

ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ/LAND MANAGEMENT, CADASTRE AND LAND MONITORING

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20>

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ LIDAR-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ КАДАСТРОВЫХ СЪЕМОК

Научная статья

Трофимов И.Ю.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0003-1327-4601;

¹Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (trofimov_ivan_92[at]mail.ru)

Аннотация

В представленной работе рассматриваются современные аспекты интеграции беспилотных летательных аппаратов и технологии лазерного сканирования LiDAR (Light Detection and Ranging) в систему кадастровых работ как инновационной методологии повышения эффективности землеустройства и картографических исследований. Проведенный анализ демонстрирует существенное превосходство комплексного применения дронов с LiDAR-оборудованием над традиционными методами геодезических изысканий, выражющееся в достижении точности измерений до 2–5 см в вертикальной плоскости и 1–3 см в горизонтальной при одновременном сокращении временных затрат на полевые работы в 5–10 раз по сравнению с наземными методами съемки. Особое внимание уделяется техническим характеристикам современных LiDAR-систем, включающим частоту сканирования 10–75 Гц, плотность облака точек до 1000 точек на квадратный метр и возможность проникновения лазерного излучения через растительный покров до 95%, что обеспечивает получение достоверной информации о рельефе местности даже в условиях густой растительности. Исследование охватывает методологические аспекты обработки данных лазерного сканирования, включая автоматическую классификацию облаков точек, создание цифровых моделей рельефа высокого разрешения и интеграцию полученной информации в существующие кадастровые информационные системы для обеспечения актуализации сведений Единого государственного реестра недвижимости.

Ключевые слова: LiDAR, беспилотные летательные аппараты, кадастровые съемки, цифровая модель рельефа, лазерное сканирование, землеустройство, геодезия.

USE OF LIDAR TECHNOLOGIES FOR CADASTRAL SURVEYS

Research article

Trofimov I.Y.^{1,*}

¹ORCID : 0000-0003-1327-4601;

¹Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

* Corresponding author (trofimov_ivan_92[at]mail.ru)

Abstract

The presented work examines modern aspects of integrating unmanned aerial vehicles and LiDAR (Light Detection and Ranging) laser scanning technology into the cadastral survey system as an innovative methodology for improving the efficiency of land management and cartographic research. The analysis demonstrates the significant superiority of the integrated use of drones with LiDAR equipment over traditional methods of geodetic surveys, achieving measurement accuracy of 2–5 cm in the vertical plane and 1–3 cm in the horizontal plane, while reducing the time required for field work by 5–10 times compared to ground-based surveying methods. Particular attention is paid to the technical characteristics of modern LiDAR systems, including a scanning frequency of 10–75 Hz, point cloud density of up to 1000 points per square metre, and the ability of laser radiation to penetrate vegetation cover by up to 95%, which ensures reliable information about the terrain even in conditions of dense vegetation. The research covers methodological aspects of laser scanning data processing, including automatic point cloud classification, creation of high-resolution digital terrain models, and integration of the obtained information into existing cadastral information systems to ensure the updating of the Unified State Register of Real Estate.

Keywords: LiDAR, unmanned aerial vehicles, cadastral surveys, digital terrain models, laser scanning, land management, geodesy.

Введение

Современное развитие технологий дистанционного зондирования земной поверхности характеризуется интенсивным внедрением инновационных методов сбора и обработки пространственных данных, среди которых особое место занимает технология воздушного лазерного сканирования с применением беспилотных летательных аппаратов. Традиционные подходы к выполнению кадастровых работ, основанные на использовании наземных геодезических инструментов и методов фотограмметрической обработки аэрофотоснимков, в условиях возрастающих требований к точности, оперативности и экономической эффективности землеустройства демонстрируют существенные ограничения, связанные с высокими трудозатратами, зависимостью от метеорологических условий и невозможностью обеспечения детального картографирования обширных территорий в сжатые временные рамки.

Теоретическую основу исследования составляют научные труды в области землеустройства, кадастра, правового регулирования отношений, связанных с применением БПЛА в кадастровой деятельности [1], [3], [4], [5]. В их числе работы Е.А. Борисова Е.В. Белякова, В.А. Зазулина, Д.В. Постонен, С.С. Нехина и др. [6], [7], [9], [10].

Методы и принципы исследования

Целью настоящего исследования является комплексный анализ технических возможностей, методологических особенностей и практических аспектов применения беспилотных летательных аппаратов, оснащенных LiDAR-оборудованием, для решения задач кадастрового учета, землеустройства и мониторинга земельных ресурсов в современных условиях развития геоинформационных технологий и автоматизации процессов пространственного анализа.

Предметом исследования являются комплексная система применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оснащенных LiDAR-оборудованием, для решения задач кадастровых работ, землеустройства и мониторинга земельных ресурсов.

Теоретическую основу исследования составляют научные труды в области землеустройства, кадастра, правового регулирования отношений, связанных с применением БПЛА в кадастровой деятельности. В процессе работы использовались общенаучные методы исследования, опирающиеся на системный подход: статистический, абстрактно-логический, картографический, анализ и синтез, наблюдение и сравнение.

Основные результаты

Развитие микроэлектронной базы, совершенствование лазерных технологий и появление компактных высокоточных инерциальных навигационных систем создали предпосылки для революционного изменения подходов к проведению кадастровых изысканий посредством интеграции технологий LiDAR и беспилотной авиации. Данное технологическое решение обеспечивает получение трёхмерных пространственных данных с беспрецедентной детализацией и точностью, позволяя формировать высокоточные цифровые модели рельефа местности, автоматически классифицировать объекты земной поверхности и осуществлять мониторинг изменений землепользования в режиме, приближающемся к реальному времени.



Рисунок 1 - Система лазерного лидарного сканирования БПЛА
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.1>

Актуальность исследования применения дронов с LiDAR-оборудованием в кадастровой деятельности обусловлена необходимостью модернизации существующей системы государственного кадастрового учета и мониторинга земель, повышения качества и достоверности сведений Единого государственного реестра недвижимости, а также обеспечения эффективного контроля за целевым использованием земельных ресурсов. В контексте цифровизации государственных услуг и внедрения технологий "умного землепользования" применение автоматизированных систем сбора геопространственных данных становится критически важным элементом современной инфраструктуры управления земельными отношениями.

Технология лазерного дальномерирования LiDAR представляет собой активный метод дистанционного зондирования, базирующийся на принципе измерения времени прохождения импульса электромагнитного излучения в оптическом диапазоне от источника до объекта отражения и обратно к приёмнику, что позволяет с высокой точностью определять трёхмерные координаты точек земной поверхности и расположенных на ней объектов. Фундаментальным физическим принципом функционирования лазерных дальномеров является зависимость между расстоянием до цели D и временем распространения светового импульса t, выражаемая соотношением $D = c \cdot t/2$, где c представляет скорость

света в вакууме, а коэффициент 2 учитывает двойной путь прохождения излучения от передатчика до отражающей поверхности и обратно к приёмнику.

Современные воздушные LiDAR-системы, интегрируемые с беспилотными летательными аппаратами, функционируют преимущественно в импульсном режиме, характеризующемся генерацией коротких лазерных импульсов длительностью от 1 до 10 наносекунд с частотой следования от нескольких десятков герц до нескольких килогерц. Использование излучения в ближнем инфракрасном диапазоне спектра с длиной волны 905–1064 нм обеспечивает оптимальное сочетание безопасности для человеческого зрения, эффективности отражения от различных типов земной поверхности и минимизации влияния атмосферных помех на качество регистрируемых сигналов.

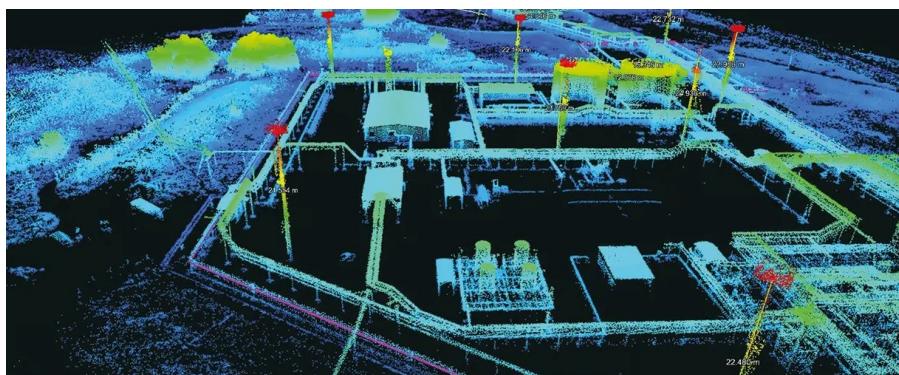


Рисунок 2 - Съемка рельефа земной поверхности территории леса

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.2>

Принципиальная архитектура бортовой LiDAR-системы включает несколько взаимосвязанных подсистем, обеспечивающих комплексное решение задач трёхмерного картографирования: лазерный передатчик с системой формирования и направления луча, высокочувствительный фотоприёмник с аналого-цифровой системой обработки сигналов, прецизионную инерциальную навигационную систему IMU (Inertial Measurement Unit) для определения пространственной ориентации платформы, GNSS-приёмник для геодезической привязки измерений и специализированный вычислительный модуль для синхронизации работы компонентов и предварительной обработки данных.

Особенностью LiDAR-систем, интегрируемых с малогабаритными беспилотными платформами, является необходимость минимизации массы и энергопотребления при сохранении высоких метрологических характеристик, что достигается применением твердотельных лазерных источников, компактных MEMS-датчиков инерциальных параметров и специализированных микропроцессорных систем реального времени. Современные бортовые LiDAR-модули для дронов характеризуются массой от 0,6 до 2,5 килограммов, энергопотреблением 20–50 ватт и обеспечивают точность измерения расстояний на уровне 1–5 сантиметров при дальности действия до 100–150 метров в зависимости от отражательной способности целей.

Формирование трёхмерного облака точек осуществляется посредством сканирования лазерным лучом пространства под летательным аппаратом с использованием различных механизмов отклонения луча, включающих врачающиеся зеркальные призмы, качающиеся зеркала или матричные сканирующие системы, обеспечивающие покрытие местности шириной от нескольких десятков до нескольких сотен метров в зависимости от высоты полёта и характеристик сканирующего механизма. Плотность получаемого облака точек, определяющая детальность результирующих цифровых моделей, зависит от частоты лазерных импульсов, скорости сканирования, высоты и скорости полёта носителя и может составлять от десятков до тысяч точек на квадратный метр поверхности.

Анализ временной структуры отражённого сигнала позволяет выделить первое отражение от верхней границы растительного покрова, промежуточные отражения от ветвей и листьев и последнее отражение от поверхности почвы, обеспечивая возможность автоматической классификации точек облака по типам отражающих объектов и создания цифровых моделей как поверхности растительности, так и истинного рельефа местности.

3.1. Технические характеристики современных LiDAR-систем для беспилотных платформ

Современный рынок LiDAR-оборудования для беспилотных летательных аппаратов характеризуется широким спектром технических решений, различающихся по принципам сканирования, дальности действия, точностным характеристикам и функциональным возможностям, что обусловлено разнообразием задач дистанционного зондирования и требований различных отраслей применения. Ключевые технические параметры, определяющие пригодность LiDAR-систем для кадастровых применений, включают точность измерения расстояний, угловое разрешение сканирования, частоту лазерных импульсов, максимальную дальность обнаружения целей с различной отражательной способностью и скорость формирования облака точек.

Точность измерения расстояний современных воздушных LiDAR-систем определяется совокупностью факторов, включающих стабильность характеристик лазерного излучения, точность временных измерений в приёмном тракте, качество калибровки инерциальной навигационной системы и алгоритмов компенсации систематических погрешностей. Типичные значения среднеквадратичной погрешности определения расстояний для современных систем составляют ±1-5 сантиметров при дальности действия до 100 метров, что обеспечивает соответствие требованиям точности кадастровых съёмок согласно действующим нормативным документам.



Таблица 1 - Сравнение технологий дистанционного зондирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.3>

Параметр сравнения	Традиционная фотограмметрия	LiDAR с БПЛА	Наземные геодезические методы
Точность измерений (вертикальная/горизонтальная), мм	50–100 / 30–70	20–50 / 10–30	1–2 / 1–2
Глубина проникновения растительности	Отсутствует	До 95% проникновения	Не применимо
Зависимость от освещенности	Критическая зависимость	Независимость	Независимость
Скорость сбора данных	Высокая (при обработке)	Очень высокая	Низкая
Стоимость оборудования	Низкая	Высокая	Средняя
Сложность обработки данных	Высокая сложность	Средняя сложность	Низкая окая сложность
Дальность обнаружения	Ограничена высотой полета	80–120 м (зависит от отражательной способности)	До 5 км (тахеометр)
Возможность работы в сложных метеоусловиях	Ограниченная	Высокая устойчивость	Зависит от погоды

Частота лазерных импульсов, определяющая скорость сбора пространственных данных, в современных системах варьируется от 28 герц для простейших одноканальных дальномеров до 10–50 килогерц для многоканальных сканирующих систем высокого разрешения. Увеличение частоты импульсов прямо пропорционально влияет на плотность получаемого облака точек при фиксированной скорости полёта носителя, однако ограничивается энергетическими возможностями лазерного передатчика и требованиями электромагнитной совместимости с другими системами беспилотного аппарата.

Угловое разрешение сканирующих LiDAR-систем, характеризующее минимальный угол между соседними лазерными лучами в процессе сканирования, составляет от 0,1 до 1 углового градуса и определяет пространственную детализацию результирующих измерений на земной поверхности. При полёте на высоте 100 метров угловое разрешение 0,25 градуса обеспечивает расстояние между соседними точками измерений на поверхности земли порядка 0,4–0,5 метров, что является достаточным для решения большинства задач кадастрового картографирования.

Максимальная дальность обнаружения LiDAR-систем существенно зависит от отражательной способности целей и условий распространения лазерного излучения в атмосфере. Для объектов с отражательной способностью 90% (например, свежий снег или белые поверхности) современные системы обеспечивают дальность действия 150–200 метров, тогда как для объектов с низкой отражательной способностью 10% (тёмная почва, асфальт) дальность снижается до 50–80 метров. Такие характеристики позволяют проводить съёмку с оптимальных для беспилотных аппаратов высот 80–120 метров, обеспечивая приемлемую детализацию при соблюдении требований безопасности полётов.

Скорость формирования облака точек, измеряемая в количестве точек в секунду, для современных систем составляет от нескольких десятков тысяч до миллиона точек в секунду. Высокая производительность систем позволяет обеспечивать плотность покрытия местности от 10–50 точек на квадратный метр для задач общего картографирования до 200–1000 точек на квадратный метр для детального моделирования сложных объектов, что существенно превышает возможности традиционных методов геодезической съёмки по производительности сбора пространственных данных.

Таблица 2 - Технические характеристики лидара

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.4>

Характеристика	Типовые значения	Применение в кадастре
Длина волны лазера	905–1550 нм	Инфракрасный спектр для всепогодности
Частота импульсов	28 Гц – 10 кГц	Высокая частота для детализации границ
Точность измерения расстояния	±1–5 см	Соответствие требованиям точности межевания

Характеристика	Типовые значения	Применение в кадастре
Угловое разрешение	0,25°-1°	Определение четких границ участков
Частота сканирования	10–75 Гц	Оперативность полевых работ
Количество возвратных импульсов	1–4 возврата	Различение земной поверхности и объектов
Максимальная дальность (при 10% отражении)	26–120 м	Покрытие участков различной площади
Плотность облака точек	100–1000 точек/м ²	Создание детальных цифровых моделей
Класс безопасности лазера	Class 1M	Безопасность для операторов
Расходимость луча	20–500 мкрад	Размер пятна на земной поверхности

Класс безопасности лазерного излучения для систем, предназначенных для использования на беспилотных платформах, соответствует классу 1M согласно международному стандарту IEC 60825-1, что гарантирует безопасность для зрения человека при нормальных условиях эксплуатации без применения специальных средств защиты. Использование импульсного режима излучения с низкой средней мощностью и автоматические системы управления энергией лазера обеспечивают соблюдение всех требований по лазерной безопасности при проведении работ в населённых районах.

Расходимость лазерного луча, характеризующая увеличение диаметра пятна освещения с расстоянием, составляет для современных систем от 20 до 500 микрорадиан. При полёте на высоте 100 метров расходимость 100 микрорадиан обеспечивает диаметр пятна на земной поверхности порядка 1 сантиметра, что позволяет достигать высокого пространственного разрешения измерений и точного определения границ объектов с характерными размерами от нескольких дециметров.

Современные решения включают системы «горячей» замены батарей и возможность питания от бортовой сети беспилотного аппарата, что позволяет увеличить продолжительность непрерывных съёмок до нескольких часов при использовании соответствующих носителей большой грузоподъёмности.

3.2. Преимущества использования дронов с LiDAR-оборудованием в кадастровых работах

Интеграция беспилотных летательных аппаратов с LiDAR-оборудованием в практику кадастровых работ обеспечивает кардинальное повышение эффективности и качества геодезических изысканий по сравнению с традиционными наземными методами съёмки, что проявляется в существенном сокращении временных затрат на полевые работы, повышении точности и детализации получаемых пространственных данных, а также расширении функциональных возможностей мониторинга и анализа землепользования. Фундаментальным преимуществом воздушного лазерного сканирования является возможность одновременного получения высокоточной информации о рельефе местности и расположенных на ней объектах инфраструктуры в едином технологическом процессе без необходимости физического присутствия оператора в каждой точке измерений.

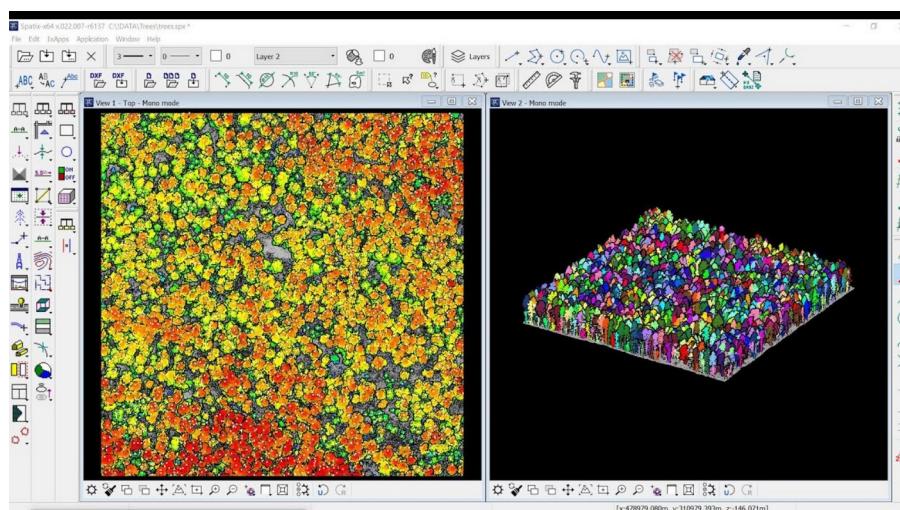


Рисунок 3 - Программный интерфейс, отображающий обработку данных лидара БПЛА в лесу в 2D и 3D режимах
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.5>

Производительность съёмочных работ с использованием дронов, оснащённых LiDAR-системами, превышает возможности традиционных наземных методов в 5–10 раз для участков площадью более 10 гектаров, что обусловлено высокой скоростью перемещения носителя и большой производительностью лазерных измерительных систем,

способных регистрировать сотни тысяч точек в секунду. Типичная скорость покрытия территории составляет 50–200 гектаров в час полётного времени в зависимости от требуемой детализации съёмки и характеристик используемого оборудования, что позволяет выполнять комплексные кадастровые работы на обширных территориях в сжатые сроки.

Точность определения координат характерных точек земельных участков при использовании современных LiDAR-систем с RTK/PPK-коррекцией достигает 2–5 сантиметров в вертикальной плоскости и 1–3 сантиметра в горизонтальной плоскости, что соответствует и превышает требования нормативных документов к точности межевых съёмок для большинства категорий земель. Такой уровень точности обеспечивается комплексным использованием высокоточных лазерных дальномеров, прецизионных инерциальных навигационных систем и дифференциальных GNSS-измерений в режиме реального времени.

Уникальной особенностью лазерного зондирования является способность проникновения излучения через растительный покров и регистрации отражений от поверхности почвы под пологом леса, кустарника или высокой травянистой растительности. Эффективность проникновения достигает 90–95% для лиственных лесов в безлистном состоянии и 30–70% для хвойных насаждений, что обеспечивает возможность определения истинного рельефа местности и границ земельных участков даже в условиях густой растительности, недоступной для традиционных методов аэрофотосъёмки.

Независимость лазерных измерений от условий естественного освещения позволяет проводить съёмки в любое время суток, включая сумеречные часы и ночное время, что существенно расширяет временные рамки выполнения полевых работ и повышает гибкость планирования производственных процессов. Кроме того, инфракрасное лазерное излучение менее подвержено влиянию атмосферных явлений, таких как дымка или лёгкий туман, по сравнению с видимым светом, используемым в фотограмметрических методах.

Автоматизация процессов сбора и первичной обработки данных в LiDAR-системах обеспечивает существенное снижение влияния человеческого фактора на качество измерений и минимизацию вероятности ошибок, связанных с субъективными факторами. Современные системы включают алгоритмы автоматической классификации облаков точек, выделения точек рельефа, растительности и антропогенных объектов, что значительно ускоряет процесс создания цифровых моделей местности и тематических карт земельных угодий.

Безопасность выполнения работ значительно повышается благодаря исключению необходимости нахождения персонала на потенциально опасных участках местности, включая крутые склоны, заболоченные территории, участки с неустойчивым грунтом или загрязнённые промышленными отходами области. Использование дистанционных методов съёмки также исключает воздействие на персонал неблагоприятных погодных условий и снижает риски, связанные с работой в труднодоступных районах.

Оперативность получения результатов измерений и возможность проведения повторных съёмок через короткие промежутки времени обеспечивают эффективный мониторинг динамики изменений землепользования, выявление несанкционированного строительства, контроль соблюдения земельного законодательства и оперативное обновление сведений государственного кадастра недвижимости. Такие возможности особенно важны для контроля использования земель сельскохозяйственного назначения, лесного фонда и территорий с особым правовым режимом.

3.3. Методология обработки данных лазерного сканирования для кадастровых целей

Обработка данных воздушного лазерного сканирования для решения задач кадастрового учёта и землеустройства представляет собой многоэтапный технологический процесс, включающий предварительную обработку исходных измерений, геодезическую привязку облака точек, автоматическую классификацию пространственных данных, создание цифровых моделей рельефа и поверхности, а также извлечение семантической информации об объектах землепользования и их границах. Методологические принципы обработки LiDAR-данных базируются на современных алгоритмах машинного обучения, статистическом анализе геометрических характеристик облаков точек и интеграции пространственных данных различного происхождения в единых геоинформационных системах.

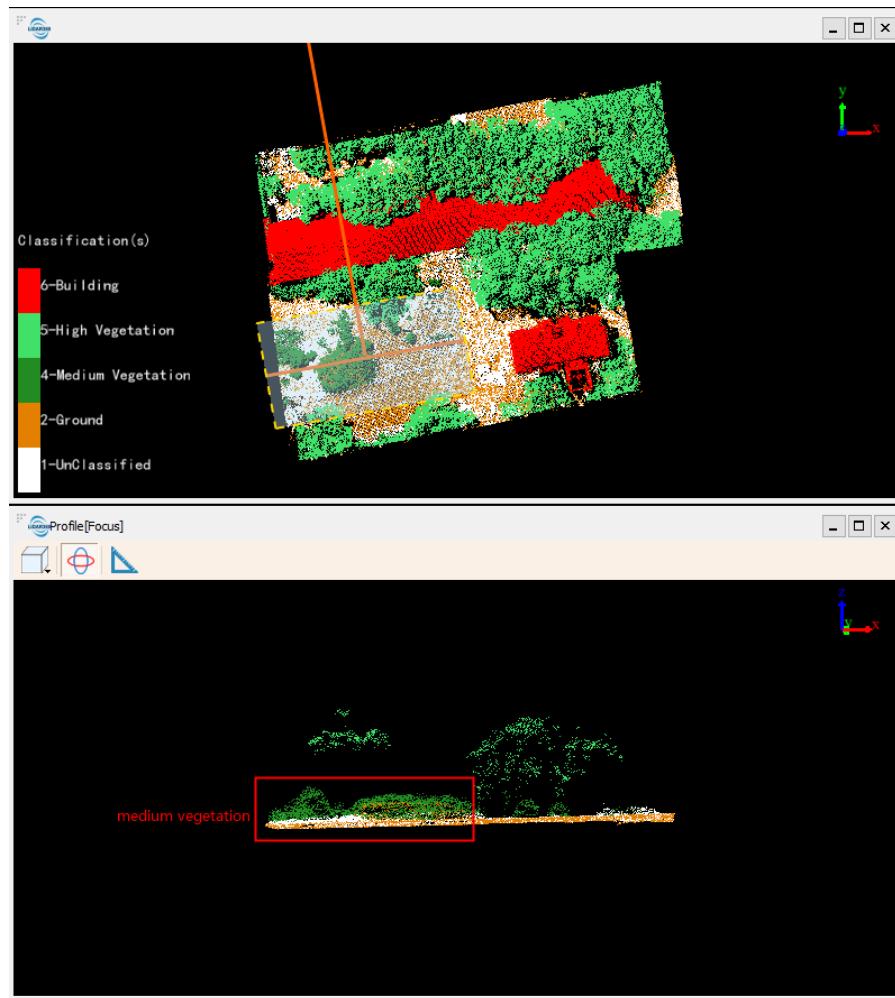


Рисунок 4 - Классификация облака точек LiDAR, отображающая здания, растительность и землю в цветовой кодировке

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.6>

Первичная обработка данных лазерного сканирования начинается с процедуры временной синхронизации лазерных измерений с данными инерциальной навигационной системы и GNSS-приёмника, что обеспечивает точное определение пространственного положения каждого лазерного импульса в момент его излучения. Алгоритмы траекторной обработки выполняют интегрирование измерений IMU с дифференциальными GNSS-наблюдениями для получения высокоточной траектории движения беспилотного носителя с частотой до нескольких килогерц, что позволяет компенсировать влияние вибраций и маневров платформы на точность лазерных измерений.

Геодезическая привязка облака точек к системе координат государственной геодезической сети осуществляется посредством трансформации координат из бортовой системы координат LiDAR-системы в заданную проекцию с использованием параметров калибровки взаимного положения лазерного сканера и навигационных датчиков. Точность геопривязки может быть дополнительно повышенена с использованием опорных геодезических пунктов или специально установленных отражающих целей, координаты которых определяются независимыми геодезическими методами с субсантиметровой точностью.

Автоматическая классификация облаков точек представляет собой процесс разделения всего массива лазерных отражений на категории в соответствии с типами отражающих поверхностей, включающими точки рельефа (земли), растительности различной высоты, зданий и сооружений, водных поверхностей и прочих объектов. Современные алгоритмы классификации используют комплексный анализ геометрических характеристик локальных окрестностей



каждой точки, включая локальные нормали к поверхности, кривизну, плотность точек, высотные различия и статистические параметры распределения соседних точек в трёхмерном пространстве.

Таблица 3 - Этапы обработки данных лидара

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.7>

Этап обработки	Применяемые алгоритмы	Достигаемая точность	Временные затраты (на 100 га), ч
Предварительная обработка	Синхронизация IMU/GNSS, калибровка	Устранение систематических ошибок	1–2
Геодезическая привязка	Траекторная обработка RTK/PPK	±1–3 см абсолютная точность	2–4
Автоматическая классификация	Машинное обучение, нейронные сети	85–95% корректность классификации	3–6
Фильтрация точек рельефа	Морфологическая фильтрация	90–98% выделение точек земли	2–4
Создание ЦМР/ЦММ	Триангуляция Делоне, кригинг	±5–15 см СКП высот	1–3
Векторизация объектов	Детекция контуров, сегментация	±10–30 см точность границ	4–8
Контроль качества	Статистический анализ невязок	Выявление грубых погрешностей	1–2
Экспорт результатов	Конвертация в стандартные форматы	Соответствие требованиям ТЗ	0,5–1

Выделение точек рельефа из общего облака лазерных отражений выполняется с использованием итерационных алгоритмов морфологической фильтрации, основанных на анализе локальных минимумов высот и построении триангуляционной поверхности с постепенным включением точек, удовлетворяющих критериям принадлежности к земной поверхности. Эффективность алгоритмов фильтрации достигает 85–95% для открытых территорий и 70–85% для участков с густой растительностью, что обеспечивает создание высококачественных цифровых моделей рельефа без участия человека или с минимальной ручной коррекцией.

Создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей поверхности (ЦМП) осуществляется посредством интерполяции классифицированных облаков точек на регулярную сетку с заданным разрешением, typically составляющим 0,25–1,0 метра для кадастровых применений. Методы интерполяции включают триангуляцию Делоне с линейной интерполяцией внутри треугольников, радиальные базисные функции, кригинг и другие геостатистические методы, обеспечивающие оптимальное воспроизведение характеристик рельефа в зависимости от плотности исходных данных и особенностей топографии. skymec+1.

Векторизация границ земельных участков и объектов недвижимости выполняется с использованием алгоритмов автоматического выделения линейных объектов на основе анализа резких изменений высот, различий в отражательной способности поверхностей и геометрических характеристик локальных особенностей рельефа. Современные методы включают применение нейронных сетей глубокого обучения для распознавания характеристических паттернов границ участков, дорог, строений и других объектов кадастрового учёта непосредственно в облаках точек.

Контроль качества и оценка точности результатов обработки выполняется посредством сравнения автоматически извлечённых характеристик объектов с данными независимых измерений, включая наземные геодезические съёмки контрольных точек, анализ статистических параметров остаточных невязок и проверку соответствия полученных моделей действующим техническим регламентам. Типичные показатели точности создаваемых цифровых моделей рельефа составляют ±5–15 сантиметров для среднеквадратичной погрешности высот в зависимости от характера местности и плотности исходных данных лазерного сканирования.

Интеграция результатов обработки LiDAR-данных в существующие кадастровые информационные системы обеспечивается посредством экспорта пространственных данных в стандартизованные форматы обмена, включая Shape-файлы, формат LAS/LAZ для облаков точек, GeoTIFF для растровых моделей и стандарты OGC для веб-сервисов пространственных данных. Автоматизированные процедуры импорта обработанных данных в базы данных государственного кадастра недвижимости обеспечивают оперативное обновление пространственной информации и поддержание актуальности сведений земельно-кадастрового учёта.

3.4. Сравнительный анализ LiDAR-технологий и традиционных методов кадастровых съёмок

Объективная оценка эффективности применения LiDAR-технологий в комплексе с беспилотными летательными аппаратами для решения задач кадастрового учёта требует детального сравнения с традиционными методами геодезических изысканий по множественным критериям, включающим точностные характеристики получаемых результатов, производительность полевых работ, экономическую эффективность, универсальность применения в различных природно-климатических и ландшафтных условиях, а также качество и информативность итоговых

пространственных данных. Комплексный анализ преимуществ и ограничений различных методологических подходов позволяет обосновать оптимальные области применения каждой технологии и сформировать рекомендации по выбору наиболее эффективных решений для конкретных типов кадастровых работ.

Традиционные наземные геодезические методы, основанные на использовании электронных тахеометров и GNSS-приёмников, обеспечивают наивысшую точность определения координат отдельных характерных точек на уровне 1–2 миллиметров для линейных измерений и 2–3 угловых секунд для угловых наблюдений. Однако производительность таких методов ограничивается необходимостью физического посещения каждой измеряемой точки оператором с геодезическим оборудованием, что приводит к значительным временными затратам и высокой стоимости работ при съёмке обширных территорий или участков со сложными условиями доступности.

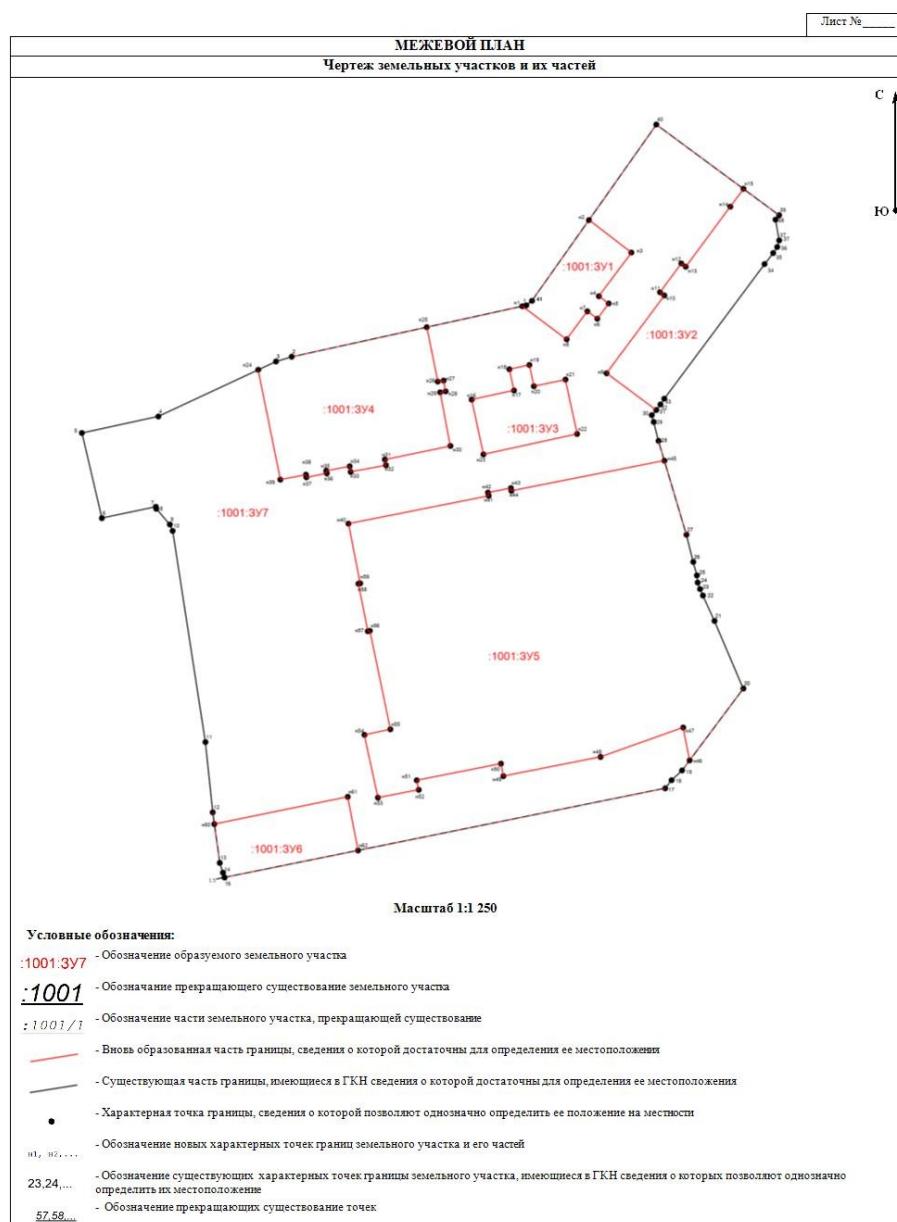


Рисунок 5 - Кадастровый план, показывающий границы и деление земельных участков с официальными обозначениями и легендой

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.8>

Фотограмметрические методы обработки аэрофотоснимков, получаемых с беспилотных платформ, характеризуются высокой информативностью результирующих материалов, включающих детальные ортофотопланы и трёхмерные модели местности с разрешением до нескольких сантиметров на местности. Основными ограничениями фотограмметрии являются критическая зависимость от условий освещения, невозможность получения информации о рельфе под пологом растительности, высокие требования к вычислительным ресурсам для обработки больших объёмов изображений и необходимость установки значительного количества опорных точек для обеспечения требуемой точности геопривязки.

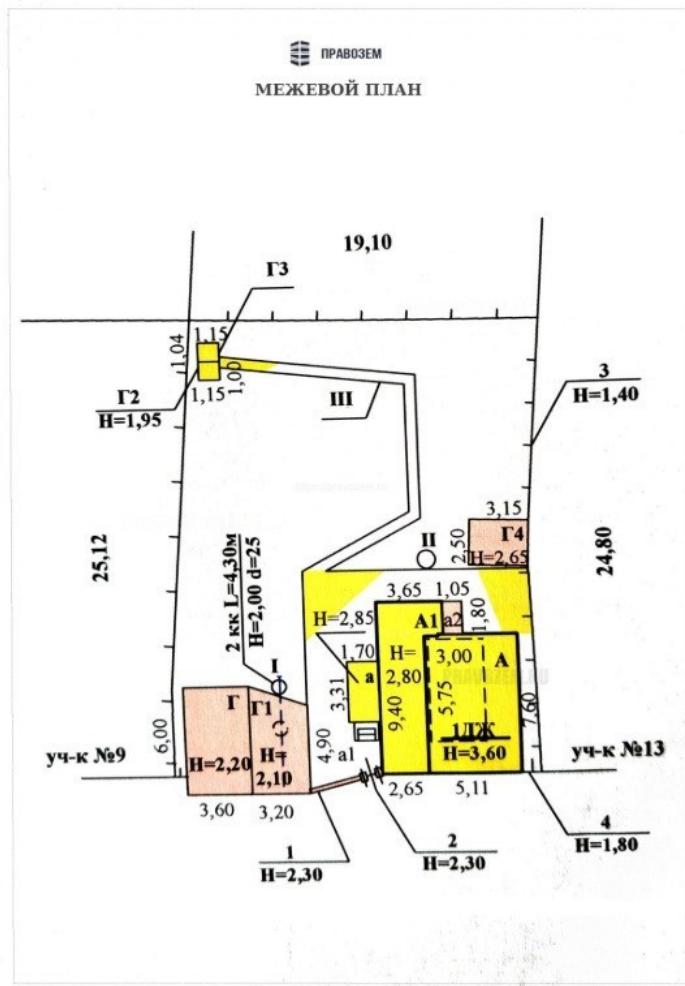


Рисунок 6 - Подробный кадастровый план земельного участка с указанием границ собственности, строений и размеров

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.9>

Воздушное лазерное сканирование с БПЛА демонстрирует оптимальное сочетание высокой точности измерений (2–5 см), исключительной производительности съёмочных работ (50–200 га/час) и независимости от условий освещения, что обеспечивает универсальность применения для широкого спектра задач кадастрового картографирования. Способность лазерного излучения проникать через растительный покров и регистрировать отражения от поверхности почвы под пологом леса представляет уникальное преимущество LiDAR-технологий, недоступное для других дистанционных методов наблюдения.

Таблица 4 - Методы исследования экономических показателей

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.164.20.10>

Экономический показатель	Наземные геодезические методы	Фотограмметрия с БПЛА	LiDAR с БПЛА	Комбинированные методы
Стоимость оборудования (млн руб.)	0,5–1,2	0,8–2,5	4–12	5–15
Производительность (га/день)	2–5	30–100	50–200	80–3000
Численность бригады (чел.)	2–3	1–2	1–2	2–3
Стоимость съемки 1 га (тыс. руб.)	8–15	3–8	2–6	1,5–4
Срок окупаемости	1–2	1–3	2–4	2–5



Экономический показатель	Наземные геодезические методы	Фотограмметрия с БПЛА	LiDAR с БПЛА	Комбинированные методы
(лет)				
Эксплуатационные расходы (тыс. руб./месяц)	50–80	30–60	80–150	100–200
Потребность в обучении персонала (часов)	120–200	200–300	300–500	400–600
Амортизация оборудования (%/год)	10–15	15–20	12–18	10–15

Экономический анализ стоимости выполнения кадастровых работ различными методами показывает существенные различия в зависимости от площади обследуемой территории и требуемой детализации съёмки. Для участков площадью менее 5 гектаров традиционные наземные методы могут оказаться более экономически эффективными благодаря отсутствию затрат на специализированное воздушное оборудование и его транспортировку к месту работ. Для территорий площадью 10–100 гектаров применение дронов с LiDAR-оборудованием обеспечивает снижение общих затрат на 20–40% при одновременном повышении качества и детализации получаемых данных.

Временные затраты на выполнение полевых работ различаются в десятки раз в зависимости от выбранной технологии. Съёмка участка площадью 100 гектаров наземными методами требует 5–10 рабочих дней полевой бригады из 2–3 специалистов, фотограмметрическая съёмка с БПЛА занимает 1–2 дня, тогда как LiDAR-съёмка может быть выполнена за 2–4 часа полётного времени. Такие различия в производительности становятся критически важными при выполнении масштабных проектов комплексных кадастровых работ или срочного обновления кадастровых данных.

Информативность результирующих материалов также существенно различается между методами. Традиционные геодезические съёмки предоставляют точные координаты ограниченного набора характерных точек, фотограмметрия обеспечивает создание детальных ортофотопланов с визуальной информацией о ситуации на местности, а LiDAR-технологии формируют трёхмерные модели высокого разрешения с автоматической классификацией объектов по типам поверхностей. Комплексное использование нескольких методов может обеспечивать оптимальное сочетание точности, информативности и экономической эффективности для решения сложных задач кадастрового учёта.

3.5. Практические аспекты внедрения LiDAR-технологий в кадастровую практику

Успешная интеграция технологий воздушного лазерного сканирования с беспилотных летательных аппаратов в существующую систему кадастровых работ требует решения комплекса практических задач, связанных с подготовкой квалифицированных кадров, адаптацией производственных процессов, модернизацией технического оснащения организаций и разработкой эффективных методов контроля качества получаемых результатов. Практическая реализация инновационных подходов к кадастровым съёмкам предполагает поэтапное внедрение новых технологий с учётом специфики региональных условий, экономических возможностей исполнителей и требований действующего законодательства в сфере земельно-имущественных отношений.

Подготовка специалистов для работы с LiDAR-оборудованием включает освоение теоретических основ лазерного зондирования, изучение принципов функционирования современных навигационных систем, получение практических навыков эксплуатации беспилотных летательных аппаратов и специализированного программного обеспечения для обработки трёхмерных пространственных данных. Программы профессиональной подготовки должны охватывать вопросы планирования съёмочных работ, настройки параметров лазерных систем, выполнения калибровочных процедур, обработки и анализа облаков точек, а также интеграции результатов в существующие геоинформационные системы и базы данных.

Экономическое обоснование внедрения LiDAR-технологий требует комплексного анализа инвестиционных затрат на приобретение оборудования, обучение персонала и модернизацию производственной инфраструктуры в сопоставлении с ожидаемым экономическим эффектом от повышения производительности работ и качества получаемых результатов. Типичный период окупаемости инвестиций в LiDAR-оборудование для кадастровых организаций составляет 2–4 года при условии достижения годового объёма съёмочных работ не менее 1000–1500 гектаров, что соответствует потребностям региональных центров кадастровых работ или крупных специализированных предприятий.

Технологические аспекты внедрения включают адаптацию существующих производственных процессов к особенностям работы с большими объёмами трёхмерных пространственных данных, модернизацию вычислительной инфраструктуры для обеспечения эффективной обработки облаков точек, содержащих миллионы измерений, и интеграцию новых технологий с существующими информационными системами кадастрового учёта. Современные LiDAR-системы генерируют объёмы данных от нескольких гигабайт до десятков терабайт за день работы, что требует развитой системы хранения, резервного копирования и высокоскоростной передачи данных.

Контроль качества результатов лазерного сканирования осуществляется посредством комплекса мероприятий, включающих проверку калибровки оборудования, анализ параметров траекторной обработки навигационных данных, оценку плотности и равномерности распределения облака точек, контроль точности геодезической привязки и сравнение автоматически извлечённых характеристик объектов с данными независимых измерений. Процедуры



контроля качества должны соответствовать требованиям действующих стандартов и обеспечивать документирование всех этапов технологического процесса для возможности последующего анализа и верификации результатов.

Интеграция результатов LiDAR-съёмки в существующие кадастровые информационные системы требует разработки специализированных программных модулей для автоматизированного импорта пространственных данных, контроля их соответствия установленным форматам и стандартам, а также обеспечения совместимости с различными версиями кадастрового программного обеспечения. Эффективная интеграция предполагает создание единых стандартов представления данных лазерного сканирования и автоматизированных процедур их валидации перед включением в официальные базы данных.

Региональные особенности внедрения LiDAR-технологий связаны с различиями в природно-климатических условиях, плотности и характере застройки территорий, развитии транспортной инфраструктуры и доступности квалифицированных кадров. В северных регионах с длительным снежным покровом требуется учёт сезонности работ и влияния снежного покрова на отражательные характеристики поверхности, в горных районах необходима адаптация алгоритмов обработки к условиям сложного рельефа, а в густонаселённых областях важно соблюдение ограничений на полёты беспилотных аппаратов в воздушном пространстве.

Перспективы масштабирования применения LiDAR-технологий в кадастровой деятельности связаны с развитием облачных сервисов обработки пространственных данных, созданием региональных центров коллективного пользования дорогостоящим оборудованием, стандартизацией технологических процессов и методов контроля качества, а также интеграцией с системами искусственного интеллекта для автоматизации извлечения семантической информации об объектах недвижимости. Развитие технологий обещает дальнейшее снижение стоимости оборудования, упрощение процедур эксплуатации и повышение уровня автоматизации всех этапов кадастровых работ.

3.6. Перспективы развития и совершенствования технологии

Современное состояние технологий воздушного лазерного сканирования и беспилотной авиации характеризуется интенсивным развитием, направленным на повышение точности измерений, увеличение производительности систем, снижение массогабаритных характеристик и стоимости оборудования, расширение функциональных возможностей автоматической обработки данных и интеграцию с технологиями искусственного интеллекта. Анализ тенденций технологического развития позволяет прогнозировать появление принципиально новых решений, которые кардинально изменят подходы к выполнению кадастровых работ и обеспечат переход к полностью автоматизированным системам мониторинга и учёта земельных ресурсов.

Развитие лазерных технологий направлено на создание сканирующих систем с увеличенной частотой импульсов до сотен килогерц, что обеспечит формирование сверхплотных облаков точек с разрешением до нескольких миллиметров и детализацией, достаточной для решения задач архитектурного обмера и технической инвентаризации зданий и сооружений. Применение многоспектральных лазерных систем с излучением на различных длинах волн позволит получать дополнительную информацию о характеристиках отражающих поверхностей, включая тип материалов, влажность почвы и состояние растительности.

Миниатюризация LiDAR-оборудования на основе применения технологий микроэлектромеханических систем (MEMS) и твердотельных сканирующих устройств обеспечит создание компактных модулей массой менее 200–300 граммов, которые могут быть установлены на малогабаритные потребительские дроны без существенного влияния на их лётные характеристики. Такие системы сделают технологии лазерного сканирования доступными для широкого круга специалистов и значительно расширят области их практического применения в кадастровой деятельности.

Интеграция технологий искусственного интеллекта и машинного обучения в алгоритмы обработки данных лазерного сканирования обеспечит автоматизацию сложных задач семантического анализа пространственной информации, включая автоматическое распознавание типов объектов недвижимости, извлечение их характеристик и формирование технических описаний в соответствии с требованиями кадастрового учёта. Нейронные сети глубокого обучения продемонстрировали высокую эффективность в задачах классификации облаков точек и могут обеспечить точность автоматического выделения объектов на уровне 90–95%.

Развитие квантовых технологий открывает перспективы создания лазерных дальномеров с квантово-ограниченной чувствительностью, способных регистрировать отражения от отдельных фотонов и обеспечивающих беспрецедентную дальность действия и точность измерений. Квантовые LiDAR-системы смогут работать на расстояниях в десятки километров с точностью определения расстояний на уровне долей миллиметра, что откроет новые возможности для мониторинга обширных территорий с высоким пространственным разрешением.

Интеграция LiDAR-технологий с системами спутникового мониторинга и анализа больших данных обеспечит создание комплексных систем непрерывного мониторинга землепользования, способных автоматически выявлять изменения в использовании земельных участков, обнаруживать несанкционированное строительство и формировать уведомления для органов государственного контроля. Такие системы будут интегрированы с базами данных кадастрового учёта и обеспечат автоматическое обновление информации о состоянии объектов недвижимости.

Развитие технологий беспилотной авиации направлено на создание автономных систем с увеличенной продолжительностью полёта до нескольких десятков часов, возможность автоматической замены батарей или дозаправки в воздухе, а также интеллектуальными алгоритмами планирования миссий и адаптации к изменяющимся условиям окружающей среды. Роботизированные технологии позволят координировать работу нескольких беспилотных аппаратов для одновременной съёмки обширных территорий и повышения общей производительности системы.

Экономические перспективы развития технологий связаны с существенным снижением стоимости LiDAR-оборудования благодаря переходу к массовому производству и применению стандартных компонентов автомобильной промышленности. Прогнозируется снижение стоимости профессиональных LiDAR-систем для дронов в 5–10 раз в течение ближайших 10 лет, что сделает эти технологии доступными для небольших кадастровых организаций и индивидуальных предпринимателей.



Заключение

Проведённое исследование демонстрирует, что интеграция беспилотных летательных аппаратов с технологиями лазерного сканирования LiDAR представляет собой революционное направление модернизации кадастровой деятельности, обеспечивающее кардинальное повышение эффективности, точности и экономической целесообразности выполнения геодезических изысканий для целей землеустройства и государственного учёта недвижимости.

Уникальная способность лазерного излучения проникать через растительный покров и обеспечивать получение достоверной информации о рельфе местности в условиях густой растительности открывает принципиально новые возможности для картографирования лесных территорий, заболоченных участков и других труднодоступных районов.

Производительность съёмочных работ с применением дронов, оснащённых LiDAR-оборудованием, превосходит возможности традиционных наземных методов в 5–10 раз, что обеспечивает кардинальное сокращение сроков выполнения комплексных кадастровых проектов и создаёт предпосылки для оперативного обновления сведений Единого государственного реестра недвижимости. Экономическая эффективность применения воздушного лазерного сканирования достигает 20–40% снижения общих затрат на кадастровые работы для проектов площадью более 100 гектаров при одновременном повышении качества и информативности получаемых материалов.

Методологические основы обработки данных лазерного сканирования, базирующиеся на современных алгоритмах автоматической классификации облаков точек, машинного обучения и геоинформационного анализа, обеспечивают высокий уровень автоматизации технологических процессов и минимизацию влияния субъективных факторов на качество результатов. Интеграция LiDAR-технологий с системами дифференциальной спутниковой навигации RTK/PPK и прецизионными инерциальными измерительными системами гарантирует геодезическую точность определения пространственных координат без необходимости установки большого количества наземных опорных пунктов.

Нормативно-правовая база Российской Федерации в области кадастровой деятельности не содержит принципиальных препятствий для широкого внедрения LiDAR-технологий, устанавливая лишь функциональные требования к точности и достоверности пространственных данных без ограничений на методы их получения.

Практические аспекты внедрения LiDAR-технологий в кадастровую практику требуют решения комплекса организационных и технических задач, включающих подготовку квалифицированных специалистов, модернизацию производственной инфраструктуры и адаптацию существующих информационных систем к работе с большими объёмами трёхмерных пространственных данных. Экономическое обоснование инвестиций в LiDAR-оборудование демонстрирует приемлемые сроки окупаемости 2–4 года для организаций с достаточным объёмом съёмочных работ, что делает эти технологии доступными для широкого круга участников рынка кадастровых услуг.

Перспективы развития технологий воздушного лазерного сканирования связаны с дальнейшим повышением точности и производительности систем, миниатюризацией оборудования, интеграцией с технологиями искусственного интеллекта и существенным снижением стоимости благодаря переходу к массовому производству. Ожидаемые технологические прорывы в области квантовой оптики, твердотельного сканирования и автономных беспилотных систем обещают появление принципиально новых возможностей для автоматизированного мониторинга землепользования и актуализации кадастровой информации в режиме реального времени.

Результаты исследования подтверждают стратегическую важность широкого внедрения LiDAR-технологий в систему кадастровых работ Российской Федерации как ключевого элемента цифровизации земельно-имущественных отношений и повышения эффективности государственного управления земельными ресурсами. Рекомендуется разработка специализированных образовательных программ для подготовки кадров в области применения инновационных технологий дистанционного зондирования, создание региональных центров коллективного пользования дорогостоящим LiDAR-оборудованием и стимулирование внедрения современных технологий посредством государственной поддержки и льготного финансирования для участников рынка кадастровых услуг.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Методические рекомендации по проведению комплексных кадастровых работ / Национальное объединение саморегулируемых организаций кадастровых инженеров. — Москва, 2024. — 124 с. — URL: <https://ki-rf.ru/wp-content/uploads/2024/09/Методические-рекомендации-по-проведению-ККР-с-изменениями-от-30.08.2024.pdf> (дата обращения: 05.10.2025).
2. Применение данных дистанционного зондирования земли в ГИС для археологических исследований // ИнтерКарто. ИнтерГИС. — 2018. — Т. 24. — № 1. — С. 510–524. — URL: <http://intercarto.msu.ru/jour/articles/article631.pdf> (дата обращения: 05.10.2025).



3. Концепция наземного покрова (Land Cover) как основа дистанционного мониторинга земель // Региональные геосистемы. — 2024. — Т. 48. — № 1. — С. 160–172. — URL: <https://reg-geosystems-journal.ru/index.php/journal/article/download/202/202> (дата обращения: 05.10.2025).
4. Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) // ГК «Геоскан». — 2023. — URL: https://www.geoscan.ru/ru/services/air_laser_scanning (дата обращения: 05.10.2025).
5. Классификация местности по воздушным данным лидара // MATLAB Documentation. — 2020. — URL: https://docs.exponenta.ru/R2021a_nmtnew/lidar/ug/terrain-classification-on-aerial-lidar-data.html (дата обращения: 05.10.2025).
6. Борисов Е.А. Применение БПЛА в кадастровой деятельности / Е.А. Борисов // Научные исследования. — 2024. — № 3. — С. 45–52. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenie-bpla-v-kadastrovoy-deyatelnosti> (дата обращения: 05.10.2025).
7. Белякова Е.В. Новые технологии мониторинга земель / Е.В. Белякова // Экономика: вчера, сегодня, завтра. — 2023. — Т. 13. — № 11А. — С. 379–386. — DOI: 10.34670/AR.2023.42.20.042
8. Зазулин В.А. Особенности использования беспилотных летательных аппаратов в кадастровых работах / В.А. Зазулин // Интерэкско Гео-Сибирь. — 2022. — Т. 7. — № 1. — С. 45–52. — URL: <https://geosib.sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2022/tom-7-1/045-052.pdf> (дата обращения: 05.10.2025).
9. Постонен Д.В. Использование БПЛА, квадрокоптеров при выполнении кадастровых работ / Д.В. Постонен // Материалы конкурса «Кадастровый олимп 2019». — Москва: ОКИС, 2020. — 24 с. — URL: <https://ki-rf.ru/2020/05/05/ispolzovanie-bpla-kvadrokopterov-pri-vypolnenii-kadastrovyh-rabot/> (дата обращения: 05.10.2025).
10. Нехин С.С. Лазерное сканирование и перспективы его применения для целей топографического картографирования и кадастра / С.С. Нехин, Н.М. Бабашкин // Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле». — 2022. — № 1 (25). — С. 99–110. — DOI: 10.25587/SVFU.2022.25.1.011

Список литературы на английском языке / References in English

1. Metodicheskiye rekomendatsii po provedeniyu kompleksnykh kadastrovykh rabot [Methodological recommendations for carrying out complex cadastral works] / National Association of Self-regulating Organizations of Cadastral Engineers. — Moscow, 2024. — 124 p. — URL: <https://ki-rf.ru/wp-content/uploads/2024/09/Методические-рекомендации-по-проведению-ККР-с-изменениями-от-30.08.2024.pdf> (accessed: 05.10.2025). [in Russian]
2. Primeleniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli v GIS dlya arkheologicheskikh issledovaniy [Application of remote sensing data in GIS for archaeological research] // InterKarto. InterGIS. — 2018. — Vol. 24. — № 1. — P. 510–524. — URL: <http://intercarto.msu.ru/jour/articles/article631.pdf> (accessed: 05.10.2025). [in Russian]
3. Kontseptsiya nazemnogo pokrova (Land Cover) kak osnova distantsionnogo monitoringa zemel' [The concept of land cover as a basis for remote land monitoring] // Regional'nyye geosistemy [Regional Geosystems]. — 2024. — Vol. 48. — № 1. — P. 160–172. — URL: <https://reg-geosystems-journal.ru/index.php/journal/article/download/202/202> [in Russian]
4. Vozdushnoye lazernoye skanirovaniye (VLS) [Airborne laser scanning (ALS)] // ГК «Geoskan». — 2023. — URL: https://www.geoscan.ru/ru/services/air_laser_scanning (accessed: 05.10.2025). [in Russian]
5. Klassifikatsiya mestnosti po vozdushnym dannym lidara [Terrain classification using aerial lidar data] // MATLAB Documentation. — 2020. — URL: https://docs.exponenta.ru/R2021a_nmtnew/lidar/ug/terrain-classification-on-aerial-lidar-data.html (accessed: 05.10.2025). [in Russian]
6. Borisov Ye.A. Primeleniye BPLA v kadastrovoy deyatel'nosti [Borisov E.A. Use of UAVs in Cadastral Activities] / Ye.A. Borisov // Nauchnyye issledovaniya [Scientific Research]. — 2024. — № 3. — P. 45–52. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenie-bpla-v-kadastrovoy-deyatelnosti> (accessed: 05.10.2025). [in Russian]
7. Belyakova Ye.V. Novyye tekhnologii monitoringa zemel' [New technologies for land monitoring] / HYe.V. Belyakova // Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra [Economy: yesterday, today, tomorrow]. — 2023. — Vol. 13. — № 11A. — P. 379–386. — DOI: 10.34670/AR.2023.42.20.042 [in Russian]
8. Zazulin V.A. Osobennosti ispol'zovaniya bespilotnykh letatel'nykh apparatov v kadastrovykh rabotakh [Features of the use of unmanned aerial vehicles in cadastral works] / V.A. Zazulin // Interekspo Geo-Sibir' [Inter Expo Geo-Siberia]. — 2022. — Vol. 7. — № 1. — P. 45–52. — URL: <https://geosib.sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2022/tom-7-1/045-052.pdf> (accessed: 05.10.2025). [in Russian]
9. Postonen D.V. Ispol'zovaniye BPLA, kvadrokopterov pri vypolnenii kadastrovykh rabot [Use of UAVs and Quadcopters in Carrying Out Cadastral Works] / D.V. Postonen // Materialy konkursa «Kadastrovy olimp 2019» [Proceedings of the Cadastral Olympus 2019 Competition]. — Moscow: OKIS, 2020. — 24 p. — URL: <https://ki-rf.ru/2020/05/05/ispolzovanie-bpla-kvadrokopterov-pri-vypolnenii-kadastrovyh-rabot/> (accessed: 05.10.2025). [in Russian]
10. Nekhin S.S. Lazernoye skanirovaniye i perspektivy yego primeniya dlya tseley topograficheskogo kartografirovaniya i kadastra [Laser scanning and prospects for its application for topographic mapping and cadastre] / S.S. Nekhin, N.M. Babashkin // Vestnik SVFU. Seriya «Nauki o Zemle» [Bulletin of NEFU. Earth Sciences Series]. — 2022. — № 1 (25). — P. 99–110. — DOI: 10.25587/SVFU.2022.25.1.011 [in Russian]