

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И СЕНСОРНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ

А.Е. Авдони́на

студент

А.В. Чураков

к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация, метрология и управление в технических системах»

*Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация.

В статье проводится анализ методологических подходов и сенсорных архитектур БПЛА для мониторинга лесных экосистем. Рассматриваются возможности современных систем дистанционного зондирования, включая мультиспектральные, гиперспектральные и лидарные технологии. Особое внимание уделяется практическим аспектам применения беспилотных решений для решения задач лесного хозяйства. Демонстрируется эффективность комплексного использования различных сенсоров для получения точных данных о состоянии лесных массивов.

Ключевые слова: БПЛА, мониторинг лесов, сенсорные архитектуры, мультиспектральная съёмка, лидар, гиперспектральная съёмка, лесное хозяйство.

METHODOLOGICAL ASPECTS AND SENSOR ARCHITECTURES OF UAVS FOR MONITORING FOREST ECOSYSTEMS

A.E. Avdonina

student

A.V. Churakov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Automation, Metrology and Control in Technical Systems"

St. Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, St. Petersburg, Russia

Abstract.

The article analyzes methodological approaches and sensor architectures of UAVs for monitoring forest ecosystems. The possibilities of modern remote sensing systems, including multispectral, hyperspectral and lidar technologies, are considered. Special attention is paid to the practical aspects of using unmanned solutions to solve forestry problems. The effectiveness of the integrated use of various sensors to obtain accurate data on the state of forests is demonstrated.

Keywords: UAVs, forest monitoring, sensor architectures, multispectral imaging, lidar, hyperspectral imaging, forestry.

Актуальность мониторинга лесных экосистем обусловлена их критической ролью в поддержании экологического баланса, экономической стабильности и социального благополучия. Леса являются ключевым компонентом биосферы, регулирующим климат, сохраняющим биоразнообразие и обеспечивающим человечество ресурсами [7]. Однако совокупное воздействие антропогенных и природных факторов вызывает структурно-функциональные изменения в лесных экосистемах, что обуславливает необходимость их системного мониторинга и адаптивного управления. Мониторинг позволяет оперативно

выявлять изменения в состоянии лесов, такие как незаконные рубки, распространение вредителей, последствия пожаров и климатические сдвиги. Это необходимо для своевременного принятия мер по защите и восстановлению лесов, что в конечном итоге способствует устойчивому развитию и сохранению природного наследия для будущих поколений. Беспилотные летательные средства значительно улучшают мониторинг лесных экосистем благодаря оперативности, мобильности и высокой детализации данных. Они позволяют оперативно обследовать труднодоступные территории, выявляя незаконные рубки, очаги болезней и последствия пожаров с разрешением до нескольких сантиметров. Мультиспектральная съемка помогает оценивать состояние растительности, а гибкость маршрутов адаптируется под конкретные задачи. [3] По сравнению с традиционными видами наблюдения, которые имеют риски в первую очередь для персонала, БПЛА является более экономичным и безопасным методом.

Цель данной статьи – раскрыть ключевые методологические подходы и принципы построения сенсорных архитектур беспилотных летательных аппаратов, применяемых для решения задач мониторинга лесных экосистем.

Современные методы мониторинга лесов представляют собой комплекс высокотехнологичных решений, интегрирующих данные различного уровня для получения объективной и оперативной информации о состоянии лесных экосистем. Традиционные наземные наблюдения, включающие таксацию - учёт и материальная оценка лесных ресурсов и визуальную оценку, сегодня дополняются и частично заменяются дистанционными технологиями, позволяющими охватывать значительные территории с высокой детальностью. Космический мониторинг осуществляемые с помощью спутниковых систем среднего и высокого разрешения, таких как Sentinel – 2 и Landsat, обеспечивает регулярное наблюдение за обширными лесными массивами, отслеживание динамики изменений, обнаружение пожаров и оценку состояния растительности через расчет вегетационных индексов [2]. Особую роль играют технологии лазерного сканирования – Лидар, обеспечивающие получение высокоточных трехмерных моделей рельефа и лесного полога, что невозможно при использовании только оптических методов. Лидарные данные позволяют точно определять высоту деревьев, объем биомассы и изучать пространственную структуру насаждений. Дополнительные возможности предоставляют тепловые и гиперспектральные камеры, которые используются для обнаружения пожаров, оценки водного стресса растений и диагностики фитопатологий на ранних стадиях. Обработка собранных данных осуществляется с применением искусственного интеллекта и машинного обучения, позволяя автоматизировать процессы дешифрирования снимков, детектирования кров деревьев и оценки таксационных показателей. [4] Завершающим звеном систем мониторинга являются беспилотные летательные аппараты, которые обеспечивают максимальную гибкость, оперативность и детальность сбора информации. (рисунок 1)

БПЛА позволяют проводить целевой мониторинг отдельных участков, создавать высокоточные 3D-модели с использованием фотограмметрии и лазерного сканирования, осуществлять мультиспектральную съемку для оценки здоровья растительности, оперативно обнаруживать и документировать очаги возгораний, болезни и незаконные вырубки, а также контролировать эффективность лесовосстановительных мероприятий.

Методологические аспекты использования беспилотных летательных аппаратов представляют собой комплексный, многоэтапный процесс, требующий тщательного планирования и строгой последовательности действий для достижения научных или прикладных целей. Ключевыми компонентами данной методологии являются планирование миссии, сбор данных, обработка и анализ полученной информации, каждый из которых содержит ряд критически важных процедур. Планирование миссии является фундаментальным этапом, от которого на 80% зависит успех всего проекта. Этот процесс начинается с четкого формулирования цели и задач: будь то создание плана местности, 3D-моделирование объекта, мониторинг состояния сельскохозяйственных культур, проведение

картографических или инспекционных работ. Исходя из целей, определяются требования к результату: пространственное разрешение (GSD), точность геопривязки, тип выходных данных (растр, облако точек, модель, карта индексов). Далее осуществляется выбор территории и проводится камеральная подготовка: анализ рельефа, изучение законодательных ограничений на полеты в данном районе, определение зон взлета-посадки и потенциально опасных участков.



Рисунок 1.

На основе этих данных производится проектирование полетного задания в специализированном программном обеспечении. Здесь задаются ключевые параметры: тип маршрута (например, зигзаг для аэрофотосъемки или произвольный маршрут для инспекции), высота полета, напрямую влияющая на разрешение снимков, продольное и боковое перекрытие между снимками (обычно 80%/70% для построения 3D-моделей и 60%/40% для простого плана), скорость полета, углы съемки. Важнейшим элементом планирования является обеспечение геопривязки данных, для чего на местности заранее размечаются и измеряются с высокой точностью (с помощью GNSS-приемников в кинематическом режиме) опорные точки, которые в дальнейшем используются для коррекции координат снимков. Также проводится оценка погодных условий и проверка состояния оборудования – БПЛА, датчиков, аккумуляторов.

Методы сбора данных заключаются в непосредственном выполнении запланированной миссии. Пилот-оператор проводит предполетную проверку всех систем, калибровку датчиков (например, компаса и инерциальной навигационной системы) и выполняет взлет, чаще всего в автоматическом режиме согласно загруженному маршруту. В процессе полета БПЛА автономно следует по заданным точкам, а встроенная камера или иной sensor (мультиспектральный, тепловизионный, лидар) производит съемку с заданными интервалами. Оператор осуществляет постоянный мониторинг телеметрии – высоты, скорости, состояния батареи, качества сигналов связи и GNSS – и готов в любой момент перехватить управление в ручной режим в случае возникновения нештатной ситуации. После завершения съемки выполняется посадка, и данные в виде набора отдельных снимков с точными метаданными о времени, координатах и углах ориентации (EXIF и XMP данные) копируются с бортового накопителя для последующей обработки. Обработка данных представляет собой, по сути, процесс трансформации сырых данных в

пригодную для анализа информацию и осуществляется в специализированном программном обеспечении для фотограмметрической обработки. Первым этапом является импорт всех полученных изображений и данных с полевых контрольных точек. Далее запускается ключевой процесс – выравнивание снимков, в ходе которого программа находит совпадающие точки на перекрывающихся фотографиях, определяет их пространственное положение и строит разреженное облако точек, реконструируя геометрию съемки и позицию каждой камеры в момент экспозиции. На следующем этапе с использованием опорных точек выполняется оптимизация и привязка всей модели к требуемой системе координат, что значительно повышает ее точность. После этого строится плотное облако точек, где каждый пиксель получает трехмерные координаты. На основе этого облака генерируются основные производные продукты: цифровая модель поверхности, цифровая модель рельефа и мозаика – выровненный и равномасштабный фотоплан, являющийся основным картографическим результатом. Для 3D-моделирования дополнительным шагом является построение текстурированной полигональной модели объекта. Анализ данных является заключительным и наиболее содержательным этапом, где полученные продукты используются для извлечения целевой информации. Методы анализа напрямую зависят от поставленных задач. При работе с фотопланом и DSM это может быть визуальный дешифрирование объектов, контурное выделение, создание векторных слоев и картографирование. В сельском хозяйстве проводится расчет вегетационных индексов по данным мультиспектральной съемки для оценки индекса NDVI, что позволяет выявить зоны стресса растений. В геодезии и строительстве выполняются высокоточные измерения расстояний, площадей, объемов земляных масс, а также мониторинг деформаций путем сравнения ЦМР, полученных в разное время. 3D-модели используются для проведения виртуальных инспекций, создания интерактивных карт и планов. Результаты анализа систематизируются, интерпретируются и оформляются в виде отчетов, карт, графиков и диаграмм, которые и представляют собой конечную ценность всего проекта, позволяя принимать обоснованные управленческие, инженерные или научные решения.[5]

Сенсорная архитектура является центральным элементом любого беспилотного летательного аппарата, определяя его функциональное назначение и конечную ценность собираемых данных. Она представляет собой комплекс датчиков, камер и измерительных систем, интегрированных в платформу БПЛА для взаимодействия с окружающей средой. Подробное рассмотрение этой архитектуры включает в себя классификацию сенсоров, методологию выбора оборудования и обзор инновационных разработок в данной области.

Классификация сенсоров для БПЛА проводится по нескольким ключевым признакам, основным из которых является принцип регистрации данных и решаемые задачи. Во-первых, это пассивные и активные сенсоры. Пассивные сенсоры регистрируют отраженное излучение от внешних источников, прежде всего солнечного света. К ним относится подавляющее большинство камер: RGB-камеры, воспринимающие видимый свет в красном, зеленом и синем спектральных каналах, и мультиспектральные камеры, которые схватывают данные в узких, специфических диапазонах электромагнитного спектра за пределами видимого человеческим глазом, таких как ближний инфракрасный диапазон или красная граница, что незаменимо для анализа растительности, и гиперспектральные камеры, которые работают по принципу формирования не нескольких, а сотен узких смежных спектральных каналов, создавая тем самым непрерывный спектральный портрет каждого объекта на местности, что открывает возможности для точной идентификации материалов и веществ. Тепловизионные камеры также являются пассивными и регистрируют собственное тепловое излучение объектов в среднем или длинном инфракрасном диапазоне. В противоположность им, активные сенсоры сами генерируют зондирующий сигнал и анализируют его отражение. Ярчайшим примером служит лидар, который измеряет расстояние до объекта с помощью лазерных импульсов, вычисляя время их возврата, что позволяет с высочайшей точностью строить цифровые модели местности даже под пологом леса, а также радары, которые используют радиоволны

и эффективны в условиях плохой видимости. Во-вторых, сенсоры классифицируются по решаемым задачам: фотограмметрические для создания карт и 3D-моделей, спектральные для сельского хозяйства и экологического мониторинга, инспекционные для обследования инфраструктуры, навигационные и так далее.

Критерии выбора сенсорного оборудования формируют собой сложный компромисс между техническими характеристиками, требованиями проекта и экономической целесообразностью. Первым и основным критерием является пространственное разрешение, которое определяет минимальный размер объекта, различимого на снимке. Оно зависит от физического разрешения матрицы камеры и высоты полета: чем больше фокусное расстояние и чем ниже высота, тем выше разрешение. Следующим критически важным параметром является спектральное разрешение, то есть количество и ширина регистрируемых спектральных каналов; для задач агромониторинга необходим датчик, чувствительный к ближнему инфракрасному излучению, в то время как для картографирования достаточно RGB. Радиометрическое разрешение, определяющее способность сенсора различать градации яркости, напрямую влияет на качество данных в условиях слабой освещенности или при анализе слабоконтрастных объектов. Не менее важны эксплуатационные характеристики: вес и габариты сенсора, которые должны соответствовать грузоподъемности и посадочным местам БПЛА, энергопотребление, определяющее время полета, а также устойчивость к вибрациям. Наконец, ключевым фактором является совместимость с системой управления полетом БПЛА для автоматизации съемки и стоимость всего комплекса, включающая не только цену самого сенсора, но и необходимое программное обеспечение для обработки, обучение операторов и техническую поддержку.[6]

Мониторинг лесов при помощи беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) уже активно используется в современной практике лесного хозяйства. Так, в Пермском крае были успешно рассмотрены и внедрены различные аспекты применения данной технологии для учета лесных ресурсов и контроля состояния лесных массивов. В настоящее время беспилотные технологии демонстрируют высокую эффективность в сфере лесного мониторинга. Современные БПЛА обеспечивают возможность оперативного учета лесных ресурсов и выявления нарушений в режиме реального времени, что существенно повышает качество контроля за состоянием лесных территорий. Особую значимость представляет возможность обследования труднодоступных участков леса при помощи беспилотных систем. Технические характеристики современных БПЛА позволяют проводить аэрофотосъемку с впечатляющей точностью — до 5 сантиметров на пиксель, что обеспечивает получение детальных и информативных изображений лесных массивов. Технические параметры используемых БПЛА позволяют осуществлять мониторинг обширных территорий. Специализированное оборудование, установленное на аппаратах, включает средства для проведения аэрофотосъемки и тепловизионного контроля. Оптимальная высота полета в диапазоне 200-300 метров обеспечивает необходимый баланс между детализацией получаемых снимков и площадью охвата территории. Интеграционные возможности БПЛА позволяют эффективно внедрять полученные данные в существующие информационные системы. На основе материалов, собранных при помощи беспилотных систем, создаются актуальные цифровые карты лесов, которые регулярно обновляются и используются для ведения государственного лесного реестра. Внедрение беспилотных технологий в систему лесного мониторинга способствует существенному повышению эффективности управления лесными ресурсами. Перспективным направлением является дальнейшее расширение практики применения БПЛА в различных регионах, что позволит обеспечить более качественный контроль за состоянием лесных фондов страны. [1]

Беспилотные летательные аппараты демонстрируют двуединую природу, сочетая потенциал с существенными правовыми барьерами. Ключевые преимущества включают оперативность выполнения задач — мониторинг территорий осуществляется в разы

быстрее традиционных методов, что критически важно при поисково-спасательных операциях и ликвидации ЧС. Существенно снижаются риски для человека благодаря замене персонала при инспекции опасных объектов — высотных конструкций, зон химического заражения. Обеспечивается высочайшая детализация данных через современные сенсоры (лидары, мультиспектральные камеры), недостижимая при наземных работах. Важным фактором остается экономическая эффективность — стоимость эксплуатации несопоставима с пилотируемой авиацией. Основные минусы сконцентрированы в правовой плоскости. Жесткие ограничения на полеты в городах фактически блокируют применение дронов. Процедура получения разрешений на полеты в контролируемом воздушном пространстве чрезмерно бюрократизирована — необходимость получения сертификатов и согласований с органами УВД нивелирует оперативность технологии. Ограничения по высоте и линии видимости сужают возможности для масштабных проектов. Юридическая неопределенность в вопросах конфиденциальности создает риски судебных разбирательств.

Список литературы

1. В Пермском крае рассмотрели вопросы использования БПЛА для учета лесных ресурсов // ФГБУ «Рослесинфорг». – 2023. – URL: <https://roslesinforg.ru/news/all/v-permskom-krae-rassmotreli-voprosy-ispolzovaniya-bpla-dlya-ucheta-lesnykh-resursov/> (дата обращения: 20.08.2025).
2. Дистанционный мониторинг лесов с использованием космических данных Sentinel-2 // Innoter. – 2021. – URL: <https://innoter.com/articles/distantionnyy-monitoring-lesov-s-ispolzovaniem-kosmicheskikh-dannykh-sentinel-2/> (дата обращения: 20.08.2025).
3. Использование БПЛА в лесном хозяйстве // BRLab. – URL: <https://brlab.ru/scopes/lesnoe-khozyaystvo/> (дата обращения: 20.08.2025).
4. Лесная отрасль: как беспилотники помогают сохранять леса // ЛесПромИнформ. – 2022. – № 7(145). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3255> (дата обращения: 20.08.2025).
5. Подготовка к геодезическим миссиям // Skymec. – URL: <https://skymec.ru/blog/drone-use-cases/geodeziya/podgotovka-k-geodezicheskim-missiyam/> (дата обращения: 21.08.2025).
6. Сенсоры беспилотников: как роботы ориентируются в пространстве // Фестиваль науки. – URL: <https://festivalnauki.ru/media/articles/interesno-o-nauke/sensory-bes-pilotnikov-kak-roboty-orientiruyutsya-v-prostranstve/> (дата обращения: 21.08.2025).
7. Вырубка лесов: последствия и пути решения // ESG Блог. – URL: <https://forest-save.ru/esg-blog/vyirubka-lesov-posledstviya-i-puti-resheniya> (дата обращения: 21.08.2025).

References

1. In the Perm Region, the issues of using UAVs to account for forest resources were considered // FSBI Roslesinforg. - 2023. – URL: <https://roslesinforg.ru/news/all/v-permskom-krae-rassmotreli-voprosy-ispolzovaniya-bpla-dlya-ucheta-lesnykh-resursov/> / (date of access: 08/20/2025).
2. Remote monitoring of forests using Sentinel-2 space data // Innoter. – 2021. – URL: <https://innoter.com/articles/distantionnyy-monitoring-lesov-s-ispolzovaniem-kosmicheskikh-dannykh-sentinel-2/> / (date of access: 08/20/2025).
3. The use of UAVs in forestry // BRLab. – URL: <https://brlab.ru/scopes/lesnoe-khozyaystvo/> / (date of reference: 08/20/2025).
4. Forestry industry: how drones help preserve forests // LesPromInform. – 2022. – № 7(145). – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3255> (date of access: 08/20/2025).
5. Preparation for geodetic missions // Skymec. – URL: <https://skymec.ru/blog/drone-use-cases/geodeziya/podgotovka-k-geodezicheskim-missiyam/> / (date of access: 08/21/2025).

6. Drone sensors: how robots navigate in space // Science Festival. – URL: <https://festivalnauki.ru/media/articles/interesno-o-nauke/sensory-bespilotnikov-kak-roboty-orientiruyutsya-v-prostranstve/> (date of access: 08/21/2025).

7. Deforestation: consequences and solutions // ESG Blog. – URL: <https://forest-save.ru/esg-blog/vyirubka-lesov-posledstviya-i-puti-resheniya> (date of request: 08/21/2025).