

УДК 625.171

Сравнительный анализ технологий воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования для диагностики железнодорожного пути: критерии выбора на основе оценки точности, производительности и эксплуатационных ограничений

Ф. В. Чеснович

Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Дирекция транспортного строительства», Россия, 194044, Санкт-Петербург, Нейшлотский пер., 8

Для цитирования: Чеснович Ф. В. Сравнительный анализ технологий воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования для диагностики железнодорожного пути: критерии выбора на основе оценки точности, производительности и эксплуатационных ограничений // Известия Петербургского университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2026. Т. 23, вып. 2. С. 299–308. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-299-308

Аннотация

Цель: рассмотреть вопрос о необходимости разработки и последующем обосновании выбора оптимальной технологии лазерного сканирования для решения задач диагностики железнодорожного пути в контексте многообразия современных методов съемки. Актуальность работы обусловлена необходимостью формализации процесса выбора между воздушным (ВЛС), мобильным (МЛС) и наземным (НЛС) лазерным сканированием для получения достоверной пространственной информации об объектах инфраструктуры. **Методы:** в основе исследования лежит сравнительный анализ технических и эксплуатационных параметров трех указанных технологий. Сопоставление проводилось по совокупности критериев, включающих такие параметры, как точность (абсолютная), детализация (плотность точек), производительность (линейная), зависимость от графика движения поездов, зависимость от погодных явлений, основные «мертвые зоны», экономика (условная стоимость съемки 1 км). Анализ выполнялся с учетом специфики линейно-протяженных и точечных объектов железнодорожной инфраструктуры. **Результаты:** в процессе исследования было установлено, что эффективное применение каждой из технологий детерминировано спецификой решаемых инженерных задач. Выявлена иерархическая структура приоритетов выбора, где требования к метрической точности и детализации модели выступают в качестве доминирующего фактора (первичного фильтра). Данный фильтр задает допустимый диапазон производительности и технических возможностей, которые, в свою очередь, корректируются экономической целесообразностью и эксплуатационными ограничениями конкретного проекта. Также были определены области эффективного применения для каждой технологии. **Практическая значимость:** сформулированные критерии позволяют формализовать процедуру технологического аудита на этапе предпроектных изысканий. Применение разработанного подхода минимизирует риски получения недостоверных данных, оптимизирует затраты и обеспечивает требуемую полноту и детальность исходной информации для последующего проектирования, строительства, реконструкции и ведения цифровых моделей инфраструктуры (ВИМ/ТИМ).

Ключевые слова: лазерное сканирование, диагностика железнодорожного пути, воздушное лазерное сканирование (ВЛС), мобильное лазерное сканирование (МЛС), наземное лазерное сканирование (НЛС), точность, производительность, цифровая модель пути

Введение

Актуальность внедрения высокоточных и высокопроизводительных методов диагностики состояния железнодорожного пути обусловлена повышением требований безопасности и регулярности движения в условиях роста нагрузок и скоростей [1]. Традиционные геодезические методы, такие как нивелирование и тахеометрическая съемка, обеспечивая высокую точность на уровне 1–2 мм, являются трудоемкими, малоэффективными для обследования протяженных участков и создают значительные риски для персонала, работающего в габарите подвижного состава.

Лазерное сканирование, позволяющее в автоматизированном режиме получать детальные и высокоплотные облака точек, представляет собой технологическую основу для создания цифровых двойников инфраструктуры [2]. Однако существующий технологический парк включает разнородные платформы, принципиально различающиеся по своим метрологическим и эксплуатационным характеристикам. Это порождает проблему обоснованного выбора, где некорректное решение может привести либо к недопустимым погрешностям в оценке параметров пути, либо к неоправданному росту затрат и сроков выполнения работ.

Таким образом, целью данной работы является систематизация областей эффективного применения технологий ВЛС, МЛС и НЛС на основе сравнительного анализа их точности, производительности и эксплуатационных ограничений.

Методология

Исследование построено на сравнительном анализе характеристик и возможностей технологий. Анализ точности базируется на оценке совокупной погрешности определения координат точки, которая складывается из погреш-

ностей позиционирования платформы (GNSS-INS) — система, которая объединяет данные глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) и инерциальной навигационной системы (INS). Такая комбинация позволяет преодолеть ограничения каждой из систем.

GNSS (Global Navigation Satellite System) — это глобальная навигационная спутниковая система, которая определяет местоположение, скорость движения и время объектов на земной поверхности, в воздушном и морском пространствах. INS (Inertial Navigation System) — автономная навигационная система, которая использует принципы инерциальной навигации для определения местоположения, ориентации и скорости объекта, угловой точности сканера и точности измерения дальности по принципу времени импульсного или фазового метода [3].

Производительность оценивается комплексно через показатель линейной скорости съемки (км/ч) и удельную плотность точек на единицу площади или длины пути. Под эксплуатационными ограничениями понимаются внешние и внутренние факторы, влияющие на возможность и экономическую целесообразность проведения съемки:

- зависимость от графика движения поездов и необходимости предоставления «окон»;
- требования к метеоусловиям (облачность, видимость, осадки);
- необходимость наземного доступа и охраны оборудования;
- энергоемкость системы;
- сложность рельефа и застройки прилегающей территории, создающие «мертвые зоны».

Новизна исследования

Проведенный сравнительный анализ не ограничивается констатацией известных тех-

нических характеристик технологий лазерного сканирования. Научная новизна работы заключается в разработке и обосновании иерархической системы критериев выбора, адаптированной спецификацией к задачам диагностики железнодорожного пути. В отличие от существующих подходов, где выбор часто базируется на одном параметре (например, точности) или субъективном опыте, в данном исследовании предлагается последовательная многоуровневая модель принятия решения.

Первичным фильтром в ней выступают принципиальные метрологические требования к данным (точность, детализация), которые однозначно определяют применяемый класс технологий.

Вторичным фильтром предлагается считать операционные требования по охвату и производительности, которые оптимизируют выбор внутри группы технологий лазерного сканирования, объединенных схожестью принципиального уровня точности и детализации выходных данных.

Третичным фильтром может быть принят комплекс эксплуатационных и экономических ограничений, окончательно определяющих целесообразность применения технологии в конкретных условиях.

Кроме того, новизна заключается в четком разграничении областей использования каждой технологии в рамках единого диагностического цикла: картографирование объекта с помощью ВЛС, проведение оперативного мониторинга линейных параметров мобильным лазерным сканированием и на завершающей стадии — проведение точечного детального анализа узловых объектов на основе НЛС.

Такой системный взгляд позволяет преодолеть традиционное противопоставление технологий и рассматривать их как взаимо-

дополняющие элементы цифрового контура управления инфраструктурой.

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС)

Технология ВЛС реализуется с использованием летательных аппаратов (самолетов, вертолетов, БПЛА), оснащенных лидарными системами. Ключевым преимуществом ВЛС является высокая производительность, позволяющая за один вылет получать данные на сотни километров пути, охватывая площадь 140–200 км² за час съемки в зависимости от высоты и типа носителя [4]. Эта технология незаменима для решения задач крупномасштабного картографирования, создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ) на протяженных участках, оценки планового и высотного положения трассы в сложных топографических условиях, например при проектировании обходов или новых ходов.

Однако точность ВЛС, в первую очередь плановая, ограничена точностью бортовой инерциальной навигационной системы (БИНС) и GNSS-приемника. Типичная абсолютная точность современных систем ВЛС составляет 0,05–0,15 м в плане и 0,03–0,10 м по высоте при полете на высоте 500–1000 м [5]. Такой уровень не позволяет достоверно оценивать субсантиметровые параметры, такие как ширина рельсовой колеи или продольные неровности рельсов. Эксплуатационные ограничения ВЛС значительны: проведение съемки требует согласования воздушного пространства, критически зависит от погодных условий (низкая облачность, осадки, сильная болтанка), а также сопряжено с высокими капитальными затратами на аренду авиатехники и организацию полетов. Как отмечается в работе [6], ВЛС эффективно для инвентаризационного обследования широких полос отвода, выявления крупных деформаций земляного полотна,

но не для детальной диагностики верхнего строения пути.

Мобильное лазерное сканирование (МЛС)

Системы МЛС, устанавливаемые на железнодорожный подвижной состав (локомотивы, мотовозы, дрезины), представляют собой оптимальный инструмент для оперативной диагностики геометрии пути. Они сочетают высокую линейную производительность (до 50–80 км/ч, то есть в ритме движения по «окнам») с повышенной точностью.

Погрешность определения координат рельсовой нити, достигаемая за счет синхронной регистрации данных сканера, GNSS и инерциального блока с последующей строгой обработкой и привязкой к исходным пунктам, может составлять 2–5 мм в плане и по высоте [7]. Это позволяет не только оценивать планово-высотное положение пути, но и детально анализировать его геометрические параметры, включая ширину колеи, положение рельсовых нитей в плане и профиле, а также выявлять просадки, перекосы и другие дефекты.

Главным эксплуатационным ограничением МЛС является жесткая привязка к «окнам» в графике движения поездов, что усложняет логистику и увеличивает сроки выполнения работ на напряженных участках. Кроме того, при съемке с высокой скоростью возникает проблема «мертвых зон» в зоне непосредственно под и вокруг платформы, а также ограниченного качества данных о подрельсовом основании и откосах земляного полотна из-за геометрии обзора. Как показано в исследованиях [8], МЛС является базовой технологией для создания цифровых моделей рельсовой колеи (Digital Track Model) и регулярного мониторинга ее состояния в рамках системы путеизмерений.

Наземное лазерное сканирование (НЛС)

Стационарные наземные лазерные сканеры (НЛС) обеспечивают наивысшую детальность и локальную точность данных, которая может достигать 1–3 мм на расстоянии до 50–100 м в зависимости от класса прибора [9]. Эта технология является незаменимой для детального обследования сложных инженерных объектов: мостов, путепроводов, тоннелей, станционных сооружений, стрелочных переводов. НЛС позволяет получать исчерпывающую информацию о состоянии не только верхнего строения пути, но и всех элементов искусственных сооружений, включая геометрию опор, деформации пролетных строений, износ контактной сети, фиксацию трещин и сколов.

Основным недостатком НЛС является крайне низкая производительность при обследовании протяженных линейных объектов. Процесс требует многократной перестановки сканера (с шагом 20–70 м) для обеспечения перекрытия сканов, сопряжен с организацией наземного доступа и охраны оборудования на каждом створе, что делает его трудоемким и продолжительным. Эксплуатация также сильно зависит от погодных условий (дождь, туман, прямые солнечные лучи) и наличия препятствий на линии визирования. Таким образом, как отмечено в методических рекомендациях [10], НЛС применяется точно, для решения локальных задач высокой важности, где критична максимальная детализация, например, для исполнительной съемки после ремонта стрелки или оценки дефектов в теле тоннеля.

Сравнительный анализ и критерии выбора

На основании проведенного анализа можно сформулировать иерархическую систему критериев выбора технологии лазерного

сканирования для диагностики железнодорожного пути. Сравнительный анализ технических и эксплуатационных параметров по видам лазерного сканирования приведен в табл. 1.

Первичным и определяющим критерием является требуемая точность и детализация выходных данных. Если задача ограничивается оценкой деформаций земляного полотна или общим картографированием полосы отвода, достаточно данных ВЛС. Если необходим точный мониторинг геометрии рельсовой колеи, используется МЛС. Для субмиллиметрового анализа конструкций искусственных сооружений выбирается НЛС.

Вторичным критерием выступает требуемая производительность и охват, которые напрямую коррелируют с экономикой проекта. Для съемки участков длиной в сотни километров ВЛС не имеет альтернатив по скорости. Для планово-предупредительного мониторинга состояния пути на сети протяженностью десятки километров оптимально МЛС. НЛС не рассматривается как метод сплошного обследования пути.

Третий уровень критериев — эксплуатационные ограничения, которые могут стать решающими. Наличие частых и длительных «окон» делает возможным применение МЛС. Отсутствие таких «окон» или необходимость съемки в активном движении (с определенными оговорками) может сместить выбор в сторону специализированных систем ВЛС с БПЛА или наземных сканирующих систем, устанавливаемых на ходовые тележки. Сложный рельеф и застройка делают ВЛС и МЛС взаимодополняющими для устранения «мертвых зон».

Рекомендуемые области применения технологий в зависимости от решаемых задач диагностики приведены в табл. 2.

Практическая и научная ценность

Результаты исследования обладают значительной практической ценностью для проектных, изыскательских и эксплуатационных подразделений железнодорожного транспорта. Разработанная система критериев предоставляет инженерам и технологам структурированный алгоритм для обоснования выбора технологии сканирования при составлении технических заданий и смет на выполнение диагностических работ. Это позволяет минимизировать риски получения данных неудовлетворительного качества или неоправданных финансовых затрат. Практические рекомендации способствуют оптимизации парка геодезического оборудования и повышению эффективности планово-предупредительных работ.

Научная ценность работы заключается в разработке методики комплексной оценки геотехнических изысканий и мониторинга для линейных сооружений. Исследование вносит вклад в технологию проектирования и эксплуатации транспортной инфраструктуры, формализуя взаимосвязь между техническими требованиями к диагностике, возможностями современных сенсорных технологий и эксплуатационными реалиями. Работа выполняет синтезирующую функцию, объединяя знания из области геодезии, фотограмметрии, навигации железнодорожного дела. Полученные выводы служат основой для дальнейших научных изысканий, в частности, в направлении разработки интеллектуальных систем поддержки принятия решений (DSS) для автоматизированного планирования диагностических кампаний, а также для создания алгоритмов слияния разнородных данных сканирования в единую прецизионную цифровую модель железнодорожного объекта (ВМ-модель), что является актуальной задачей в рамках концепции «Цифровая железная дорога».

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ технических и эксплуатационных параметров технологий лазерного сканирования

Параметр/Технология	Воздушное лазерное сканирование (ВЛС)	Мобильное лазерное сканирование (МЛС) на ж/д платформе	Наземное лазерное сканирование (НЛС)
Точность (абсолютная)	5–15 см (план) 3–10 см (профиль)	2–5 мм (относительная вдоль пути)	1–5 мм (на дистанции до 50 м)
Детализация (плотность точек)	10–50 тчк/м ²	500–5000 тчк/м ² (вдоль пути)	До 1000 тчк/м ² (на объекте)
Производительность (линейная)	140–200 км ² /час (сотни км пути)	50–80 км/ч (в «окно»)	0,5–2 км/сутки (при многократных установках)
Зависимость от графика движения	Отсутствует	Абсолютная (требуется «окно»)	Высокая (необходим доступ в габарит)
Зависимость от погоды	Критическая (нет полетов в облачность, дождь, ветер)	Умеренная (снег, дождь ухуд- шают получаемые данные)	Высокая (дождь, туман дела- ют съемку невозможной)
Основные «мертвые зоны»	Под мостами, в глубоких выемах, под густой растительностью	Под тележкой, низ откосов, частично балластная призма	Области, требующие перестановки сканера (эффект затенения)
Экономика (условная стоимость 1 км)	Низкая (1500–4500 руб./км) (при больших объемах)	Средняя (3000–8000 руб./км)	Высокая (от 15 000 до 50 000 и более руб./км)
Ключевое преимущество	Скорость и охват больших территорий для ЦММ/ЦМР	Оптимальный баланс точ- ности и производительности для контроля геометрии пути	Максимальная детализация и точность для обследования сложных объектов
Основное ограничение	Недостаточная точность для диагностики верхнего строения пути	Жесткая привязка к «окнам» и ограниченный обзор поперечного профиля	Крайне низкая скорость обследования протяженных объектов

ТАБЛИЦА 2. Рекомендуемые области применения технологий в зависимости от решаемых задач диагностики

Цель диагностики / Объект обследования	Рекомендуемая техно- логия (приоритет)	Альтернативная или допол- няющая технология	Получаемый результат и комментарии
Создание/обновление ЦММ, ЦМР полосы отвода	ВЛС (с беспилотного воздушного судна (БВС) или самолета)	Съемка с ИСЗ, аэрофотосъемка	Сплошная модель рельефа и местности шириной до 500 м. Основа для проектирования
Оценка плана и продольного профиля трассы	ВЛС	МЛС (при наличии «окон»)	Выявление крупных отклонений оси пути, оценка кривизны
Мониторинг геометрии рельсовой колеи (ширина, уровень, направление)	МЛС	Ручные измерения, вагоны-путеизмерители	Digital Track Model. Основной метод для регулярного контроля
Обследование земляного полотна (деформации откосов, косогоров)	ВЛС + МЛС	—	ВЛС — общий охват, МЛС — детализация вблизи пути. Комплексный анализ
Детальное обследование искусственных сооружений (мосты, путепроводы)	НЛС (внутри и снаружи)	МЛС (для общих деформаций пролетного строения)	Трехмерная BIM-модель конструкции для оценки износа, трещин, деформаций

Окончание табл. 2

Цель диагностики / Объект обследования	Рекомендуемая технология (приоритет)	Альтернативная или дополняющая технология	Получаемый результат и комментарии
Обследование тоннелей (деформации обделки, габариты)	НЛС (или мобильное для тоннелей)	Геодезические методы; мобильное сканирование	Точная модель внутренней поверхности
Инвентаризация и обследование станционных комплексов, стрелочных переводов	НЛС + МЛС (для ключевых узлов) + (для съемки путей)	—	НЛС — детальная модель стрелки, МЛС — положение путей в плане
Исполнительная съемка после ремонта/строительства железнодорожных путей	НЛС + МЛС (для локальных объектов) + (для пути)	Геодезические методы	Высокоточное сравнение «как построено» с проектом
Выявление препятствий в габарите приближения строений	МЛС + НЛС (основное) + (уточнение)	—	Анализ положения объектов вблизи пути

Примечание к таблицам. Приведенные количественные показатели являются обобщенными и могут варьироваться в зависимости от конкретного класса оборудования, условий съемки и методов обработки данных. Предложенная область применения основана на оптимальном соотношении «точность — производительность — затраты».

Заключение

Проведенный сравнительный анализ демонстрирует, что технологии воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования не конкурируют, а образуют единый технологический комплекс для многоуровневой диагностики железнодорожной инфраструктуры. ВЛС служит для решения задач верхнего уровня — создания геопространственной основы и выявления грубых деформаций. МЛС является основным рабочим инструментом для регулярного высокоточного контроля геометрии пути. НЛС служит для детального анализа уникальных и ответственных объектов.

Критериями выбора являются иерархически выстроенные требования: целевая точность; необходимая производительность и охват; преодолимость эксплуатационных ограничений. Перспективой развития является дальнейшая интеграция данных от разных платформ в единую информационную среду (BIM/GIS-платформу), а также автоматизация процессов дешифрирования дефектов на

основе алгоритмов машинного обучения, что позволит перейти от диагностики текущего состояния к прогнозной аналитике и оптимизации жизненного цикла объектов инфраструктуры.

Список литературы

- СП 119.13330.2024. СНиП 32-01-95. Железные дороги колеи 1520 мм. М.: Минстрой России, 2024.
- Воронов А.С., Зотов С.В. Цифровые двойники в транспортном строительстве: от концепции к внедрению // Транспортное строительство. 2020. № 5. С. 12–15.
- Землянов Д. В., Полецкий В. П. Теория и практика лазерного сканирования: учебное пособие. М.: Изд-во МИИГАиК, 2018. 164 с.
- Кашицин П. А. Применение воздушного лазерного сканирования для мониторинга линейных объектов на примере железных дорог // Геопрофи. 2019. № 3. С. 34–39.
- Глинский С.П., Карпилов В.С. Оценка точности воздушного лазерного сканирования при

инвентаризации железнодорожной инфраструктуры // Геодезия и картография. 2021. Т. 82, № 7. С. 44–52.

6. Инструкция по обследованию земляного полотна железных дорог с применением дистанционных методов (ВЛС, БПЛА). М.: ОАО «РЖД», 2018. 52 с.

7. Медиокритский С. О., Федоров Р. К. Точность мобильного лазерного сканирования при определении параметров железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. 2020. № 2. С. 63–70.

8. Чесноков М. И., Макаров А. В. Наземное лазерное сканирование в обследовании мостовых сооружений // Вестник мостостроения. 2022. № 1 (95). С. 28–35.

9. РД-102-011-ОАО «РЖД». Руководство по геодезическому контролю и исполнительной съемке при строительстве и реконструкции искусственных сооружений с применением НЛС. М.: ОАО «РЖД», 2021. 65 с.

10. Цифровая железная дорога: концепция и пути реализации. М.: ОАО «РЖД», 2020. 80 с.

11. Иванов В. Н., Петров Е. А. Геоинформационные системы в транспортном строительстве. СПб.: ПГУПС, 2021. 218 с.

12. Смирнов А. В. Современные методы геодезического мониторинга транспортных сооружений // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. № 4. С. 55–62.

13. Петров И. С., Соколов Н. В. Автоматизация обработки данных лазерного сканирования в задачах диагностики пути // Автоматика, связь, информатика. 2022. № 6. С. 24–29.

14. Кузнецов Д. М. Интеграция разнородных геопространственных данных для создания цифровых моделей железных дорог // Геодезия и картография. 2023. № 2. С. 38–45.

Received: 20.02.2026

Accepted: 14.04.2026

Контактная информация:

ЧЕСНОВИЧ Федор Владимирович — аспирант кафедры «Изыскания и проектирование железных дорог»; fedorkocmoc@gmail.com

Comparative Analysis of Aerial, Mobile and Terrestrial Laser Scanning Technologies for Railway Track Diagnostics: Selection Criteria Based on Accuracy, Productivity and Operational Constraints

F. V. Chesnovich

St. Petersburg State Public Institution “Directorate of Transport Construction”, 8 Neishlotskiy lane, Saint Petersburg, 194044, Russia

For citation: *Chesnovich F. V. Comparative Analysis of Aerial, Mobile and Terrestrial Laser Scanning Technologies for Railway Track Diagnostics: Selection Criteria Based on Accuracy, Productivity and Operational Constraints // Proceedings of Petersburg State Transport University, 2026. Vol. 23, iss. 2. Pp. 299–308. DOI: 10.20295/1815-588X-2026-2-299-308 (In Russian)*

Abstract

Objective: to consider the necessity of developing and substantiating the choice of optimal laser scanning technology for solving railway track diagnostics problems in the context of a variety of modern surveying methods. The relevance of the work is due to the need to formalize the selection process between aerial (ALS), mobile (MLS) and terrestrial (TLS) laser scanning to obtain reliable spatial information about

infrastructure objects. **Methods:** the research is based on a comparative analysis of technical and operational parameters of the three technologies. The comparison was carried out according to a set of criteria including such parameters as: absolute accuracy, detail (point density), linear productivity, dependence on train traffic schedule, dependence on weather conditions, main “dead zones”, economics (conditional cost of surveying 1 km). The analysis was performed taking into account the specifics of linearly extended and point objects of railway infrastructure. **Results:** the study found that the effective application of each technology is determined by the specifics of the engineering tasks to be solved. A hierarchical priority structure of choice is revealed, where the requirements for metric accuracy and detail of the model act as a dominant factor (primary filter). This filter sets the permissible range of productivity and technical capabilities, which in turn are adjusted by the economic feasibility and operational constraints of a particular project. Also, areas of effective application for each technology were determined. **Practical importance:** the formulated criteria make it possible to formalize the procedure of technological audit at the stage of pre-design surveys. The application of the developed approach minimizes the risks of obtaining unreliable data, optimizes costs and ensures the required completeness and detail of initial information for subsequent design, construction, reconstruction and maintenance of digital infrastructure models (BIM/TIM).

Keywords: laser scanning, railway track diagnostics, aerial laser scanning (ALS), mobile laser scanning (MLS), terrestrial laser scanning (TLS), accuracy, productivity, digital track model

References

1. SP 119.13330.2024. SNiP 32-01-95. Zheleznyye dorogi kolei 1520 mm [Set of Rules 119.13330.2024. Railways of 1520 mm gauge]. Moscow, *Minstroy Rossii [Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation Publ.]*, 2024. (In Russian)
2. Voronov A. S., Zotov S. V. Tsifrovyye dvoyniki v transportnom stroitel'stve: ot kontseptsii k vnedreniyu [Digital Twins in Transport Construction: From Concept to Implementation], *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*, 2020, no. 5, pp. 12–15. (In Russian)
3. Zemlyanov D. V., Poletskij V. P. Teoriya i praktika lazernogo skanirovaniya [Theory and Practice of Laser Scanning], Moscow, *Izd-vo MIIGAiK [Moscow State University of Geodesy and Cartography Publ.]*, 2018, 164 p. (In Russian)
4. Kashitsin P. A. Primenenie vozdušnogo lazernogo skanirovaniya dlya monitoringa lineynykh ob'ektov na primere zheleznykh dorog [Application of Aerial Laser Scanning for Monitoring Linear Objects on the Example of Railways], *Geoprofi [Geoprofi]*, 2019, no. 3, pp. 34–39. (In Russian)
5. Glinskij S. P., Karpilov V. S. Otsenka tochnosti vozdušnogo lazernogo skanirovaniya pri inventarizatsii zheleznodorozhnoy infrastruktury [Accuracy Assessment of Aerial Laser Scanning for Railway Infrastructure Inventory], *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 2021, vol. 82, no. 7, pp. 44–52. (In Russian)
6. Instruksiya po obsledovaniyu zemlyanogo polotna zheleznykh dorog s primeneniem distantsionnykh metodov (VLS, BPLA) [Instruction for Inspection of Railway Subgrade Using Remote Methods (ALS, UAV)], Moscow, *OAO “RZhD” [JSC Russian Railways Publ.]*, 2018, 52 p. (In Russian)
7. Mediokritskij S. O., Fedorov R. K. Tochnost' mobil'nogo lazernogo skanirovaniya pri opredelenii parametrov zheleznodorozhnogo puti [Accuracy of Mobile Laser Scanning in Determining Railway Track Parameters], *Nauka i tekhnika transporta [Science and Transport Technology]*, 2020, no. 2, pp. 63–70. (In Russian)
8. Chesnokov M. I., Makarov A. V. Nazemnoe lazernoe skanirovanie v obsledovanii mostovykh sooruzheniy [Terrestrial Laser Scanning in Bridge Inspection], *Vestnik mostostroeniya [Bridge Engineering Bulletin]*, 2022, no. 1 (95), pp. 28–35. (In Russian)
9. RD-102-011-OAO “RZhD”. Rukovodstvo po geodezicheskomu kontrolyu i ispolnitel'noy s'yomke pri stroitel'stve i rekonstruktsii iskusstvennykh sooruzheniy s primeneniem NLS [Guidelines for Geodetic

Control and As-Built Surveying During Construction and Reconstruction of Artificial Structures Using TLS], *OAO "RZhD" [JSC Russian Railways Publ.]*, Moscow, 2021, 65 p. (In Russian)

10. Tsifrovaya zheleznaya doroga: kontsepsiya i puti realizatsii [Digital Railway: Concept and Implementation Paths], Moscow, *OAO "RZhD" [JSC Russian Railways Publ.]*, 2020, 80 p. (In Russian)

11. Ivanov V. N., Petrov E. A. Geoinformatsionnye sistemy v transportnom stroitel'stve [Geoinformation Systems in Transport Construction], Saint Petersburg, *PGUPS [Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University]*, 2021, 218 p. (In Russian)

12. Smirnov A. V. Sovremennye metody geodezicheskogo monitoringa transportnykh sooruzheniy [Modern Methods of Geodetic Monitoring of Transport Structures], *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"yomka [Proceedings of Universities. Geodesy and Aerial Photography]*, 2021, no. 4, pp. 55–62. (In Russian)

13. Petrov I. S., Sokolov N. V. Avtomatizatsiya obrabotki dannykh lazernogo skanirovaniya v zadachakh diagnostiki puti [Automation of Laser Scanning Data Processing in Track Diagnostics], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communication, Informatics]*, 2022, no. 6, pp. 24–29. (In Russian)

14. Kuznetsov D. M. Integratsiya raznorodnykh geoprostranstvennykh dannykh dlya sozdaniya tsifrovyykh modeley zheleznykh dorog [Integration of Heterogeneous Geospatial Data for Digital Railway Models], *Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography]*, 2023, no. 2, pp. 38–45. (In Russian)

Received: February 20, 2026

Accepted: April 14, 2026

Author's information:

Fedor V. CHESNOVICH — Postgraduate Student of the Department "Surveys and Railway Design"; fedorkocmoc@gmail.com