DOI 10.21178/2079–6080.2020.2.46
УДК 630*587.6

Опыт применения беспилотного летательного аппарата для инвентаризации и оценки опытных лесных культур Лисинской части учебно-опытного лесничества Ленинградской области

© А.С. Алексеев, Ю.И. Данилов, А.А. Никифоров, М.Е. Гузюк,
Д.М. Киреев

Experience in unmanned air vehicle application for inventory and assesmant of experimental forest plantations in Lisino part of training and experimental forest district of Leningrad region

A.S. Alekseev, Iu.I. Danilov, A.A. Nikiforov, M.E. Guzuk, D.M. Kireev (Saint-Petersburg State Forest Technical University)

In the article results of experimental plantation assessment and inventory made by UAV are presented. Plantation parameters such as the area, the length of the rows with planted trees, number of planted trees and trees heights was assessed both on ground and remotely. The aim of the research was to estimate systematic and random errors of estimations done by remote sensing method. The high resolution aerial photograph of the plantation established by 1997 was done by Geoscan 101 Pro UAV in the year 2017, 20 years after the establishment of the plantation. AgiSoft PhotoScan Pro software was used for photogrammetric treatment of the obtained image, ortophotoplan and plantation 3D model development. Multilevel special GIS made using MapInfo Professional 6.0 software was developed for plantation parameters calculations. As a result of the plantation parameters measurements made by remote sensing and ground method the following systematic and random errors was revealed: area – 3,8 %, row length – systematic error as much as –6,9 meters, random 7,39 meter; trees height – systematic error as much as 0,4 meter, random 1,24 meter; number of trees – no any error. Taken into account the accuracy of used on UAV GPS positioning device which is as much as ± 10 meter and also accuracy of ground measurements which was as much as ± 5 meter we may conclude that remotely determined by using UAV plantation parameters are enough accurate and precise.

Keywords: aerial photography, forestry, geographic information system, remote sensing, unmanned aerial vehicle

А.С. Алексеев, Ю.И. Данилов, А.А. Никифоров, М.Е. Гузюк, Д.М. Киреев

В статье представлены результаты оценки и инвентаризации лесных культур по материалам аэрофотосъемки сверхвысокого разрешения с применением БПЛА. Параметры лесных культур, такие как площадь, длина рядов, количество и высота деревьев, оценивались как наземным, так и дистанционным методом. Целью исследования была оценка систематических и случайных ошибок измерений, выполненных дистанционным методом, результаты наземных измерений использовались в качестве эталона. Аэрофотосъемка высокого разрешения лесных культур была выполнена БПЛА Geoscan 101 Pro в 2017 году, через 20 лет после создания лесных культур. Съемка производилась с высоты 200 метров и с пространственным разрешением 4.47 см/пкс. Программное обеспечение AgiSoft PhotoScan Pro использовалось для фотограмметрической обработки, создания ортофотоплана и 3D-модели объекта исследования. Для расчета параметров лесных культур была разработана многослойная специализированная ГИС с использованием программного обеспечения MapInfo Professional 6.0. В результате измерений, выполненных дистанционным и наземным методом, были выявлены следующие систематические и случайные ошибки: площадь культур — 3,8 %, длина ряда лесных культур — систематическая ошибка до –6,9 м, случайная — 7,39 м; высота деревьев — систематическая ошибка 0,4 метра, случайная — 1,24 метра; количество деревьев определялось без ошибок. Принимая во внимание точность прибора геопозиционирования (GPS), установленного на БПЛА, которая составляет ± 10 метров, а также точность наземных измерений, которая составляла ± 5 метров, можно сделать вывод об удовлетворительной точности дистанционных измерений и возможности использования аэрофотосъемки с БПЛА для обследования, инвентаризации и фотофиксации лесных культур.

Ключевые слова: аэрофотосъемка, беспилотный летательный аппарат, геоинформационная система, дистанционные методы, лесные культуры

Алексеев Александр Сергеевич — д-р геогр. наук, профессор, заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

Данилов Юрий Иванович — канд. с.-х. наук, доцент, заведующий кафедрой почвоведения и лесных культур

Никифоров Александр Александрович — канд. с.-х. наук, доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

Гузюк Марианна Евгеньевна — канд. с.-х. наук, доцент кафедры почвоведения и лесных культур

Киреев Дмитрий Михайлович — д-р с.-х. наук, профессор кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»

194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5

Телефон: 8 (812) 670–93–16; 8 (812) 670–93–11

E-mail: ltlg@spbftu.ru

Введение

Впервые применение дистанционных методов для изучения лесов было предложено в 30-е годы XX века А.Е. Новосельским и Г.Г. Самойловичем. В то время применялась мелкомасштабная аэрофотосъемка. В 70-х годах в интересах лесного хозяйства начали применять материалы космических съемок. В конце XX—начале XXI века активно развивается беспилотная авиация, которая позволяет получать снимки высокого и сверхвысокого разрешения [8, 10, 12, 22, 24]. Применение современных дистанционных методов в комплексе с ГИС-технологиями, цифровым моделированием позволяет перейти на новый качественный уровень проведения аэрофотосъемочных работ [6, 7, 11, 17, 19, 23, 26–30]. На кафедре лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова проведены исследования и разработан метод определения таксационных характеристик насаждений по снимкам сверхвысокого разрешения с беспилотного летательного аппарата, а также метод дистанционного обследования и фотофиксации лесных культур [3–5, 25]. Указанные методы успешно апробированы, в результате получены с достаточной нормативной точностью величины общего запаса, значения средних диаметра и высоты насаждений на единице площади, оценки длин рядов, высот и численности деревьев посаженных лесных культур.

С начала 2018 г. вступил в силу Приказ Минприроды России от 21.08.2017 г. № 452 “Об утверждении перечня информации, включаемой в отчет о воспроизводстве лесов и лесоразведении, формы и порядка представления отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении, а также требований к формату отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении в электронной форме” [20].

Согласно приказу, отчет о воспроизводстве лесов и лесоразведении представляется

гражданами, индивидуальными предпринимателями и юридическими лицами, которые осуществляют воспроизводство лесов и лесоразведение, в органы государственной власти, органы местного самоуправления в пределах их полномочий по форме № 1-ВЛ.

Приказом утверждены:

- перечень информации, включаемой в отчет о воспроизводстве лесов и лесоразведении (Приложение 1);
- форма отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении (Приложение 2);
- порядок представления отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении (Приложение 3);
- требования к формату отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении в электронной форме (Приложение 4).

Согласно пункту 5 порядка представления отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении материалы дистанционного зондирования должны прилагаться к отчету для определения площади и местоположения участка относительно границ кварталов. В качестве основы наглядного изображения отмечена возможность применения аэрофотоснимков с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), с пространственным разрешением не менее 15 метров. Таким образом, применение БПЛА для указанных целей получило нормативно-правовую основу и теперь является законным инструментом при разработке проекта лесных культур, оценке приживаемости с проведением инвентаризации первого и третьего года роста культур, переводе лесных культур в покрытые лесной растительностью земли, а также при составлении отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении.

Объекты и методика исследования

Учебно-опытное лесничество Комитета по природным ресурсам Ленинградской области представлено двумя несоприкасающимися лесными массивами в приблизительно центральной части Ленинградской области.

Охтинская часть лесничества расположена на территории Всеволожского муниципального района, Лисинская часть лесничества — на территории Тосненского муниципального района [15].

Лисинская часть лесничества — компактный лесной массив — это объект с длительной лесокультурной и научной историей, который представляет собой типичный образец интенсивного лесного хозяйства для данного лесного района, в котором всегда разрабатывались современные методы инвентаризации, использования, воспроизводства, охраны и защиты лесов на основе научных исследований [1, 9, 16].

Объектом исследования являются опытные лесные культуры секции № 3, которые находятся в Лисинской части лесничества, кв. 206, выдел 52. Состав насаждения до рубки 7Е2Б1Олс+Ос, полнота 0,7, запас 130 м³/га. Бывший тип леса — ельник кислично-черничный (С₂-С₃). Категория лесокультурной площади — вырубка ветровала. Почва слабоподзолистая модергумусная, суглинистая, влажная. Живой напочвенный покров в рядах: земляника, таволга, гравилат, в междурядьях произрастает иван-чай.

Лесные культуры были высажены в насыпные гряды. Обработка почвы выполнена летом 1997 года экскаватором Э-362 с прокладкой борозд глубиной 0,6–0,8 м и насыпкой гряд с обеих сторон шириной около 1 м. Все борозды выведены в ручей-собираТЕЛЬ.

Расстояние между грядами одной борозды 7–8 м, между крайними грядами двух борозд 4–6 м, среднее расстояние между бороздами 12 м.

На этой секции на 18 рядах (рис. А) были созданы культуры ели, сосны и лиственницы по различным вариантам: с сортировкой сеянцев ели, различными видами и возрастом посадочного материала.

1. Культуры ели с сортировкой сеянцев по размеру на мелкие, средние и крупные (ряды 1–6).

2. Культуры ели (начало рядов 7–18) были созданы по 9 вариантам:

- стандартными сеянцами трех лет (Е₃);
- стандартными саженцами 3-х возрастов (Е₂₊₂, Е₃₊₂, Е₃₊₄);
- тепличными однолетними сеянцами с закрытой корневой системой (Е_{1т}) с объемом субстрата 60 см³;
- тепличными двухлетними сеянцами с открытой корневой системой (Е_{2т});
- тепличными двухлетними сеянцами с закрытой корневой системой (Е_{1т+1оп}) с объемом субстрата 145 см³ и 225 см³;
- саженцами, выращенными из сеянцев с закрытой корневой системой в течение двух лет в школьном отделении (Е_{1т+2}).

3. Культуры сосны (продолжение рядов 7–18, кроме рядов 16 и 17) были созданы по 4 вариантам:

- стандартными сеянцами двух лет (С₂);
- стандартными сеянцами двух лет с отбором 10 % лучших по фенотипу (С₂, отбор 10 %);
- тепличными однолетними сеянцами (С_{1т});
- саженцами, выращенными из сеянцев с закрытой корневой системой в течение двух лет в школьном отделении (С_{1т+2}).

4. Культуры лиственницы сибирской созданы однолетними тепличными сеянцами с закрытой корневой системой (Лц_{1т}) с объемом субстрата 320 см³ (продолжение рядов 16–17).

Кроме этого, на секции № 3 вне рядов, по дискретным микроповышениям были созданы групповые культуры ели площадью 0,24 га. Посадка осуществлялась 3-летними стандартными сеянцами из Лисинского питомника конвертом по 5 сеянцев. Всего высажено 1790 растений на 358 площадках.

Для получения материалов дистанционного изучения лесных культур применялся автоматический комплекс для аэрофотосъемки Geoscan 101 Pro. В состав комплекса входит наземная станция управления полетами, беспилотное воздушное судно (БВС) и складная катапульта.

Рис. Схема рядов (А) и ортофотоплан (Б) опытных лесных культур, секция № 3 кв. 206 Лисинского лесничества

Наземная станция управления представляет собой переносной компьютер с установленным программным обеспечением Geoscan Planner и модем для связи с БПЛА.

БВС Geoscan 101 Pro оснащено цифровой фотокамерой с шторно-щелевым затвором с разрешением светочувствительной матрицы 24 мегапикселя и объективом 20 мм.

С помощью комплекса Geoscan 101 Pro можно получать материалы аэрофотосъемки с пространственным разрешением до 3 см на пиксель. Фотограмметрическая обработка и трансформирование снимков выполняются с помощью программного обеспечения AgiSoft PhotoScan Pro. В результате обработки серий снимков получают ортофотопланы и 3D-модели объектов съемки.

Исследование опытных лесных культур выполнено по материалам аэрофотосъемки беспилотным летательным аппаратом Geoscan 101 Pro в 2017 году с высоты 200 метров с пространственным разрешением 4,47 см/пкс.

Для определения местоположения участка относительно границ кварталов, а также для вычисления площадей применялась многослойная специализированная ГИС на территорию Лисинской части Учебно-опытного лесничества [2, 18]. ГИС создана в среде MapInfo Professional 6.0 на основе данных лесоустройства о характеристиках лесного фонда и топографической карты.

Методика инвентаризации лесных культур по материалам дистанционного зондирования включает измерение площади объекта, определение длин рядов культивируемой породы, подсчет числа деревьев культивируемой породы и определение их высот.

Обычно закладывают пробные площади прямоугольной формы, которые располагают длинной стороной по середине междурядий. Каждая такая площадь по ширине должна захватывать в культурах, чистых по составу, не менее трех–четырех рядов культивируемой породы, а в смешанных — не менее полного цикла смешения. Размер пробных площадей

зависит от площади участка и должен составлять минимально: при площади до 3 га — 5 % от его общей площади, от 4 до 5 га — 4 %, от 6 до 10 га — 3 %, от 11 до 50 га — 2 %, от 50 до 100 га — 1,5 %, более 100 га — 1 %. [13, 14, 21].

На каждой пробной площади учитывают число посадочных мест с подразделением на две категории: с живыми растениями и погибшими. После окончания перечета определяют их общее количество и полученные данные переводят на 1 га.

В нашем случае создавались опытные культуры различными способами и видами посадочного материала, поэтому подсчет культивируемых пород осуществлялся по ортофотоплану (рис. Б) сплошным перечетом.

Определение высот лесных культур в рядах выполнялось по 3D-модели изучаемого объекта.

Сотрудниками кафедры почвоведения и лесных культур весной 2018 года было выполнено наземное обследование лесных культур.

По результатам инвентаризации делается заключение о состоянии лесных культур и намечаются необходимые лесохозяйственные мероприятия.

Результаты и обсуждение

Результаты наземного обследования изучаемых опытных лесных культур представлены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты наземного обследования опытных лесных культур
(весна 2018 года)

№ ряда	№ отрезка ряда	Длина отрезка ряда, м	Порода, вид и возраст посадочного материала	Число стволов на отрезке ряда, шт.		Средние	
				исходное	сохранившихся	Диаметр, см	Высота, м
1	1	75	ЕЗст средние	100	59	6,9±0,23	7,8
2	1	75	ЕЗст. средние	100	66	10,0±0,32	9,3
3	1	75	ЕЗ крупные	100	52	11,3±0,33	9,9
4	1	75	ЕЗ крупные	100	53	11,2±0,36	9,8
5	1	25	ЕЗ	60	29	9,8±0,41	9,2
	2	75	ЕЗ мелкие	100	48	10,8±0,38	9,7
6	1	33	ЕЗ	65	30	9,8±0,41	9,2
	2	75	ЕЗ мелкие	100	49	10,7±0,36	9,6
7	1	40	ЕЗст.	82	24	11,4±0,53	9,8
	2	40	С1т+2	53	35	14,9±0,49	11,1
8	1	40	Е2+2	88	39	10,7±0,36	9,6
	2	40	С2, отбор 10 %	102	29	13,6±0,50	10,7
9	1	46	ЕЗ+2	99	53	11,6±0,28	10,0
	2	190	С2	380	153	11,2±0,74	9,9
10	1	57	ЕЗ+4	69	35	14,9±0,50	11,0
	2	170	С2	340	170	11,2±0,74	9,9
11	1	40	Е1т-60 см ³ , ПМЗК	143	48	10,5±0,38	9,5
	2	72	С1т	150	49	12,4±0,55	10,3

№ ряда	№ отрезка ряда	Длина отрезка ряда, м	Порода, вид и возраст посадочного материала	Число стволов на отрезке ряда, шт.		Средние	
				исходное	сохранившихся	Диаметр, см	Высота, м
12	1	40	Е1т+1оп-145 см ³ , ПМЗК	91	50	8,5±0,38	8,6
	2	52	+С2	76	32	14,0±0,50	10,9
13	1	40	Е1т+1оп-225 см ³ , ПМЗК	82	36	9,2±0,48	9,0
	2	54	С2	87	25	13,8±0,63	10,8
14	1	40	Е1т+2	91	40	9,1±0,55	8,9
15	1	52	Е2т	77	36	8,2±0,35	8,5
16	1	56	Лц1т-320 см ³ , ПМЗК	58	34	14,3±0,37	10,3
	2	27	Е3	58	23	11,0±0,50	9,7
17	1	18	Лц1т-320 см ³ , ПМЗК	19	10	14,3±0,37	10,3
	2	24	Е3	42	25	9,9±0,31	9,3
18	1	32	Е3	54	40	9,7±0,41	9,2

Результаты измерения длин отрезков рядов и высот опытных лесных культур, полученных наземным и дистанционным методами, а также их отклонения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений длины отрезков рядов, высоты лесных культур наземным и дистанционным методами и их отклонения

№ ряда	№ отрезка ряда	Длина отрезка ряда, м			Высота, м		
		Измерено наземным методом	Измерено по фотоплану	Отклонение	Измерено наземным методом	Измерено по 3D-модели	Отклонение
1	1	75	65	–10	7,8	10,6	2,8
2	1	75	65	–10	9,3	10,4	1,1
3	1	75	65	–10	9,9	12,3	2,4
4	1	75	65	–10	9,8	9,5	–0,3
5	1	25	27	2	9,2	12,3	3,1
	2	75	66	–9	9,7	9,8	0,1
6	1	33	31	–2	9,2	11,3	2,1
	2	75	64	–11	9,6	10,9	1,3
7	1	40	31	–9	9,8	9,1	–0,7
	2	40	46	6	11,1	11,9	0,8

№ ряда	№ отрезка ряда	Длина отрезка ряда, м			Высота, м		
		Измерено наземным методом	Измерено по фотоплану	Отклонение	Измерено наземным методом	Измерено по 3D-модели	Отклонение
8	1	40	27	–13	9,6	9,8	0,2
	2	40	47	7	10,7	11,1	0,4
9	1	46	40	–6	10	9,9	–0,1
	2	190	167	–23	9,9	9,7	–0,2
10	1	57	47	–10	11	12,4	1,4
	2	170	159	–11	9,9	9	–0,9
11	1	40	30	–10	9,5	9,8	0,3
	2	72	60	–12	10,3	11	0,7
12	1	40	32	–8	8,6	6,7	–1,9
	2	52	49	–3	10,9	11,2	0,3
13	1	40	31	–9	9	7,4	–1,6
	2	54	54	0	10,8	10,4	–0,4
14	1	40	36	–4	8,9	9,4	0,5
15	1	52	44	–8	8,5	8,2	–0,3
16	1	56	32	–24	10,3	10,7	0,4
	2	27	31	4	9,7	11,3	1,6
17	1	18	21	3	10,3	9,9	–0,4
	2	24	14	–10	9,3	9,8	0,5
18	1	32	32	0	9,2	7,7	–1,5
Ошибка		Систематическая		–6,90		0,40	
		Случайная		7,39		1,24	

На основе данных таблицы 2 были рассчитаны систематическая и случайная ошибки измерения расстояний и высот дистанционным методом, наземные измерения были взяты в качестве эталона. Систематическая ошибка измерений длин отрезков рядов по ортофотоплану дистанционным методом составила –6,9 метра. Это свидетельствует об отклонении результатов измерений дистанционным методом от наземного в сторону занижения, случайная ошибка составила 7,39 метра. Такие величины ошибок укладываются в пределы точности прибора геопозиционирования БПЛА Geoscan 101 Pro, которая в горизонтальной плоскости составляет ± 10 м, а также в пределы точности наземных

измерений ± 5 метров. В целом можно сделать вывод о достаточной точности измерений длин отрезков дистанционным методом.

При определении высот насаждений в отрезках рядов по 3D-модели секции № 3 лесных культур систематическая ошибка составила 0,4 м, а случайная – 1,24 м. Оба эти показателя можно оценить как приемлемые, с учетом точности измерения высоты наземным способом, которая составляет ± 1 м.

Площадь обследованных лесных культур равна 2,7 га, измеренная дистанционным методом по ортофотоплану средствами ГИС она составила 2,6 га с абсолютной погрешностью 0,1 га и относительной – 3,8 %.

При подсчете деревьев выявлено полное соответствие натурных исследований лесных культур и инвентаризации по материалам дистанционного зондирования, как систематическая, так и случайная ошибка равны нулю. В ходе наземных и дистанционных обследований не было выявлено погибших деревьев, что свидетельствует о наличии своевременно проведенных лесохозяйственных мероприятий по уходу за лесными культурами.

Выводы

Использование БПЛА в настоящее время получило нормативно-правовое обоснование в виде Приказа Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 21.08.2017 г. № 452 «Об утверждении перечня информации, включаемой в отчет о воспроизводстве лесов и лесоразведении, формы и порядка представления отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении, а также требований к формату отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении в электронной форме», что позволяет начать их массовое применение для решения указанных в приказе задач.

Разработанный метод дистанционного изучения лесных культур может применяться для контроля процессов лесовосстановления после рубок, проводимых лесозаготовителями, по срокам и качеству проводимых работ. Предложенный метод может использоваться с высокой эффективностью для мониторинга лесовосстановительных работ, особенно если необходимо обследовать несколько объектов,

расположенных на большой территории. Проведенное изучение лесных культур в Лисинской части Учебно-опытного лесничества Ленинградской области с применением БПЛА показало возможность их применения для этой цели и удовлетворительное совпадение результатов измерений площадей, расстояний и высот, проведенных дистанционным и наземным методами.

Измерения параметров лесных культур дистанционным методом с применением БПЛА включают ряд необходимых этапов: аэрофото-съемка; фотограмметрическая обработка аэрофотоснимков высокого разрешения с помощью специального программного обеспечения для получения ортофотоплана и 3D-модели; разработка многослойной ГИС, например, с использованием MapInfo Professional 6.0; измерения площадей, расстояний, высот, численности и состояния деревьев в составе лесных культур.

К недостаткам дистанционного метода обследования лесных культур с помощью БПЛА следует отнести следующие: для выполнения всех указанных выше этапов работ необходимы: высококвалифицированный, специально обученный персонал, дорогостоящее оборудование и соответствующее программное обеспечение. Эти трудности являются преодолимыми со временем, но уже и сейчас такая технология может быть востребована для обследования труднодоступных объектов, расположенных, например, на удаленных территориях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 200 лет лесному учебному и опытному делу в Лисинском учебно-опытном лесхозе // Под ред. Г.И. Редько. – СПб.: ЛТА, 1997. – 356 с.
2. Алексеев, А.С. Геоинформационная система учебно-опытного лесхоза / А.С. Алексеев, А.М. Заяц, А.А. Никифоров // Труды VI-й международной научно-практической конференции «Системный анализ в проектировании и управлении». – СПб.: СПбГПУ, 2002. – С. 347–349.
3. Алексеев, А.С. Метод определения запаса насаждений на основе правила 3/2 и снимкам сверхвысокого разрешения с беспилотного летательного аппарата / А.С. Алексеев, А.А. Никифоров, А.А. Михайлова, М.Р. Вагизов // Материалы научно-технической конференции «Леса России: политика, промышленность, наука, образование». – СПб.: СПбГЛТУ, 2016, № 1. – С. 17–20.

4. Алексеев, А.С. Новый метод определения запаса по снимкам сверхвысокого разрешения с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) / А.С. Алексеев, А.А. Никифоров, А.А. Михайлова, М.Р. Вагизов // Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии. Доклады VI Всероссийской конференции (с международным участием). – М.: ЦЭПЛИ РАН, 2016, № 1. – С. 80–84.
5. Алексеев, А.С. Новый метод определения таксационных характеристик насаждений по снимкам сверхвысокого разрешения с беспилотного летательного аппарата / А.С. Алексеев, А.А. Никифоров, А.А. Михайлова, М.Р. Вагизов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – СПб.: СПбГЛТУ, 2016. – № 215. – С. 6–18.
6. Беляев, Б.И. Приборы и методы аэрокосмического зондирования природных объектов / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский, В.А. Сосенко // Вестник БГУ, Серия 1. – 2011. – № 3, – С. 38–47.
7. Добрецов, Н.Н. Технологии компьютерного картографирования, ГИС-анализа и моделирования природно-антропогенных экосистем на примере Новосибирского академгородка / Н.Н. Добрецов, И.Д. Зольников, Н.В. Глушкова, В.А. Лямина, К.С. Соколов, Н.И. Макунина, В.В. Смирнов, Д.В. Пчельников // Вестник КемГУ, 2012. – Т. 2. – № 4 (52). – С. 1–7.
8. Домрачев, А.А. Основы дистанционного зондирования земли (на примере ENVIA4.8): Практикум / А.А. Домрачев, М.А. Ануфриев. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2019. – 154 с.
9. Егоров, А.А. Флора Лисинского учебно-опытного лесхоза: Учебное пособие / А. А. Егоров, Ю. В. Титов. – СПб.: ЛТА, 1997. – 96 с.
10. Измestьев, А.Г. Фотограмметрия и дистанционные методы земли: Учебное пособие / А.Г. Измestьев. – Кемерово: КузГТУ, 2017. – 119 с.
11. Карпов, А.А. Разработка методики для оценки успешности лесовосстановления дистанционными методами / А.А. Карпов, Н.Р. Пирцхалава, А.Г. Гудина, Р.А. Алешко, А.П. Богданов // Лесотехнический журнал. – 2019, Т. 9, № 3 (35). – С. 25–34.
12. Козодеров, В.В. Тематическая обработка многоспектральных и гиперспектральных аэрокосмических изображений: Учебное пособие / В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин, Е.В. Дмитриев. – М.: МФТИ, 2013. – 224 с.
13. Лесные культуры: Учебник / Под общ. ред. проф. А.Р. Родина. – М.: ВНИИЛМ, 2002. – 440 с.
14. Лесохозяйственный регламент Учебно-опытного лесничества Ленинградской области, 2018. Электрон. дан. – Режим доступа: <https://nature.lenobl.ru/media/docs/9898/%D0%9B%D0%A5%D0%A0%20%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%BE-%D0%BE%D0%BF%D1%8B%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0%202018.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. – Дата обращения: 24.01.2020.
15. Лисино. 200 лет служения лесам России (под ред. А.В. Селиховкина). – СПб.: СПбГЛТА, 2009. – 224 с.
16. Любимов, А.В. Аэрокосмические методы и геоинформационные системы в лесоведении, лесоводстве, лесоустройстве и лесной таксации. Англо-русский словарь специальных терминов и определений / А.В. Любимов, А.В. Грязькин, А.А. Селиванов. – СПб.: Лань, 2019. – 376 с.
17. Малаховец, П.М. Лесные культуры: учеб. пособие / П.М. Малаховец; Сев. (Арктич.) фед. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2012. – 222 с.
18. Никифоров, А.А. Разработка информационной системы Лисинского УОЛХ с применением ГИС-технологий / А.А. Никифоров // Сборник докладов молодых ученых на ежегодной научной конференции Санкт-Петербургской лесотехнической академии. Выпуск 6. – СПб.: СПбГЛТА, 2002. – С. 54–59.
19. Перепечина, Ю.И. Учет и оценка лесов, возникших на сельскохозяйственных землях с использованием данных дистанционного зондирования Земли / Ю.И. Перепечина, О.И. Глушенков, Р.С. Корсики // Известия вузов. Лесной журнал. – 2016. – № 4. – С. 71–80.

20. Приказ Минприроды России от 21.08.2017 N 452 “Об утверждении перечня информации, включаемой в отчет о воспроизводстве лесов и лесоразведении, формы и порядка представления отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении, а также требований к формату отчета о воспроизводстве лесов и лесоразведении в электронной форме”. Электрон. дан. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286576/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdaddd518/, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус. – Дата обращения: 24.01.2020.
21. Редько, Г.И. Лесные культуры: учеб. пособие для ВУЗов / Г.И. Редько, М.Д. Мерзленко, Н.А. Бабич. – СПб.: СПбГЛТА, 2005. – 556 с.
22. Рис, У.Г. Основы дистанционного зондирования / У.Г. Рис. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
23. Рыбаков, Г.К. Оценка среднего объема древостоя с использованием RGB аэрофотоснимков и цифровой модели поверхности высокого разрешения, полученных с беспилотного летательного аппарата и мобильного приложения Трестима / Г.К. Рыбаков // Сибирский лесной журнал. – 2017. – № 3. – С. 3–18. (на англ. яз.)
24. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / Ред. В.В. Еремеева. – М.: Физматлит, 2015. – 460 с.
25. Alekseev, A. The use of unmanned aerial vehicle (UAV) for inventory and assessment of the experimental plantation in Lisino training and experimental forest of Saint-Petersburg State Forest Technical University / A. Alekseev, Yu. Danilov, A. Nikiforov, M. Guzik, D. Kireev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Sciences 316. – England: Institute of Physics. – 2019. – no. 316. – pp. 1–8.
26. Giannetti, F. A new approach with DTM independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data / F. Giannetti, G. Chirici, T. Gobakken, E. Næsset, D. Travaglini, S. Puliti. Remote Sens. Environ. – 2018. – 213. – pp. 195–205.
27. Jurjević, L. Impact of UAS Image Orientation on Accuracy of Forest Inventory Attributes / L. Jurjević, M. Gašparović, A. Simic Milas, I. Balenović. Remote Sens. – 2020. – 12 (3). – p. 404.
28. Krause, S. UAV Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring / S. Krause, T.G. Sanders, J.-P. Mund, K. Greve. Remote Sens. 2019, 11, p. 758.
29. Liang, X. Forest *in situ* observations using unmanned aerial vehicle as an alternative of terrestrial measurements / X. Liang, Y. Wang, J. Pyörälä, M. Lehtomäki, X. Yu, H. Kaartinen, A. Kukko, E. Honkavaara, A.E.I. Issaoui, O. Nevalainen, M. Vaaja, J.-P. Virtanen, M. Katoh, S. Deng. Forest ecosystems, 2019, vol. 6, no. 1, p. 20.
30. Panagiotidis, D. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery / D. Panagiotidis, A. Abdollahnejad, P. Surový, V. Chiteculo // Int. J. Remote Sens. 2017, 38, pp. 2392–2410.

REFERENCES

1. 200 let lesnomu uchebnomu i opytnomu delu v Lisinskom uchebno-opytnom leshoze. St. Petersburg, 1997, 356 p. (In Russian)
2. Alekseev A.S., Nikiforov A.A., Mihajlova A.A., Vagizov M.R. Metod opredelenija zapasa nasazhdenij na osnove pravila 3/2 i snimkam sverh vysokogo razreshenija s bespilotnogo letatel'nogo apparata. *Proceedings of the Scientific and Technical Conference “Lesnaja Rossija: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie”*. St. Petersburg, 2016, no. 1, pp. 17–20. (In Russian)
3. Alekseev A.S., Nikiforov A.A., Mihajlova A.A., Vagizov M.R. Novyj metod opredelenija zapasa po snimkam sverh vysokogo razreshenija s bespilotnogo letatel'nogo apparata (BPLA). *Ajerokosmicheskie metody i geoinformacionnye tehnologii v lesovedenii, lesnom hozjajstve i jekologii. Proceedings of the 6th All-Russian Conference*. Moscow, 2016, no. 1, pp. 80–84. (In Russian)

4. Alekseev A.S., Nikiforov A.A., Mihajlova A.A., Vagizov M.R. Novyj metod opredelenija taksacionnyh harakteristik nasazhdenij po snimkam sverhvyssokogo razreshenija s bespilotnogo letatel'nogo apparata. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. St. Petersburg, 2016, no. 215, pp. 6–18. (In Russian)
5. Alekseev A.S., Zajac A.M., Nikiforov A.A. Geoinformacionnaja sistema uchebno-opytного leshoza. *Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference "Sistemnyj analiz v proektirovanii i upravlenii"*. St. Petersburg, 2002, pp. 347–349. (In Russian)
6. Belyaev B.I., Katkovskij L.V., Sosenko V.A. Pribory i metody ajerokosmicheskogo zondirovanija prirodnyh ob#ektov. *Vestnik BTU*, 2011, no. 3, pp. 1–10. (In Russian)
7. Dobretsov N.N., Zol'nikov I.D., Glushkova N.V., Lyamina V.A., Sokolov K.S., Makunina N.I., Smirnov V.V., Pchel'nikov D.V. Tehnologii komp'juternogo kartografirovanija, GIS-analiza i modelirovanija prirodno-antropogennyh jekosistem na primere Novosibirskogo akademgorodka. *Vestnik KemGU*, 2012, no. 4 (52), vol. 2, pp. 1–7. (In Russian)
8. Domrachev A.A., Anufriev M.A. Osnovy distancionnogo zondirovanija zemli (na primere ENVI 4.8). Joshkar-Ola, 2019, 154 p. (In Russian)
9. Egorov A.A., Titov Ju.V. Flora Lisinskogo uchebno-opytного leshoza. St. Petersburg, 1997, 96 p. (In Russian)
10. Izmest'ev A.G. Fotogrammetrija i distancionnye metody zemli. Kemerovo, 2017, 119 p. (In Russian)
11. Karpov A.A., Pirchalava-Karpova N.R., Aleshko R.A., Bogdanov A.P., Gudina A.G. Razrabotka metodiki dlja ocenki uspešnosti lesovosstanovlenija distancionnymi metodami. *Lesotekhnicheskij zhurnal*, 2019, vol. 9, no. 3 (35). pp. 25–34. (In Russian)
12. Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Dmitriev E.V. Tematicheskaya obrabotka mnogospektral'nyh i giperspektral'nyh ajerokosmicheskikh izobrazhenij. Moscow, 2013, 224 p. (In Russian)
13. Lesnye kul'tury. Moscow, 2002, 440 p. (In Russian)
14. Leshozozajstvennyj reglament Uchebno-opytного lesnichestva Leningradskoj oblasti, 2018. <https://nature.lenobl.ru/media/docs/9898/%D0%9B%D0%A5%D0%A0%20%D0%A3%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%BE-%D0%BE%D0%BF%D1%8B%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0%202018.pdf>, svobodny. (In Russian)
15. Lisino. 200 let sluzhenija lesam Rossii. St. Petersburg, 2009, 224 p. (In Russian)
16. Lyubimov A.V., Gryaz'kin A.V., Selivanov A.A. Ajerokosmicheskie metody i geoinformacionnye sistemy v lesovedenii, lesovodstve, lesoustrojstve i lesnoj taksacii. Anglo-russkij slovar' special'nyh terminov i opredelenij. St. Petersburg, 2019, 376 p. (In Russian)
17. Malakhovets P.M. Lesnye kul'tury. Arhangel'sk, 2012, 222 p. (In Russian)
18. Nikiforov A.A. Razrabotka informacionnoj sistemy Lisinskogo UOLH s primeneniem GIS-tehnologij. *Proceedings of the Conference Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*. St. Petersburg, 2002, no. 6, pp. 54–59. (In Russian)
19. Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Korsikov P.S. Uchet i ocenka lesov, voznikshih na sel'skohozijskij zemljah s ispol'zovaniem dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli. *Izvestija vuzov. Lesnoj zhurnal*, 2016, no. 4, pp. 71–80. (In Russian)
20. Prikaz Minprirody Rossii ot 21.08.2017 N 452 "Ob utverzhdenii perechnja informacii, vključaemoj v otčet o vosproizvodstve lesov i lesorazvedenii, formy i porjadka predstavlenija otčeta o vosproizvodstve lesov i lesorazvedenii, a takzhe trebovanij k formatu otčeta o vosproizvodstve lesov i lesorazvedenii v jelektronnoj forme". http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_286576/2ff7a8c72de3994f30496a0ccbb1ddafdaddf518/, svobodny. (In Russian)
21. Red'ko G.I., Merzlenko M.D., Babich N.A. Lesnye kul'tury. St. Petersburg, 2005, 556 p. (In Russian)

22. Ris U.G. Osnovy distancionnogo zondirovanija. Moscow, 2006, 336 p. (In Russian)
23. Rybakov G.K. Ocenka srednego obyema drevostoja s ispol'zovaniem RGB ajerofotosnimkov i cifrovoj modeli poverhnosti vysokogo razreshenija, poluchennyh s bespilotnogo letatel'nogo apparata i mobil'nogo prilozhenija Trestima. *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2017, no. 3, pp. 3–18. (In English)
24. Sovremennye tehnologii obrabotki dannyh distancionnogo zondirovanija Zemli. Moscow, 2015, 460 p. (In Russian)
25. Alekseev A., Danilov Yu., Nikiforov A., Guzik M., Kireev D. The use of unmanned aerial vehicle (UAV) for inventory and assessment of the experimental plantation in Lisino training and experimental forest of Saint-Petersburg State Forest Technical University. IOP Conference Series. Earth and Environmental Sciences. England, Institute of Physics, 2019, no. 316, pp. 1–8.
26. Giannetti F., Chirici G., Gobakken T., Næsset E., Travaglini D., Puliti S. A new approach with DTMindependent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data. *Remote Sens. Environ.*, 2018, no. 213, pp. 195–205.
27. Jurjević L., Gašparović M., Simić Milas A., Balenović I. Impact of UAS Image Orientation on Accuracy of Forest Inventory Attributes. *Remote Sens.*, 2020, no. 12, p. 404.
28. Krause, S. UAV Based Photogrammetric Tree Height Measurement for Intensive Forest Monitoring / S. Krause, T.G. Sanders, J.-P. Mund, K. Greve. *Remote Sens.* 2019, 11, p. 758.
29. Liang X., Wang Y., Pyörälä J., Lehtomäki M., Yu X., Kaartinen H., Kukko A., Honkavaara E., Issaoui A.E.I., Nevalainen O., Vaaja M., Virtanen J.-P., Katoh M., Deng S. Forest *in situ* observations using unmanned aerial vehicle as an alternative of terrestrial measurements. *Forest ecosystems*, 2019, vol. 6, no. 1, p. 20.
30. Panagiotidis, D. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery / D. Panagiotidis, A. Abdollahnejad, P. Surový, V. Chiteculo // *Int. J. Remote Sens.* 2017, 38, pp. 2392–2410.

Статья поступила в редакцию 26.02.2020