

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY

УДК 630*232:528.88

С. С. Цай¹, М. А. Ильючик², И. В. Толкач¹, Е. А. Шульга¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²РУП «Белгослес»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НЕСОМКНУВШИХСЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР ХВОЙНЫХ ПОРОД

Специалистами РУП «Белгослес» в 2022 г. выполнялась оптико-электронная съемка участков несомкнувшихся лесных культур хвойных пород с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Целью работ являлось выявление возможностей использования материалов съемки, получаемых с БЛА, для определения качества лесных культур хвойных древесных видов. Съемка участков лесных культур проводилась на территории Минского и Червенского лесхозов. Программа опытных работ по съемке участков предусматривала следующие этапы: подбор объектов съемки и предварительное формирование полетного задания; определение оптимальных параметров оптико-электронной съемки участков лесных культур; непосредственное выполнение оптико-электронной съемки участков лесных культур хвойных пород с использованием БЛА; предварительную обработку полученных мультиспектральных материалов съемки и формирование цифровых ортофотопланов, а также индексных изображений на объекты съемок; формирование в ГИС-приложении цифрового проекта, включающего обработанные материалы мультиспектральных съемок, векторные границы лесотаксационных выделов; визуальное дешифрирование хвойных деревьев оператором в ГИС-приложении и определение процента приживаемости растений хвойных пород. В работе обсуждаются преимущества и недостатки данной технологии, рассматриваются возможности ее применения в практике лесного хозяйства.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, оптико-электронная съемка, беспилотный летательный аппарат, БЛА, съемка лесных культур с БЛА, контроль качества лесных культур.

Для цитирования: Цай С. С., Ильючик М. А., Толкач И. В., Шульга Е. А. Использование оптико-электронных материалов съемки с беспилотных летательных аппаратов для контроля качества несомкнувшихся лесных культур хвойных пород // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 2 (294). С. 5–13.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-1.

S. S. Tsai¹, M. A. Ilyuchik², I. V. Tolkach¹, E. A. Shulga¹

¹Belarusian State Technological University

²RUE “Belgosles”

USING OPTICAL-ELECTRONIC MATERIALS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR QUALITY CONTROL OF UNCLOSED CONIFEROUS FOREST CROPS

In 2022, specialists from RUE “Belgosles” carried out optical-electronic surveys of areas of coniferous forest crops using unmanned aerial vehicles (UAVs). The aim of the work was to identify the possibilities of using survey materials obtained from UAVs to determine the quality of forest crops of coniferous tree species. The survey of forest plantations was carried out on the territory of the Minsk and

Cherven forestry enterprises. The experimental survey program included the following stages: selection of objects for shooting and preliminary preparation of the flight mission; determination of optimal parameters for optical-electronic survey of forest crop areas; performing optical-electronic surveys of areas of coniferous forest plantations using UAVs; processing of the obtained multispectral survey materials and the formation of digital orthophotomaps as well as vegetation index images of the survey objects; visual interpretation of coniferous trees by the operator in the GIS application and determination of the survival rate of coniferous plants. In the paper are examined the advantages and disadvantages of this technology and possibilities of its application in forestry.

Keywords: remote sensing, optical-electronic survey, unmanned aerial vehicle, UAV, drone, survey of forest crops with UAV, quality control of forest crops.

For citation: Tsai S. S., Ilyuchik M. A., Tolkach I. V., Shulga E. A. Using optical-electronic materials from unmanned aerial vehicles for quality control of unclosed coniferous forest crops. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 2 (294), pp. 5–13 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-1.

Введение. В настоящее время практика применения беспилотных летательных аппаратов достаточно обширна и востребована многими отраслями экономики. Не является исключением и лесохозяйственная отрасль [1, 2]. Практически в каждом лесхозе нашей республики имеются беспилотные летательные аппараты (БЛА), которые широко используются при обнаружении и уточнении границ очагов пожаров, повреждений леса, при выявлении нарушителей лесного законодательства и браконьеров, при учете диких животных [3, 4] и т. д.

В данной статье рассматриваются вопросы использования оптико-электронных материалов съемки, выполненных с использованием БЛА, для целей контроля качества несомкнувшихся лесных культур хвойных пород.

В последнее время качество несомкнувшихся лесных культур определяют в процессе их инвентаризации на 1-м и 3-м году их создания. В случае успешного проведения лесокультурных работ и по достижении семилетнего возраста лесные культуры переводятся в покрытые лесом земли, что также сопровождается проведением учетных работ [5].

В процессе инвентаризации лесных культур определяется не только процент приживаемости высаженных древесных видов, но и выполняется проверка на соответствие требованиям, указанным в проекте лесных культур: соответствие схеме посадки, схеме смешения древесных видов и ряду других [6].

В процессе выполнения работ по инвентаризации лесных культур учет деревьев, как правило, выполняется не на всем участке, а на нескольких пробных площадках, которые равномерно расположены по всему участку лесных культур. Поэтому от месторасположения пробных площадок существенно зависит конечный результат приживаемости древесных видов на всем участке. В случае размещения пробных площадок в «удачных» местах с высокой прижи-

ваемостью конечный результат для всего участка лесных культур также будет высоким, что далеко не всегда соответствует реальному положению дел.

Использование материалов съемки с БЛА для целей контроля качества лесных культур позволило бы анализировать приживаемость деревьев на всем участке и, следовательно, способствовало бы решению следующих проблем:

- установлению границ и площади «островков» внутри участка лесных культур, где высаженные деревца хвойных пород имеют низкую приживаемость либо полностью погибли;
- наиболее репрезентативному определению мест расположения пробных площадок;
- на основе обработанных материалов съемки ведению подсчета высаженных деревьев, а также определению их высоты в камеральных условиях.

Все это можно сделать только лишь в случае достоверного дешифрирования на материалах съемки отдельных высаженных деревьев. Опыт российских исследователей показал возможность решения данной задачи [7].

Для апробирования возможностей использования мультиспектральной съемки с БЛА для целей дешифрирования деревьев хвойных пород (высаженных в качестве лесных культур) специалистами РУП «Белгослес» в 2022 г. проводилась мультиспектральная съемка участков лесных культур хвойных пород.

Объектами исследования для выполнения настоящей работы выступали несомкнувшиеся лесные культуры хвойных пород (ель европейская, сосна обыкновенная), располагающиеся на территории Дзержинского лесничества (кв. 26) Минского лесхоза, Хуторского лесничества (кв. 18, 34) Червенского лесхоза.

Указанные участки лесных культур на момент съемки имели возраст от 2 до 6 лет, характеризовались мшистыми, орляковыми и черничными типами леса.

В процессе исследования использовалось следующее оборудование. Оптико-электронная съемка участков лесных культур проводилась с использованием БЛА DJI Phantom 4 Multispectral (рис. 1). Данный беспилотный комплекс позволяет генерировать как оптические, так и мультиспектральные изображения для применения в технологиях точного земледелия и мониторинга окружающей среды [8].



Рис. 1. БЛА DJI Phantom 4 Multispectral

Беспилотник оборудован подвесом с 3-осевой стабилизацией, на котором крепится одна RGB-камера, а также мультиспектральный комплекс из 5 камер, охватывающий синий, зеленый, красный, крайне-красный и ближний инфракрасный каналы спектра (разрешение – 2 мегапикселя) [8] (рис. 2). Весь съемочный комплекс обеспечивается глобальным затвором, что позволяет получать более качественные изображения в движении.



Рис. 2. Съемочная система БЛА DJI Phantom 4 Multispectral (мультиспектральный комплекс из 5 камер и RGB-камеры)

Дополнительно для некоторых участков выполнялась оптическая съемка в режиме RGB с использованием БЛА DJI Matrice 300 RTK (рис. 3) на камеру Zenmuse H20T (рис. 4).



Рис. 3. БЛА DJI Matrice 300 RTK

Данная камера имеет значительно лучшие характеристики, поскольку укомплектована двумя оптическими сенсорами – широкоформатным с матрицей в 12 мегапикселей и основным с матрицей в 20 мегапикселей, которые предназначены для выполнения съемки только в RGB-режиме.

Камера крепится на 3-осевом подвесе, что позволяет ориентировать ее не только по азимуту, но и в вертикальном направлении [9]. Материалы съемки с камеры Zenmuse H20T использовались для построения ортофотопланов (в естественных цветах) на участки лесных культур.

Технические характеристики квадрокоптера DJI Matrice 300 RTK значительно превосходят БЛА DJI Phantom 4 Multispectral, в особенности это касается продолжительности полетного времени, что существенно влияет на производительность выполнения съемочных работ [10].



Рис. 4. Камера Zenmuse H20T, установленная на БЛА DJI Matrice 300 RTK

Обработка материалов съемки выполнялась на ПЭВМ (под управлением ОС Windows 10) следующей комплектации: материнская плата на базе AMD X570, ATX; процессор AMD Ryzen 7 3700X; видеокарта NVIDIA GeForce GTX 1660 Super 6GB; ОЗУ 64 Гб, жесткий диск объемом 4 Тб.

Период съемки лесных культур хвойных пород определялся следующими соображениями. В процессе выращивания хвойных пород в лесных культурах с богатыми условиями местопрорастания часто имеет место затенение последних мелколиственными древесными видами (береза, осина, ива). Вследствие этого период проведения съемки был выбран в момент полного отсутствия листьев на лиственных породах и снежного покрова. В этом случае на материалах съемки достаточно хорошо заметны деревья хвойных пород.

В нашем случае съемка проводилась в первой половине марта 2022 г. методом площадной съемки: продольное перекрытие 80%; поперечное перекрытие 70%; высота съемки 80–90 м. В процессе формирования полетного задания при

построении полигона съемки обязательно предусматривалась буферная зона вокруг участка лесных культур (с целью получения ортофотоплана с минимальными искажениями на краях). Съемка участков лесных культур с использованием БЛА DJI Phantom 4 Multispectral проводилась во всех доступных диапазонах:

- в мультиспектральном диапазоне, задействовавшем все 5 каналов спектра (синий, зеленый, красный, крайне-красный и ближний инфракрасный);

- в оптическом диапазоне (естественные цвета).

Съемка участков лесных культур с использованием БЛА DJI Matrice 300 RTK проводилась только в оптическом диапазоне (обычное RGB-изображение).

Основная часть. Работы по съемке лесных культур выполнялись в следующем порядке.

В камеральных условиях в геоинформационную систему ArcMap были загружены векторные лесоустроительные картографические материалы (сетка кварталов и выделов) с целью уточнения расположения участков лесных культур. Далее в этой же геоинформационной системе выполнялось построение границ полигонов для съемочных работ, которые конвертировались в географический формат Google Earth (kml/kmz) для загрузки в контроллер БЛА с целью формирования полетных заданий. Кроме того, в полетном задании также указывались и параметры съемки, приведенные выше.

После формирования полетных заданий выполнялась съемка участков лесных культур в соответствии с ранее сформированным полетным заданием и при минимальном участии оператора. При необходимости оператор может скорректировать параметры съемки в натуре.

После окончания съемочных работ выполнялись операции по обработке данных, полученных в процессе съемки. При камеральной обработке материалов съемки использовались следующие программные продукты: программные комплексы DJI Terra и Agisoft Metashape, программное обеспечение Global Mapper. В процессе обработки материалов съемки были сформированы следующие цифровые продукты:

- ортофотопланы участков лесных культур в RGB-диапазоне по данным БЛА DJI Phantom 4 Multispectral;

- геопривязанные индексные изображения участков лесных культур (по мультиспектральным данным БЛА DJI Phantom 4 Multispectral);

- ортофотопланы участков лесных культур в RGB-диапазоне по материалам съемки с БЛА DJI Matrice 300 RTK;

- цифровые модели полога лесных культур, полученные по материалам съемки с БЛА DJI Matrice 300 RTK.

Для формирования индексных изображений участков лесных культур использовались мультиспектральные данные (5 каналов), полученные с БЛА DJI Phantom 4 Multispectral. В процессе обработки этих данных в программном комплексе DJI Terra были сформированы следующие геопривязанные растровые индексные изображения:

- индексное изображение на основе вегетационного индекса NDVI (индекс хорошо определяет фотосинтетическую активность растения, используется для разделения фотосинтезирующей растительности с другими объектами) [11, 12];

- индексное изображение на основе вегетационного индекса GNDVI (данный индекс измеряет содержание хлорофилла в растениях точнее, чем NDVI, используется для мониторинга вегетации с высокой плотностью покрова либо при оценке угнетенной растительности) [13];

- индексное изображение на основе вегетационного индекса LCI (данный индекс предназначен для определения содержания хлорофилла в листьях растений) [14];

- индексное изображение на основе вегетационного индекса NDRE (аналог NDVI, только при расчете вместо красного спектрального канала используется крайне-красный спектр; применяются для мониторинга участков с высокой плотностью вегетационного покрова) [13];

- индексное изображение на основе вегетационного индекса OSAVI (индекс предназначен для обследования молодой растительности с учетом сильного влияния почвы до смыкания рядов) (рис. 5, а) [14].

Анализ индексных изображений показал, что древесца хвойных пород наиболее качественно отображались на индексных изображениях, полученных на основе вегетационного индекса OSAVI (рис. 5, а).

Сравнительный анализ индексного изображения (OSAVI) с ортофотопланом (рис. 5, б), полученным в естественных цветах (RGB-изображение), показал, что индексное изображение обладает лучшими дешифровочными свойствами для выявления деревьев хвойных пород. Поэтому подсчет количества деревьев в пределах пробных площадей выполнялся именно на этих материалах.

Тем не менее ортофотопланы, сформированные по результатам съемки с БЛА (RGB-съемка), в большинстве случаев также оказались пригодными для выполнения подсчета количества растущих деревьев.

Еще одним видом цифровых материалов, полученным на основе материалов съемки с БЛА, была цифровая модель (DEM) полога лесных культур. Данный вид цифровых материалов необходим для определения высоты лесных культур [15].

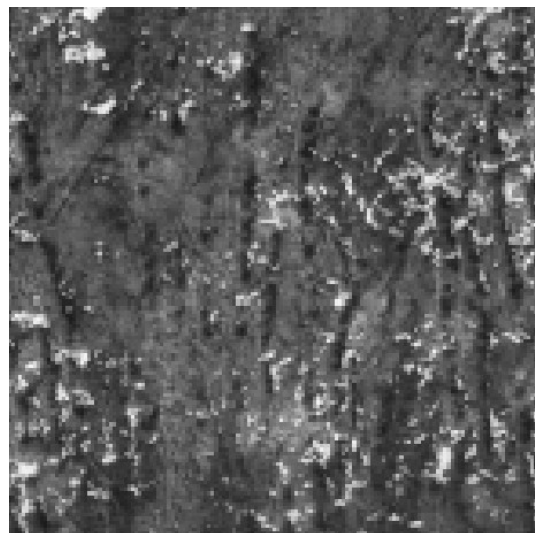
*а**б*

Рис. 5. Изображения участка лесных культур, полученные при различных режимах съемки с БЛА:
а – индексное изображение на основе вегетационного индекса OSAVI;
б – изображение, полученное в естественных цветах (RGB-диапазон)

Формирование цифровой модели полога лесных культур выполнялось с использованием программного комплекса DJI Terra на основе материалов оптической съемки с БЛА DJI Matrice 300 RTK.

С целью лучшей визуализации на цифровую модель полога накладывалось совмещенное растровое RGB-изображение участка лесных культур (ортофотоплан участка) (рис. 6).

Определение высот деревьев на основе цифровой модели полога лесных культур проводилось с использованием программного обеспечения Global Mapper. Затем на основании этих данных несложно рассчитать среднюю высоту лесных культур.

Также возможно использование цифровых моделей и для подсчета растений хвойных по-

род. В ряде случаев близкорасположенные растения могут сливаться в один массив, что несколько усложняет дешифрирование (рис. 6), но не является критичным.

Формирование цифровых моделей полога целесообразно проводить для уже сформировавшихся лесных культур хвойных пород в возрасте от 3 лет и старше. Для культур более младшего возраста цифровая модель полога будет практически неотличима от цифровой модели рельефа и, следовательно, будет малоинформативной.

Альтернативный вариант построения цифровой модели полога лесных культур основывается на использовании данных лидарного сканирования с БЛА [16].



Рис. 6. Цифровая модель полога лесных культур с наложенным растровым изображением

После формирования вышеуказанных цифровых материалов выполнялся их анализ с целью определения качества лесных культур хвойных пород. Для этого в ГИС ArcMap создавался проект, в который были загружены цифровые ортофотопланы, индексные изображения, а также векторные лесоустроительные картографические материалы (сетка кварталов и выделов) на участок лесных культур.

Поскольку все цифровые материалы являются геопривязанными, процесс их взаимного совмещения не вызывает сложностей. В среде этой геоинформационной системы определяются границы участка лесных культур, выполняется визуальный осмотр участка на наличие и густоту хвойных деревьев (в удобном масштабе, который можно регулировать средствами ГИС). В случае если густота прижившихся хвойных растений в пределах участка лесных культур приблизительно одинакова, а области с погибшими растениями отсутствуют, то «виртуальные» пробные площади (формирующиеся на экране монитора для подсчета густоты деревьев) в нужном количестве (в соответствии с нормативными документами) закладываются равномерно по всему участку (рис. 7). После подсчета растений на каждой из проб густота всего участка определяется стандартным образом.

В случае если на участке с лесными культурами обнаруживаются области (значительные по площади), в которых густота лесных культур существенно меньше, чем положено в соответствии с проектом культур, то тогда такой участок разбивается на зоны с приблизительно одинаковой густотой деревьев. Границы зон векторизуются, определяется площадь каждой из зон.

Закладка пробных площадей осуществляется внутри каждой из зон в количестве, пропорциональном площади зоны. Определяется средняя густота каждой такой зоны. Общая густота всего участка рассчитывается как средневзвешенная густота зон по площади.

Если на участке с лесными культурами обнаруживаются области, в которых лесные культуры полностью погибли, то такие области должны векторизоваться, а их площадь определяться средствами ГИС. В зависимости от величины этой площади принимается решение о дополнении или списании лесных культур.

Для определения густоты хвойных деревьев на участке лесных культур применялись «виртуальные» пробные площади, которые закладывались на экране монитора в геоинформационной системе ArcMap. Местоположение пробных площадей определял оператор исходя из указанных выше соображений. Количество пробных площадей устанавливается нормативными документами [5, 6].

Построение этих пробных площадей выполнялось с использованием инструментов ГИС ArcMap путем формирования векторного полигонального объекта в форме прямоугольника на экране монитора, расположенного в нужном месте участка лесных культур и имеющего размерные характеристики, соответствующие требованиям нормативов к пробным площадям. В пределах такой пробной площади (построенного прямоугольника) выполнялся подсчет живых хвойных деревьев (рис. 7). Площадь пробы определялась средствами ГИС. Расчет густоты лесных культур на такой пробной площади стандартный.

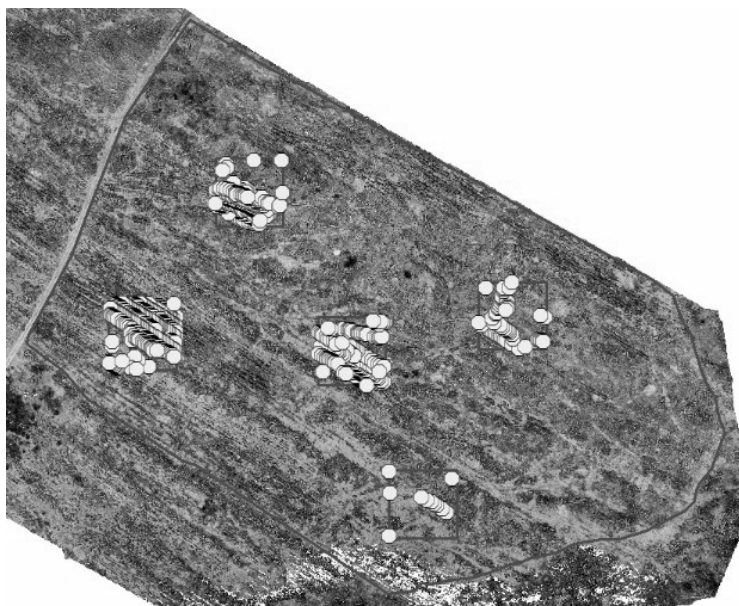


Рис. 7. Определение густоты лесных культур хвойных пород на экране монитора в геоинформационной системе ArcGIS

Определение средней высоты лесных культур, как уже указывалось выше, может быть получено на основе цифровой модели полога лесных культур с использованием программного обеспечения Global Mapper [15].

Таким образом, основные показатели, необходимые для принятия решения об инвентаризации лесных культур хвойных пород, а также о переводе таких культур в покрытые лесом земли, могут определяться на основе материалов съемки с БЛА. Важным преимуществом использования рассматриваемой технологии является максимальная достоверность получаемых данных о густоте лесных культур хвойных пород. Кроме того, все цифровые материалы съемки лесных культур могут храниться в электронной форме длительное время и при необходимости быть востребованы для контрольной проверки в любой момент.

Преимуществом данной технологии также является снижение трудоемкости полевых работ вследствие замены измерительных работ в поле на камеральные измерительные работы перед монитором компьютера, а также незначительное увеличение производительности в сравнении с традиционным методом инвентаризации лесных культур.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что материалы оптической и оптико-электронной съемки с БЛА могут использоваться для определения густоты лесных культур хвойных пород. Однако у данного метода также имеется и ряд недостатков, которые представлены ниже.

Важным недостатком является ограниченный временной период выполнения летно-съемочных работ с использованием БЛА. Поскольку съемочные работы должны выполняться в период, когда одновременно имеет место отсутствие листвы на лиственных породах и отсутствие снежного покрова (до 5 см допустимо), то количество месяцев (позднеосенних и ранневесенних), пригодных для выполнения съемки, в среднем составляет около 2–3. Возможно, что с потеплением климата период съемки может увеличиться. Кроме того, для этого периода года характерен короткий световой день и неблагоприятная для полетов погода с частыми осадками, туманами, сильными ветрами. Все это еще более уменьшает и так небольшой период летно-съемочных работ.

Еще один важный недостаток – отсутствие возможности проводить инвентаризацию лиственных пород одновременно с хвойными породами. В случае если лесные культуры имеют в составе два древесных вида, один из которых хвойный, а другой – лиственный, то выполнение контроля приживаемости только хвойных деревьев не позволит сделать полноценное заключение

о всем участке лесных культур. В связи с необходимостью выполнения требований по сохранению биоразнообразия и устойчивому лесопользованию, создание смешанных лесных культур является приоритетным направлением в настоящее время. Как правило, при создании лесных культур, где в качестве главной породы проектируется хвойный древесный вид, доля мелколиственной породы составляет около 2–3 единиц в составе [6]. Величина незначительная, тем не менее проигнорировать ее нельзя. Отсюда следует невозможность полноценного проведения инвентаризации лесных культур смешанного состава путем использования материалов съемки с БЛА. Исключение составляют лесные культуры, в которых хвойные породы не находятся в затенении и могут дешифрироваться наряду с лиственными.

К недостаткам рассматриваемой технологии нужно отнести высокую стоимость используемого оборудования и программного обеспечения. Для проведения съемки лесных культур с использованием БЛА и ее последующей обработки необходим комплекс специализированного дорогостоящего оборудования, включающего непосредственно сам БЛА с RTK-модулем и двойным запасом аккумуляторных батарей, автономную зарядную станцию для подзарядки батарей в полевых условиях, съемочную аппаратуру, позволяющую выполнять мультиспектральную съемку, современную рабочую станцию (ПЭВМ) для последующей обработки больших объемов съемки и недорогое программное обеспечение, включающее ГИС, фотограмметрические программные комплексы. Общая стоимость полного комплекта оборудования может в 3–4 раза превышать стоимость самого БЛА. Работы по инвентаризации лесных культур, выполняющиеся по традиционной технологии, обойдутся значительно дешевле, даже с учетом меньшей производительности.

Следующий недостаток заключается в необходимости наличия высококвалифицированных специалистов для проведения как летно-съемочных работ, так и последующей обработки отснятого материала.

Заключение. Результаты исследования показали практическую пригодность и перспективность использования материалов съемки с БЛА для целей контроля качества лесных культур хвойных пород. Но с учетом приведенных недостатков говорить о массовом внедрении в практику лесного хозяйства данной технологии в настоящее время преждевременно. Ее использование целесообразно для выборочного или повторного контроля качества лесных культур хвойных пород, проводимого специалистами ГПЛХО или РУП «Белгослес» по заказу Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь.

Список литературы

1. Возможности обработки и анализа данных сверхлегкого БПЛА Sensefly ebee в лесном хозяйстве / Г. А. Галецкая [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 3, № 4. С. 11–18.
2. Ралдугин А. М., Калита Г. А. Применение беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2024. № 66. С. 42–47.
3. Кононова С. А., Перепичаев А. А., Рыжова Н. А. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в лесном хозяйстве // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2023. № 64. С. 58–60.
4. Звягинцев В. Б., Малашевич Д. Г., Жданович С. А. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве для проведения лесозащитных мероприятий // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. 2023. № 2 (274). С. 43–49. DOI: 10.52065/2520-6877-2023-274-2-6.
5. Положение о порядке лесовосстановления и лесоразведения: утв. постановлением М-ва лесного хоз-ва Респ. Беларусь, 19.12.2016 г., № 80 // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631578> (дата обращения: 14.03.2025).
6. Правила лесовосстановления и лесоразведения. Технический кодекс установившейся практики Республики Беларусь: ТКП 667–2022 (33090) // Нац. правовой Интернет-портал Респ. Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W02441127p> (дата обращения: 14.03.2025).
7. Денисов С. А., Домрачев А. А., Елсуков А. С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестн. Поволжск. гос. технол. ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32). С. 34–46. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.34.
8. Phantom 4 Multispectral // Авторизованный магазин DJI. URL: <https://coptermarket.by/dji-shop/drones/phantom-4-kvadrokopter/phantom-4-multispectral> (дата обращения: 14.03.2025).
9. Подвес с камерой и лазерным дальномером DJI Zenmuse H20 // Хобби Парк. URL: https://hobbypark.by/catalog/stedikamy_i_podvesy_dji/podves_s_kameroy_i_lazernym_dalnomerom_dji_zenmuse_h20/ (дата обращения: 14.03.2025).
10. Платформа DJI Matrice 300 RTK // Хобби Парк. URL: https://hobbypark.by/catalog/kvadrokoptery_dji/platforma_dji_matrice_300_rtk/ (дата обращения: 14.03.2025).
11. Оплетев А. С., Жигулин Е. В., Косов В. А. Использование вегетационного индекса NDVI для оценки состояния лесных насаждений на нарушенных землях // Леса России и хозяйство в них. 2019. № 3 (70). С. 15–23.
12. Талыпов К. К., Аманова Н. Т. Использование вегетационных индексов для улучшения дешифровочных свойств снимка // Физика. 2020. № 1-1. С. 43–47.
13. Аманова Н. Т., Талыпов К. К. Обзорный анализ вегетационных индексов растительности // Физика. 2022. № 1. С. 25–29.
14. Вегетационные индексы для сельского хозяйства // EOS Data Analytics. URL: <https://eos.com/ru/blog/vegetacionnye-indeksy/> (дата обращения: 14.03.2025).
15. Цай С. С., Гормаш М. С. Использование материалов лидарной съемки для целей определения высот насаждений // Лесное хоз-во: материалы 86-й науч.-техн. конф. профес.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов (с междунар. участием), Минск, 31 янв. – 12 февр. 2022 г. Минск, 2022. С. 351–352.
16. Цай С. С. Использование материалов лидарной съемки участков лесного фонда, полученных с беспилотных летательных аппаратов, для определения углов наклона местности // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (282). С. 27–30. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-4.

References

1. Galetskaya G. A., Vyunov M. V., Zhelezova S. V., Zavalishin S. I. Acilites of processing and analysis of ultralight UAV Sensefly ebee data in the field of forestry. *Interexpo Geo-Sibir* [Interexpo Geo-Siberia], 2015, vol. 3, no. 4, pp. 11–18 (In Russian).
2. Raldugin A. M., Kalita G. A. Application of unmanned aerial vehicles in forestry. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of forest complex], 2024, no. 66, pp. 42–47 (In Russian).
3. Kononova S. A., Perepichaev A. A., Ryzhova N. A. The use of unmanned aerial vehicles (UAVS) in forestry. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa* [Actual problems of forest complex], 2023, no. 64, pp. 58–60 (In Russian).
4. Zvyaginцев V. B., Malashevich D. G., Zhdanovich S. A. Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in forestry for forest protection measures. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 5, Economics and Management, 2023, no. 2 (274), pp. 43–49. DOI: 10.52065/2520-6877-2023-274-2-6 (In Russian).
5. Regulation on the procedure for reforestation and afforestation: Approved by the Resolution of the Ministry of Forestry of the Republic of Belarus, 19.12.2016, no. 80. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21631578> (accessed 14.03.2025) (In Russian).

6. ТКР 667–2022 (33090). Rules of reforestation and afforestation. Technical code of established practice of the Republic of Belarus. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W02441127p> (accessed 14.03.2025) (In Russian).
7. Denisov S. A., Domrachev A. A., Elsukov A. S. Quadrocopter Practical Application for Forest Regeneration Monitoring. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Volga State University of Technology], Series Forest. Ecology. Nature Management, 2016, no. 4 (32), pp. 34–46. DOI: 10.15350/2306-2827.2016.4.34 (In Russian).
8. Phantom 4 Multispectral. Available at: <https://coptermarket.by/dji-shop/drones/phantom-4-kvadrokofter/phantom-4-multispectral> (accessed 14.03.2025) (In Russian).
9. DJI Zenmuse H20 gimbal with camera and laser rangefinder. Available at: https://hobbypark.by/catalog/stedikamy_i_podvesy_dji/podves_s_kameroj_i_lazernym_dalnomerom_dji_zenmuse_h20/ (accessed 14.03.2025) (In Russian).
10. DJI Matrice 300 RTK platform. Available at: https://hobbypark.by/catalog/kvadrokoftery_dji/platforma_dji_matrice_300_rtk/ (accessed 14.03.2025) (In Russian).
11. Opletaev A., Zhigulin E., Kosov V. Using the NDVI vegetation index to assess the state of forest plantations on disturbed land. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh* [Forests of Russia and their management], 2019, no. 3 (70), pp. 15–23 (In Russian).
12. Talypov K. K., Amanova N. T. Using vegetation indices to improve deciphering properties of the image. *Fizika* [Physics], 2020, no. 1-1, pp. 43–47 (In Russian).
13. Amanova N. T., Talypov K. K. Survey analysis of vegetation indices. *Fizika* [Physics], 2022, no. 1, pp. 25–29 (In Russian).
14. *Vegetatsionnyye indeksy dlya sel'skogo khozyaystva* [Vegetation indices for agriculture]. Available at: <https://eos.com/ru/blog/vegetatsionnyye-indeksy/> (accessed 14.03.2025) (In Russian).
15. Tsai S. S., Gormash M. S. Using lidar surveying materials to determine the heights of forest stands. *Lesnoe khozyaystvo: materialy 86-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiyem)* [Forestry: materials of 86th scientific and technical conference of the teaching staff, research workers and postgraduate students (with international participation)]. Minsk, 2022, pp. 351–352 (In Russian).
16. Tsai S. S. Using lidar data of forest areas received from drone for detecting the angle of the terrain. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2024, no. 2 (282), pp. 27–30. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-282-4 (In Russian).

Информация об авторах

Цай Сергей Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tsai@belstu.by

Ильючик Михаил Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, заместитель генерального директора по информационным технологиям РУП «Белгослес» (ул. Железнодорожная, 27/1, 220089, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: info@belgosles.by

Толкач Игорь Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Шульга Екатерина Александровна – аспирант кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: shulga@belstu.by

Information about the authors

Tsai Siarhey Siarheevich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tsai@belstu.by

Ilyuchik Mikhail Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Deputy Director General for Information Technology. RUE “Belgosles” (27/1 Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: info@belgosles.by

Tolkach Igor Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Shulga Ekaterina Alexandrovna – PhD student, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shulga@belstu.by

Поступила 15.03.2025