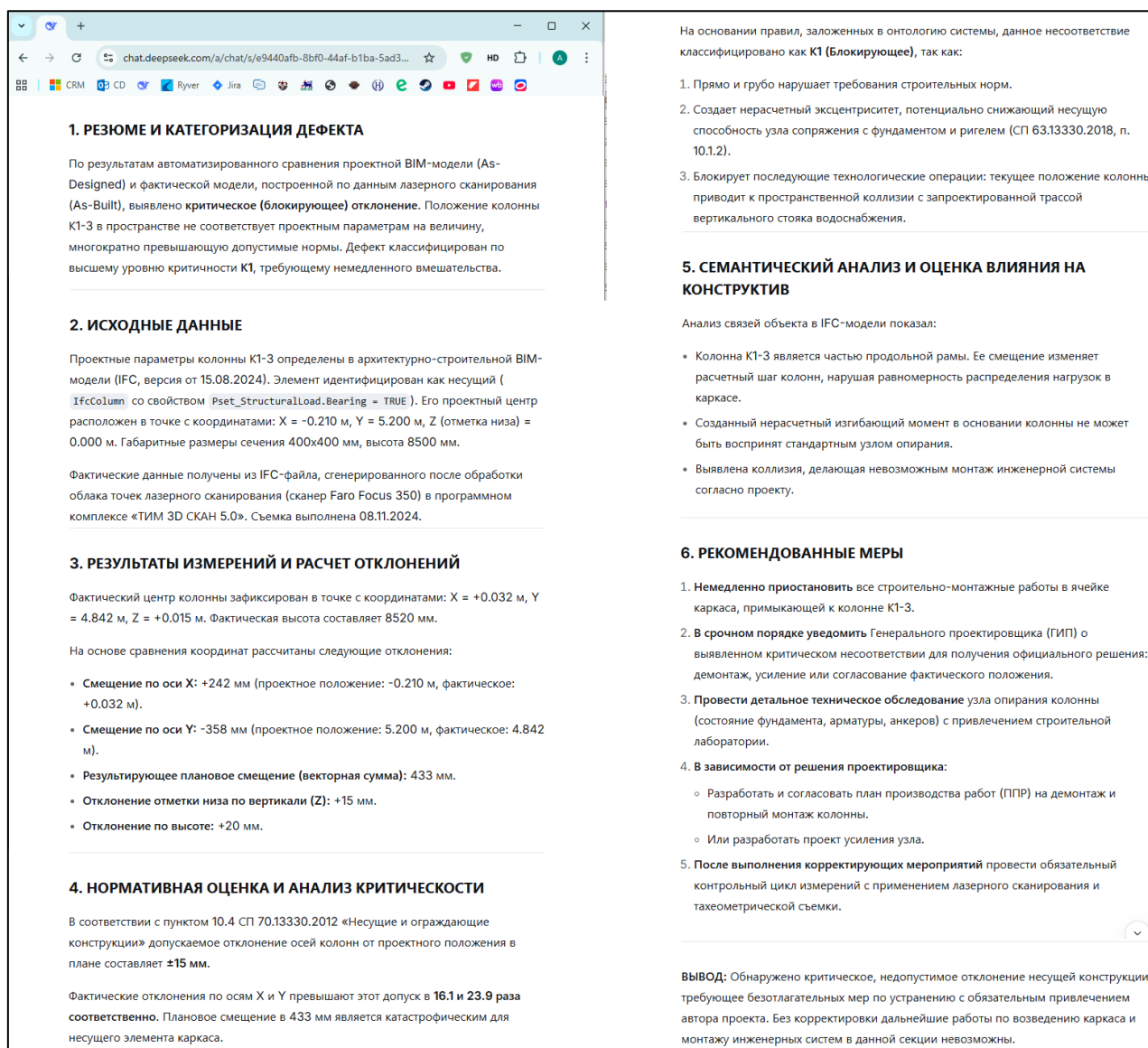
Рисунок 3. – Создание 3D-модели колонны

В рамках проведенного исследования был выполнен сплошной контроль колонн каркаса (таблица 1).

Таблица 1. – Значения координат точек колонны, полученные разными способами съемки

№	Координаты контрольной точки, м		Проектная отметка, м	Тахеометрический метод, м	Метод НЛС + ИИ, м	Отклонение Тахеометр, мм	Отклонение НЛС+ИИ, мм
	X	Y	Z	Z тахеометр	Z нлс+ии	ΔZ тахеометр	ΔZ нлс+ии
Первый этаж							
1	0,500	-4,000	3,450	3,452	3,4518	+2	+1,8
2	3,500	-4,000	3,450	3,453	3,4529	+3	+2,9
3	0,500	14,000	3,450	3,448	3,4482	-2	-1,8
4	3,500	14,000	3,450	3,447	3,4471	-3	-2,9
5	2,000	5,000	3,450	3,445	3,4451	-5	-4,9
6	1,000	2,000	3,450	3,449	3,4489	-1	-1,1
7	3,000	2,000	3,450	3,451	3,4509	+1	+0,9
8	1,500	8,000	3,450	3,452	3,4518	+2	+1,8
9	2,500	8,000	3,450	3,454	3,4538	+4	+3,8
10	2,000	-2,000	3,450	3,453	3,4529	+3	+2,9

Имея всю цепочку данных, модуль ХАИ формирует финальное, понятное человеку заключение (рисунок 4).



1. РЕЗЮМЕ И КАТЕГОРИЗАЦИЯ ДЕФЕКТА

По результатам автоматизированного сравнения проектной BIM-модели (As-Designed) и фактической модели, построенной по данным лазерного сканирования (As-Built), выявлено **критическое (блокирующее) отклонение**. Положение колонны К1-3 в пространстве не соответствует проектным параметрам на величину, многократно превышающую допустимые нормы. Дефект классифицирован по высшему уровню критичности К1, требующему немедленного вмешательства.

2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Проектные параметры колонны К1-3 определены в архитектурно-строительной BIM-модели (IFC, версия от 15.08.2024). Элемент идентифицирован как несущий (IfcColumn со свойством Pset_StructuralLoad.Bearing = TRUE). Его проектный центр расположен в точке с координатами: X = -0.210 м, Y = 5.200 м, Z (отметка низа) = 0.000 м. Габаритные размеры сечения 400x400 мм, высота 8500 мм.

Фактические данные получены из IFC-файла, сгенерированного после обработки облака точек лазерного сканирования (сканер Faro Focus 350) в программном комплексе «ТИМ 3D СКАН 5.0». Съемка выполнена 08.11.2024.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАСЧЕТ ОТКЛОНЕНИЙ

Фактический центр колонны зафиксирован в точке с координатами: X = +0.032 м, Y = 4.842 м, Z = +0.015 м. Фактическая высота составляет 8520 мм.

На основе сравнения координат рассчитаны следующие отклонения:

- Смещение по оси X: +242 мм (проектное положение: -0.210 м, фактическое: +0.032 м).
- Смещение по оси Y: -358 мм (проектное положение: 5.200 м, фактическое: 4.842 м).
- Результирующее плановое смещение (векторная сумма): 433 мм.
- Отклонение отметки низа по вертикали (Z): +15 мм.
- Отклонение по высоте: +20 мм.

4. НОРМАТИВНАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ КРИТИЧЕСКОСТИ

В соответствии с пунктом 10.4 СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции» допустимое отклонение осей колонн от проектного положения в плане составляет **±15 мм**.

Фактические отклонения по осям X и Y превышают этот допуск в **16.1 и 23.9** раза соответственно. Плановое смещение в 433 мм является катастрофическим для несущего элемента каркаса.

На основании правил, заложенных в онтологию системы, данное несоответствие классифицировано как **К1 (Блокирующее)**, так как:

- Прямо и грубо нарушает требования строительных норм.
- Создает нерасчетный эксцентриситет, потенциально снижающий несущую способность узла сопряжения с фундаментом и ригелем (СП 63.13330.2018, п. 10.1.2).
- Блокирует последующие технологические операции: текущее положение колонны приводит к пространственной коллизии с запроектированной трассой вертикального стояка водоснабжения.

5. СЕМАНТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НА КОНСТРУКТИВ

Анализ связей объекта в IFC-модели показал:

- Колонна К1-3 является частью продольной рамы. Ее смещение изменяет расчетный шаг колонн, нарушая равномерность распределения нагрузок в каркасе.
- Созданный нерасчетный изгибающий момент в основании колонны не может быть воспринят стандартным узлом опирания.
- Выявлена коллизия, делающая невозможным монтаж инженерной системы согласно проекту.

6. РЕКОМЕНДОВАННЫЕ МЕРЫ

- Немедленно приостановить** все строительно-монтажные работы в ячейке каркаса, примыкающей к колонне К1-3.
- В срочном порядке уведомить** Генерального проектировщика (ГИП) о выявленном критическом несоответствии для получения официального решения: демонтаж, усиление или согласование фактического положения.
- Провести детальное техническое обследование** узла опирания колонны (состояние фундамента, арматуры, анкеров) с привлечением строительной лаборатории.
- В зависимости от решения проектировщика:**
 - Разработать и согласовать план производства работ (ППР) на демонтаж и повторный монтаж колонны.
 - Или разработать проект усиления узла.
- После выполнения корректирующих мероприятий** провести обязательный контрольный цикл измерений с применением лазерного сканирования и тахеометрической съемки.

ВЫВОД: Обнаружено критическое, недопустимое отклонение несущей конструкции, требующее безотлагательных мер по устранению с обязательным привлечением автора проекта. Без корректировки дальнейшие работы по возведению каркаса и монтажу инженерных систем в данной секции невозможны.

Рисунок 4. – Объяснимое заключение

Предоставленный сквозной пример наглядно демонстрирует работу полного цикла – от физического объекта до управленческого решения.

Ключевые выводы:

1. Методология работает: интеграция НЛС, ТИМ КРЕДО 3D Скан, открытого формата IFC и алгоритмов ИИ создает жизнеспособный конвейер для контроля.

2. ХАИ обеспечивает доверие и действие: система не просто констатирует факт отклонения. Она объясняет, почему это важно (колонна несущая), доказывает, откуда это известно (ссылка на точные данные и нормы), и предлагает конкретный план действий. Это трансформирует цифровой отчет в основание для немедленных инженерных решений.

3. Эффективность: весь процесс, от завершения сканирования до получения развернутого заключения, занимает несколько часов, в то время как традиционный цикл (обмеры, чертежи, согласование) мог занять дни.

Таким образом, практическая апробация подтверждает основную гипотезу: предложенная интеграционная методология позволяет преодолеть разрыв между массовым сбором геопространственных данных и принятием обоснованных решений, переводя геодезический контроль в новое качество – непрерывный, семантически насыщенный и объяснимый процесс управления строительством.

Заключение. В ходе эксперимента было проверено, насколько применимы современные языки программирования как основа для модуля, который анализирует и поясняет решение системы контроля. На примере модели DeepSeek, выбранной в качестве базовой платформы, были выявлены как значительные возможности, так и системные ограничения.

Ключевые технологические возможности:

- модель демонстрирует высокую эффективность при обработке параметрических данных, извлеченных из информационных моделей (BIM, IFC);
- она способна корректно интерпретировать семантику строительных элементов (тип, назначение, свойства), выполнять пространственные расчеты (отклонения, расстояния) и проводить сравнительный анализ;
- модель успешно применяет формализованные правила, сопоставляя результаты измерений с требованиями нормативных документов;
- система способна не только констатировать факт превышения допуска, но и давать его количественную оценку;
- ключевая практическая ценность заключается в способности модели автоматически формировать развернутые отчеты, включающие констатацию факта, доказательную базу, нормативную оценку, анализ рисков и конкретные рекомендации, что соответствует полному циклу подготовительной работы инженера.

Технологическими ограничениями являются:

- отсутствие прямой интеграции со специализированными ПО. Модели не обладают нативными интерфейсами для автоматического подключения к средам BIM-проектирования;
- неспособность к обработке низкоуровневых геопространственных данных. Модели не предназначены для прямого анализа облаков точек НЛС или выполнения операций 3D-сравнения геометрии. Их входными данными должны быть предварительно структурированные параметры, извлеченные из моделей;
- ресурсные ограничения для обучения специализированных алгоритмов. Реализация сложных нейросетевых алгоритмов для задач точного сопоставления или классификации требует выделенных вычислительных ресурсов и обучения на размеченных датасетах, что выходит за рамки возможностей базовой языковой модели.

Таким образом, в рамках настоящего эксперимента была исследована методика геодезического контроля строительства, которая обеспечивает высокую степень автоматизации, точности и оперативности за счет интеграции НЛС, BIM и алгоритмов искусственного интеллекта. Практический эффект от внедрения такого прототипа заключается в радикальном сокращении времени на подготовку контрольной документации – с нескольких часов ручного труда до десятков минут, при одновременном повышении стандартизации и обоснованности выводов [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Алпайдин Э. Машинное обучение: новый искусственный интеллект / Пер. с англ. – М.: Изд. группа «Точка», 2017. – 208 с.
2. Рассел С., Норvig П. Искусственный интеллект: современный подход / Пер. с англ. – 2-е изд. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2018. – 1408 с.

REFERENCES

1. Alpaydin, E. (2017). *Machine Learning: The New AI*. Moscow: Publishing group "Tochka". (In English).
2. Russell, S., & Norvig, P. (2018). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 2nd ed. Moscow: Williams Publishing House LLC. (In English).

Поступила 07.05.2026

AUTOMATED CONTROL OF CONFORMITY OF CONSTRUCTION PROJECTS WITH THE DIGITAL MODEL OF THE PROJECT

I. RAK¹⁾, A. LARYN²⁾, D. GURA³⁾, A. KABATSKY⁴⁾

^(1,4) Belarusian National Technical University, Minsk, ²⁾ Company «Credo-Dialog», Minsk,

³⁾ Kuban State Technological University, Krasnodar, ³⁾ Kuban State Agrarian University, Krasnodar)

The article discusses a method of geodetic construction control that ensures a high degree of automation, accuracy, and efficiency by integrating terrestrial laser scanning data, BIM models, and artificial intelligence algorithms. Since a successful BIM model requires the ability to correctly exchange information with various specialists working on the same project across different software products at all stages of the model's lifecycle, it is essential to be able to work within an open and neutral software environment. The article demonstrates how the Industry Foundation Classes (IFC) file format can be used for these purposes, as it enables the creation of a structured digital model of a construction facility, serving as its virtual prototype with encoded information about its physical and functional characteristics.

Keywords: BIM models, laser scanning, IFC, geodetic control, artificial intelligence, neural networks, deviation analysis.