

Научная статья  
УДК 528.92 : 630.5  
EDN VMOIEY  
DOI 10.24419/LHI.2304-083.2026.1.06

## Возможности применения методов машинного обучения для пространственного моделирования основных таксационных характеристик лесов с использованием данных космической съёмки

**Владислав Вадимович Вечеров<sup>1</sup>**

кандидат сельскохозяйственных наук

**Антон Михайлович Бердов<sup>2</sup>**

кандидат биологических наук

**Аннотация.** Развитие методов машинного обучения способствует всё более широкому распространению данных дистанционного зондирования Земли в различных сферах деятельности, в том числе в лесном хозяйстве и в рамках лесоучётных работ, в частности. В исследовании проанализирована возможность применения методов машинного обучения для пространственного моделирования основных таксационных показателей лесов с использованием данных, полученных при государственной инвентаризации лесов, а также находящихся в открытом доступе космических снимков Landsat-8/9.

Качественные показатели лесов (древесная порода и состав насаждения) определяли путём классификации спутниковых снимков методом RandomForest, а количественные – с помощью многофакторной линейной регрессии на основании спектральной яркости каналов зимних космических снимков. Для получения векторных границ сегментов (условных выделов) и расчёта для них медианных значений таксационных показателей использована сегментация спутниковых изображений.

Средняя точность распознавания преобладающей породы в сегменте (условном выделе) по натурным данным составила 70%. При этом точность определения хвойных пород – 100%. Ошибки MAE (Mean Absolute Error) и RMSE (Root Mean Square Error) при прогнозировании основного количественного таксационного показателя – среднего запаса древостоя на 1 га – при наземной верификации смоделированных данных составили  $\pm 25,8$  и  $\pm 32,2\%$  соответственно.

**Ключевые слова:** машинное обучение, таксация, Landsat-8/9, ДЗЗ, QGIS.

**Для цитирования:** Вечеров В.В., Бердов А.М. Возможности применения методов машинного обучения для пространственного моделирования основных таксационных характеристик лесов с использованием данных космической съёмки. – Текст : электронный // Лесохозяйственная информация. 2026. № 1. С. 58–71. DOI 10.24419/LHI.2304-083.2026.1.06. <https://elibrary.ru/vmoiey>.

<sup>1</sup> ФГБУ «Рослесинфорг», начальник отдела (Москва, Российская Федерация), vecherov.vv@roslesinforг.ru

<sup>2</sup> ФГБУ «Рослесинфорг», главный аналитик (Москва, Российская Федерация), berdov.am@roslesinforг.ru

Original article

EDN VMOIEY

DOI 10.24419/LHI.2304-083.2026.1.06

## Machine Learning Applications for Spatial Modeling of Main Forest Inventory Characteristics Based on Satellite Imagery

**Vladislav V. Vecherov**<sup>1</sup>

*Candidate of Agricultural Sciences*

**Anton M. Berdov**<sup>2</sup>

*Candidate of Biological Sciences*

**Abstract.** The rapid development of machine learning methods and the increasing availability of remote sensing data offer opportunities for their application in various fields, including forestry in general and forest inventory work in particular. This paper assesses the potential for applying machine learning methods to spatial modeling of key forest inventory characteristics based on reference data obtained during state forest inventories and freely available Landsat-8/9 satellite images.

Qualitative characteristics (tree species and stand composition) were determined by classifying satellite images using the RandomForest method. Quantitative characteristics were obtained using multivariate linear regression on the spectral radiance of winter imagery channels.

Satellite image segmentation was used to obtain vector boundaries of conditional stands (segments) and calculate median values of taxation indicators for them.

The average accuracy of determining the dominant species in a segment (conditional stand) based on in-situ data was 70%. The accuracy of determining coniferous species was 100%. The errors MAE (Mean Absolute Error) and RMSE (root Mean Square Error) in determining the key quantitative taxation indicator – growing stock – during ground-truth verification of the modeled data were  $\pm 25.8\%$  and  $\pm 32.2\%$  respectively.

**Key words:** machine learning, forest inventory, Landsat-8/9, remote sensing, QGIS

**For citation:** Vecherov V., Berdov A. Machine Learning Applications for Spatial Modeling of Main Forest Inventory Characteristics Based on Satellite Imagery. – Text : electronic // Forestry Information. 2026. № 1. P. 58–71. DOI 10.24419/LHI.2304-083.2026.1.06. <https://elibrary.ru/vmoiey>.

<sup>1</sup> FSBI “Roslesinforg”, Head of Department (Moscow, Russian Federation), [vecherov.vv@roslesinforg.ru](mailto:vecherov.vv@roslesinforg.ru)

<sup>2</sup> FSBI “Roslesinforg”, Chief Analyst (Moscow, Russian Federation), [berdov.am@roslesinforg.ru](mailto:berdov.am@roslesinforg.ru)

## Введение

В современном мире дистанционные технологии становятся предпочтительным инструментом для определения количественных и качественных показателей лесов. Эта тенденция объясняется, с одной стороны, недостаточной актуальностью информации, полученной традиционными методами лесоустройства [1, 2], а с другой – значительной площадью труднодоступных лесов, где экстенсивное ведение лесного хозяйства требует применения дорогостоящих специализированных транспортных средств (вездеходной и вертолетной техники) для проведения полевых исследований [3].

Дальнейшее развитие технологии моделирования основных таксационных характеристик лесов напрямую зависит от широкой доступности спутниковых данных, которые являются ключевым элементом современных методов картографирования растительного покрова, основанных на дистанционном зондировании Земли (ДДЗ).

Анализ литературных источников свидетельствует о возможности оценки таксационных показателей насаждений по их спектрально-яркостным характеристикам и вегетационным индексам [4–6]. Кроме того, установлена взаимосвязь таксационных (средний запас, средняя высота, породный состав) и спектрально-яркостных характеристик по зелёному, красному и инфракрасному каналам космического снимка [7]. При этом более высокая точность определения запаса и полноты насаждений, количества деревьев на 1 га достигается при дешифрировании зимних космических снимков [4, 5].

В ряде работ отмечены преимущества объектно-ориентированного подхода (сегментации) автоматизированной обработки данных спутниковой съёмки для формирования границ условно однородных пространственных объектов (условных выделов) [4, 5, 8].

Исследование проводилось специалистами ФГБУ «Рослесинфорг» в рамках апробации элементов Концепции единой системы

лесоучётных работ Российской Федерации, разрабатываемой во исполнение поручения Президента Российской Федерации от 18.09.2024 № Пр-1898.

Цель исследований – оценка методических подходов моделирования основных таксационных показателей насаждений с использованием данных, полученных при государственной инвентаризации лесов, и материалов космической съёмки среднего пространственного разрешения.

## Объекты и методы исследования

Эксперимент проведён на территории Меленковского лесничества Владимирской обл. в течение вегетационного периода 2025 г. Общая площадь экспериментального объекта, в соответствии с формой 3 государственного лесного реестра, на 01.01.2025 составила 120,4 тыс. га.

Работы по оценке состояния лесов, их количественных и качественных характеристик в рамках государственной инвентаризации лесов (ГИЛ) второго цикла на территории Владимирской обл. были завершены в 2022 г.

Для выявления корреляции между таксационными характеристиками, полученными при наземной таксации, и дешифровочно-таксационными показателями, определёнными по данным дистанционного зондирования Земли, используют таксационно-дешифровочные участки (ТДУ), которые представляют собой квадрат  $150 \times 150$  м [9]. За основу обучения (в качестве эталонов) были приняты результаты таксации на 158 ТДУ, заложенных при выполнении работ второго цикла ГИЛ на территории Владимирской обл.

Таксация лесов на ТДУ осуществляется глазомерно-измерительным способом в соответствии с требованиями Лесостроительной инструкции с определением средних значений лесотаксационных показателей. В зависимости от состояния лесного насаждения (наличия или отсутствия подроста и/или подлеска, ограничивающих зону видимости) на ТДУ закладывают реласкопические площадки и/или круговые пересчётные площадки постоянного радиуса.

В рамках эксперимента применяли бесплатное программное обеспечение (ГИС-система QGIS, модуль QGIS Orfeo Toolbox, SQL+Python) и находящиеся в открытом доступе оптические спутниковые снимки среднего пространственно-го разрешения Landsat-8/9 (30 м/пкс)<sup>1</sup>.

Из исходных сцен спутниковых снимков Landsat-8/9 формировали бесшовные безоблачные разновременные мозаики на субъект Российской Федерации: летние – за вегетационный период, зимние – с наличием устойчивого снежного покрова. Мозаики создавали с использованием наиболее чувствительных к изменениям состояния растительности каналов (Red, NIR, SWIR1, SWIR2). В итоге было получено мультиспектральное композитное спутниковое изображение из 8 каналов.

Ключевой технологической операцией является автоматизированное выделение векторных границ – сегментов (условных выделов) – путём разделения мультиспектрального композитного спутникового изображения с последующим объединением смежных областей (сегментов) в случае их относительной однородности. Сегментацию проводили в среде QGIS методом Large-Scale Mean-Shift (LSMS) из бесплатной библиотеки Orfeo Toolbox<sup>2</sup>.

Далее осуществлялось попиксельное обучение мультиспектрального композитного спутникового изображения на основании данных ТДУ с применением обучаемой классификации методом RandomForest. Исходные данные делили в соотношении 70/30: большая часть использовалась для обучения, меньшая – для валидации.

Моделирование показателей проводили с помощью регрессионных взаимосвязей между спектральной яркостью каналов спутниковой съёмки и количественными показателями насаждений, а также таблиц хода роста и стандартных таксационных формул (расчёт числа стволов на 1 га путём деления суммы площадей поперечных сечений стволов на величину поперечного сечения среднего дерева, полученную по

формуле площади круга со средним диаметром ствола на высоте 1,3 м) с последующей оценкой медианных значений в границах сегментов (условных выделов). Расчёт параметров регрессионных уравнений проведён с помощью библиотек Scikit-Learn, Pandas и Seaborn языка программирования Python.

В рамках исследования определены следующие количественные и качественные показатели: породный состав насаждения, преобладающая порода, средняя высота, диаметр на высоте 1,3 м, сумма площадей поперечных сечений, количество стволов на 1 га, класс бонитета, относительная полнота, запас насаждения на 1 га.

Оценку адекватности модели выполняли путём сравнения моделируемых показателей с результатами натурного обследования отобранных тестовых сегментов (условных выделов), таксация которых проводилась в 2025 г. одновременно с полевыми работами по лесоустройству Меленковского лесничества.

Всего было обследовано 30 тестовых сегментов (условных выделов), равномерно размещённых по территории объекта работ, таксация которых, в соответствии с требованиями Лесоустроительной инструкции [10], осуществлялась глазомерно-измерительным способом.

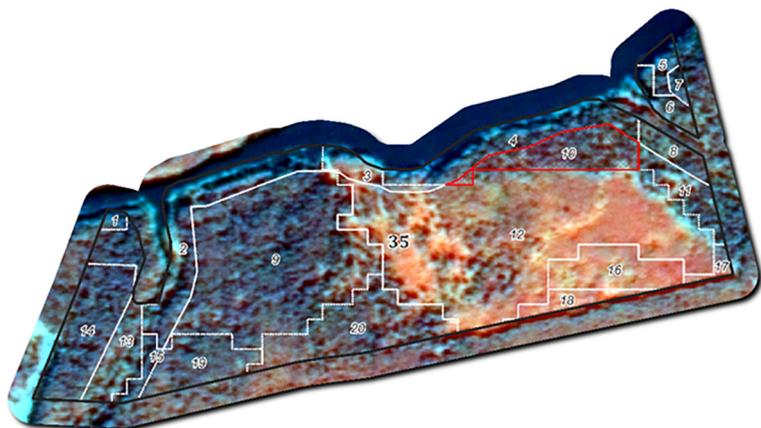
## Результаты и обсуждение

Пример результатов выделения сегментов (условных выделов) с указанием места расположения тестового сегмента и конфигурацией выделов, оконтуренных при проведении лесоустройства, представлен на рис. 1.

Сегменты, выделенные на основе спектрально-яркостных характеристик материалов космической съёмки, не являются прямым аналогом таксационных выделов, оконтуренных при лесоустройстве на основании однородности таксационных характеристик насаждения (см. рис. 1). Вместе с тем необходимо отметить, что средний размер сегментов и уровень

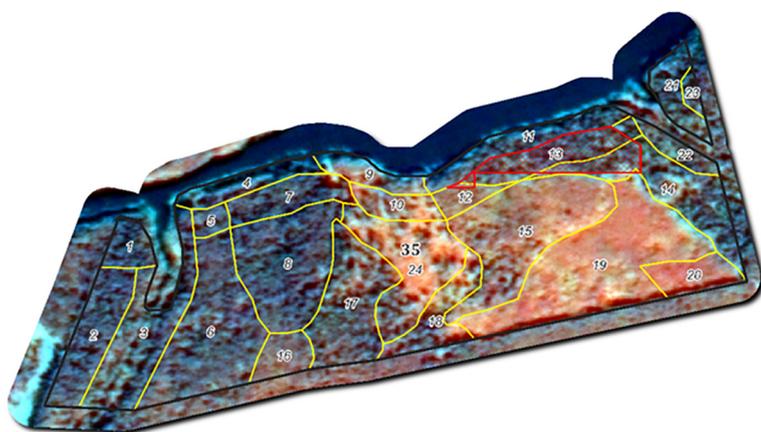
<sup>1</sup> <https://search.earthdata.nasa.gov/search>.

<sup>2</sup> <https://www.orteo-toolbox.org/CookBook/recipes/improc.html#segmentation>.



Тестовый сегмент

А – ПРИМЕР ВЫДЕЛЕНИЯ СЕГМЕНТОВ (УСЛОВНЫХ ВЫДЕЛОВ)



Б – КОНФИГУРАЦИЯ ВЫДЕЛОВ, ОКОНТУРЕННЫХ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛЕСОУСТРОЙСТВА

**Рис. 1.** Конфигурация выделенных сегментов (условных выделов) (А) и выделов, оконтуренных при проведении лесоустройства (Б)

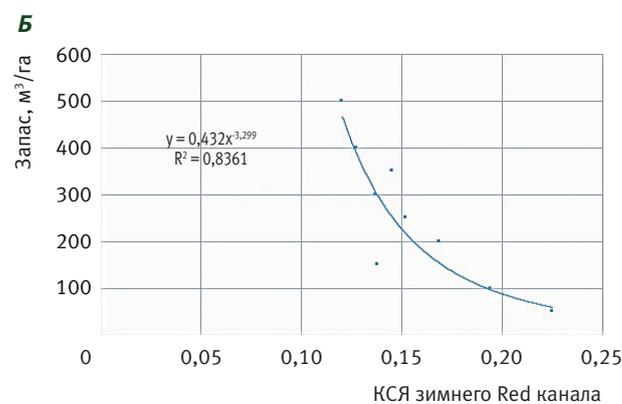
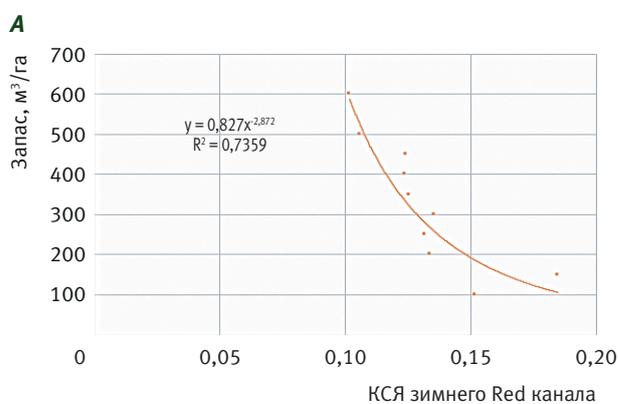
агрегации можно регулировать настройками алгоритма сегментации. Алгоритм сегментации Large-Scale Mean-Shift (LSMS) в качестве входных параметров, регулирующих итоговый размер получаемых сегментов, использует величины «окна» фильтрации (spatial radius), спектральный диапазон фильтра (range radius) и минимальный размер результирующего сегмента (minimum region size).

Для моделирования среднего запаса древесины, возраста и высоты древостоя проанализировали регрессионные зависимости между спектральной яркостью зимнего красного канала спутниковой съёмки и соответствующим таксационным показателем в разрезе преобладающих древесных пород.

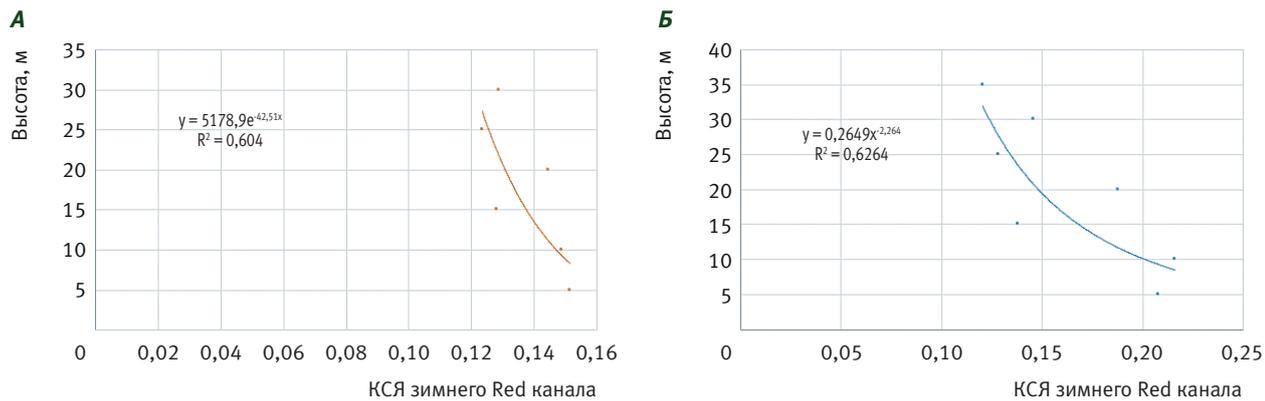
Примеры восстановленных регрессионных уравнений для насаждений наиболее распространённых древесных пород на объекте приведены на рис. 2–4.

Графики взаимосвязей между показателями высоты и диаметра ствола на высоте 1,3 м, запаса древесины и суммы поперечных сечений стволов на 1 га, а также суммы сечений и относительной полноты, восстановленных путём анализа наземных данных с ТДУ, представлены на рис. 5–7.

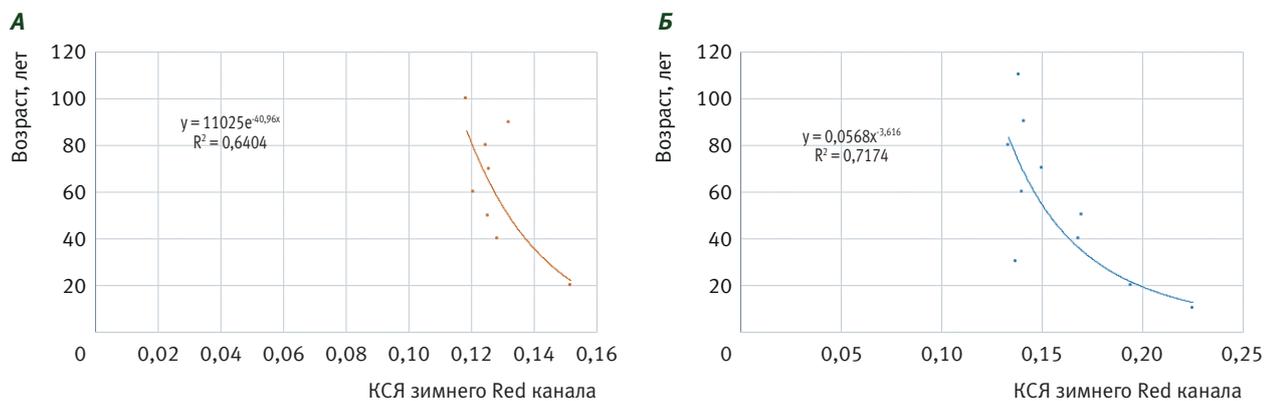
Результаты верификации смоделированных значений среднего запаса насаждений в тестовых сегментах (условных выделах) с данными их таксации приведены в табл. 1.



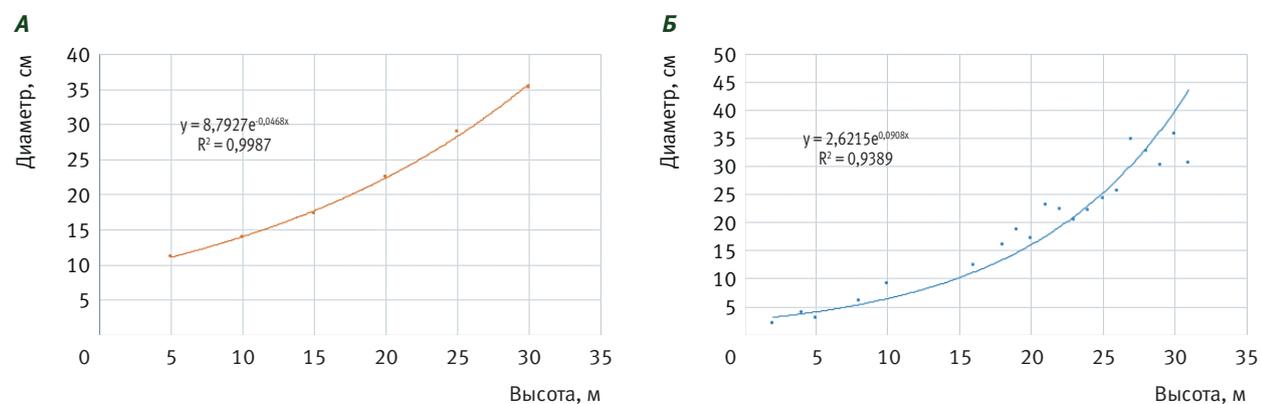
**Рис. 2.** ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ (КСЯ) ЗИМНЕГО КРАСНОГО (Red) КАНАЛА СПУТНИКОВОЙ СЪЁМКИ И ЗАПАСОМ ДРЕВЕСИНЫ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЁННЫХ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД: СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (А), БЕРЁЗЫ БОРОДАВЧАТОЙ (ПОВИСЛОЙ) (Б)



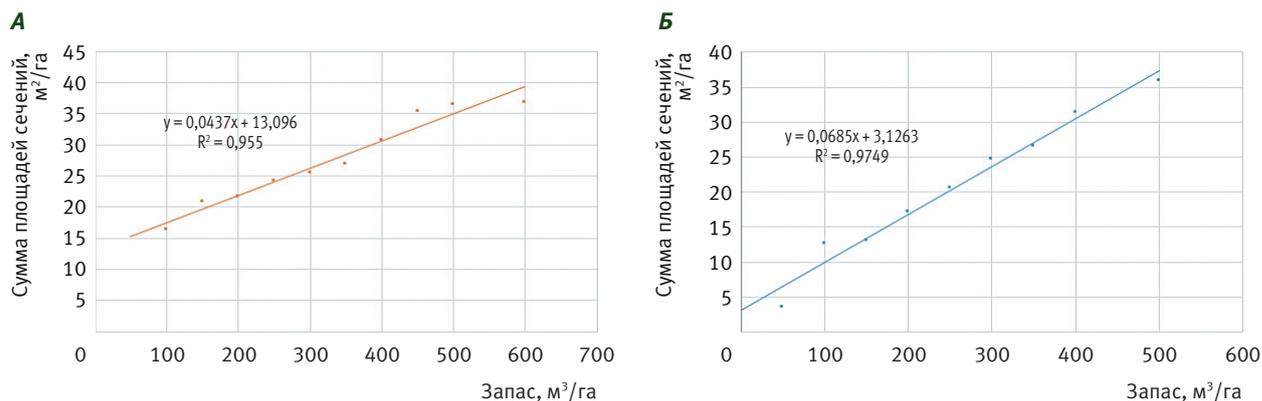
**Рис. 3. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ (КСЯ) зимнего красного (Red) канала спутниковой съёмки и высотой древостоя наиболее распространённых древесных пород: СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (А), БЕРЁЗЫ БОРОДАВЧАТОЙ (повислой) (Б)**



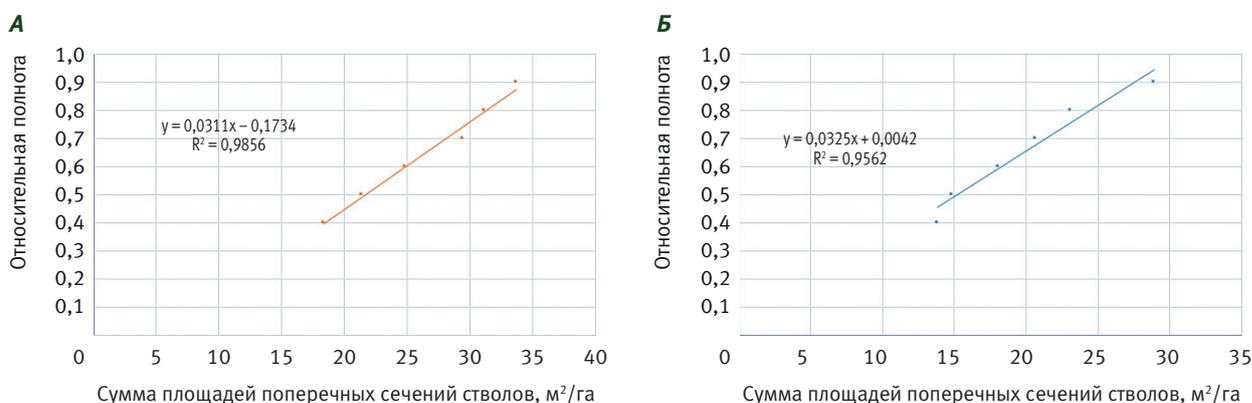
**Рис. 4. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ КОЭФФИЦИЕНТОМ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ (КСЯ) зимнего красного (Red) канала спутниковой съёмки и возрастом насаждений наиболее распространённых древесных пород: СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (А), БЕРЁЗЫ БОРОДАВЧАТОЙ (или повислой) (Б)**



**Рис. 5. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ВЫСОТОЙ И ДИАМЕТРОМ СТВОЛА НА ВЫСОТЕ 1,3 м наиболее распространённых древесных пород: СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (А), БЕРЁЗЫ БОРОДАВЧАТОЙ (повислой) (Б)**



**Рис. 6. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ЗАПАСОМ ДРЕВСИНЫ И СУММОЙ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ СТЕЛОВ НА 1 ГА НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЁННЫХ ДРЕВСНЫХ ПОРОД: СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (А), БЕРЁЗЫ БОРОДАВЧАТОЙ (ПОВИСЛОЙ) (Б)**



**Рис. 7. ПРИМЕР ВОССТАНОВЛЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ СУММОЙ ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЙ СТЕЛОВ НА 1 ГА И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПЛНОТОЙ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЁННЫХ ДРЕВСНЫХ ПОРОД: СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (А), БЕРЁЗЫ БОРОДАВЧАТОЙ (ПОВИСЛОЙ) (Б)**

**Таблица 1. Результаты верификации смоделированных значений запаса насаждений с данными таксации тестовых сегментов (условных выделов)**

№ п/п	Группа возраста	Средний запас (таксация), м³/га	Средний запас (модель), м³/га	Отклонение	
				м³	%
1	Молодняки	40	187	147	367,5
2	Молодняки	55	218	163	296,4
3	Средневозрастные	198	203	5	2,5
4	Средневозрастные	131	240	109	83,2
5	Средневозрастные	198	203	5	2,5
6	Приспевающие	393	255	-138	-35,1
7	Приспевающие	393	255	-138	-35,1
8	Приспевающие	227	289	62	27,3
9	Спелые	310	277	-33	-10,6
10	Спелые	399	280	-119	-29,8
11	Спелые	192	223	31	16,1

ОКОНЧАНИЕ ТАБЛ. 1

№ п/п	Группа возраста	Средний запас (таксация), м <sup>3</sup> /га	Средний запас (модель), м <sup>3</sup> /га	Отклонение	
				м <sup>3</sup>	%
12	Спелые	225	245	20	8,9
13	Спелые	348	283	-65	-18,7
14	Спелые	311	302	-9	-2,9
15	Спелые	496	283	-213	-42,9
16	Спелые	348	283	-65	-18,7
17	Спелые	342	259	-83	-24,3
18	Спелые	330	259	-71	-21,5
19	Спелые	310	277	-33	-10,6
20	Спелые	225	245	20	8,9
21	Спелые	242	320	78	32,2
22	Спелые	399	280	-119	-29,8
23	Перестойные	228	307	79	34,6
24	Перестойные	277	250	-27	-9,7
25	Перестойные	192	223	31	16,1
26	Перестойные	228	307	79	34,6
27	Перестойные	277	250	-27	-9,7
28	Перестойные	260	321	61	23,5
29	Перестойные	357	273	-84	-23,5
30	Перестойные	273	267	-6	-2,2
<b>Среднее</b>		<b>273,5</b>	<b>262,1</b>	<b>-11,4</b>	<b>-4,2</b>

Максимальная ошибка определения среднего запаса древесины (см. табл. 1) наблюдается в мягколиственных молодняках с преобладанием берёзы, что объясняется высокой изменчивостью запаса, а также малым объёмом обучающей выборки (в мягколиственных молодняках заложено только 6 ТДУ). Наименьшие ошибки отмечены в спелых и перестойных насаждениях.

Оценка адекватности модели проводилась путём расчёта двух наиболее часто используемых

величин ошибок – средней абсолютной ошибки (Mean Absolute Error, MAE) и корня из среднеквадратичной ошибки (Root Mean Square Error, RMSE), по которым определялось абсолютное отклонение смоделированных значений запаса насаждений в тестовых сегментах от результатов их глазомерно-измерительной таксации и относительное отклонение, выраженное в процентах. Результаты оценки точности моделирования среднего запаса насаждений приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ СРЕДНЕГО ЗАПАСА НАСАЖДЕНИЙ

Группа возраста	Тип ошибки			
	Средняя абсолютная ошибка (MAE)		Корень из среднеквадратичной ошибки (RMSE)	
	м <sup>3</sup>	%	м <sup>3</sup>	%
Все группы возраста	70,7	25,8	87,9	32,2
Спелые и перестойные	61,5	20,6	76,8	25,7

Относительные ошибки по среднему запасу для насаждений всех групп возраста (MAE и RMSE) составили  $\pm 25,8$  и  $\pm 32,2\%$  соответственно.

Для спелых и перестойных насаждений отклонение среднего смоделированного запаса от результатов натурных обследований (MAE и RMSE) составило в среднем  $\pm 20,6$  и  $\pm 25,7\%$  соответственно.

Результаты сравнения основных таксационных характеристик на тестовых сегментах (условных выделах) представлены в табл. 3.

Точность определения основных количественных показателей (средний запас, высота, диаметр на высоте 1,3 м) выше в простых по составу насаждениях (с количеством пород в составе не более 3-х).

Средняя точность определения преобладающей породы в сегменте (условном выделе) в сравнении с данными их таксации составила 70%, что объясняется недостаточной точностью распознавания лиственных пород (перепутывание осины с березой, дуба с липой). При этом точность определения хвойных пород достигла 100%.

**Таблица 3. Сравнение основных таксационных характеристик на тестовых сегментах (условных выделах)**

№ п/п	Данные	Преобладающая порода*	Средний возраст, лет	Средняя высота, м	Средний диаметр, см	Класс бонитета	Относительная полнота	Средний запас, м <sup>3</sup> /га
1	Таксация	С	70	29	30	Ia	0,7	393
	Моделирование	С	62	2,9	24,7	I	0,5	255
	Отклонение, %		-11,4	-21	-17,7		-28,6	-35,1
2	Таксация	С	88	29	38	Ia	0,6	310
	Моделирование	С	67	24,5	26,8	I	0,7	277
	Отклонение, %		-23,9	-15,5	-29,5		16,7	-10,6
3	Таксация	С	90	28	33	I	0,7	399
	Моделирование	С	64	22,9	24,7	I	0,6	280
	Отклонение, %		-28,9	-18,2	-25,2		-14,3	-29,8
4	Таксация	Е	130	30	43	I	0,4	228
	Моделирование	Е	74	26,2	29,9	I	0,6	307
	Отклонение, %		-43,1	-12,7	-30,5		50	34,6
5	Таксация	Олч	30	16	14	II	0,9	198
	Моделирование	Олч	67	22,5	27,8	II	0,9	203
	Отклонение, %		123,3	40,6	98,6		0	2,5
6	Таксация	Б	75	25	34	II	0,5	192
	Моделирование	Б	71	23,7	36,2	II	0,6	223
	Отклонение, %		-5,3	-5,2	6,5		20	16,1
7	Таксация	Б	85	29	38	I	0,6	277
	Моделирование	Б	68	24,4	24	II	0,7	250
	Отклонение, %		-20	-15,9	-36,8		16,7	-9,7
8	Таксация	Б	80	27	31	I	0,7	225
	Моделирование	Б	71	25,1	25,6	I	0,7	245
	Отклонение, %		-11,3	-7	-17,4		0	8,9
9	Таксация	Лп	80	27	31	I	0,7	348
	Моделирование	Б	71	26,5	29,9	II	0,5	283
	Отклонение, %		-11,3	-1,9	-3,5		-28,6	-18,7

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛ. 3

№ п/п	ДАННЫЕ	ПРЕОБЛАДАЮЩАЯ ПОРОДА*	СРЕДНИЙ ВОЗРАСТ, ЛЕТ	СРЕДНЯЯ ВЫСОТА, М	СРЕДНИЙ ДИАМЕТР, СМ	КЛАСС БОНИТЕТА	ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОЛНОТА	СРЕДНИЙ ЗАПАС, М <sup>3</sup> /ГА
10	Таксация	Б	30	16	13	I	0,9	131
	Моделирование	Б	67	23,9	23	II	0,7	240
	Отклонение, %		<b>123,3</b>	<b>49,4</b>	<b>76,9</b>		<b>-22,2</b>	<b>83,2</b>
11	Таксация	С	104	31	40	I	0,6	311
	Моделирование	С	72	26,1	29,1	Ia	0,7	302
	Отклонение, %		<b>-30,8</b>	<b>-15,8</b>	<b>-27,3</b>		<b>16,7</b>	<b>-2,9</b>
12	Таксация	Лп	78	28	29	I	0,9	496
	Моделирование	Ос	74	27,5	32,7	Ia	0,5	283
	Отклонение, %		<b>-5,1</b>	<b>-1,8</b>	<b>12,8</b>		<b>-44,4</b>	<b>-42,9</b>
13	Таксация	Б	80	27	30	I	0,7	348
	Моделирование	Ос	71	29,9	29,9	Ia	0,7	283
	Отклонение, %		<b>-11,3</b>	<b>10,7</b>	<b>-0,3</b>		<b>0</b>	<b>-18,7</b>
14	Таксация	Олч	80	28	34	I	0,8	342
	Моделирование	Д	83	27	50,9	I	0,6	259
	Отклонение, %		<b>3,8</b>	<b>-3,6</b>	<b>49,7</b>		<b>-25</b>	<b>-24,3</b>
15	Таксация	Ос	78	28	33	I	0,8	330
	Моделирование	Б	71	25,5	26,6	I	0,6	259
	Отклонение, %		<b>-9</b>	<b>-8,9</b>	<b>-19,4</b>		<b>-25</b>	<b>-21,5</b>
16	Таксация	С	88	29	37	I	0,6	310
	Моделирование	С	67	24,5	26,8	I	0,6	277
	Отклонение, %		<b>-23,9</b>	<b>-15,5</b>	<b>-27,6</b>		<b>0</b>	<b>-10,6</b>
17	Таксация	С	70	29	30	Ia	0,7	393
	Моделирование	С	62	22,9	24,7	Ia	0,5	255
	Отклонение, %		<b>-11,4</b>	<b>-21</b>	<b>-17,7</b>		<b>-28,6</b>	<b>-35,1</b>
18	Таксация	Ос	14	7	5	II	0,7	40
	Моделирование	Олч	62	20,8	23,1	II	0,9	187
	Отклонение, %		<b>342,9</b>	<b>197,1</b>	<b>362</b>		<b>28,6</b>	<b>367,5</b>
19	Таксация	С	66	21	15	I	0,6	227
	Моделирование	С	70	25,1	27,6	I	0,7	289
	Отклонение, %		<b>6,1</b>	<b>19,5</b>	<b>84</b>		<b>16,7</b>	<b>27,3</b>
20	Таксация	Б	80	27	31	I	0,7	225
	Моделирование	Б	71	25,1	25,6	I	0,7	245
	Отклонение, %		<b>-11,3</b>	<b>-7</b>	<b>-17,4</b>		<b>0</b>	<b>8,9</b>
21	Таксация	Е	120	32	44	I	0,4	242
	Моделирование	Е	75	26,5	30,7	Ia	0,7	320
	Отклонение, %		<b>-37,5</b>	<b>-17,2</b>	<b>-30,2</b>		<b>75</b>	<b>32,2</b>
22	Таксация	Ос	75	25	33	II	0,5	192
	Моделирование	Б	71	23,7	36,2	II	0,6	223
	Отклонение, %		<b>-5,3</b>	<b>-5,2</b>	<b>9,7</b>		<b>20</b>	<b>16,1</b>
23	Таксация	Е	130	30	43	I	0,4	228
	Моделирование	Е	74	26,2	29,9	I	0,6	307
	Отклонение, %		<b>-43,1</b>	<b>-12,7</b>	<b>-30,5</b>		<b>50</b>	<b>34,6</b>

ОКОНЧАНИЕ ТАБЛ. 3

№ п/п	ДАННЫЕ	ПРЕОБЛАДАЮЩАЯ ПОРОДА*	СРЕДНИЙ ВОЗРАСТ, ЛЕТ	СРЕДНЯЯ ВЫСОТА, М	СРЕДНИЙ ДИАМЕТР, СМ	КЛАСС БОНИТЕТА	ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПОЛНОТА	СРЕДНИЙ ЗАПАС, М <sup>3</sup> /ГА
24	Таксация	Ос	85	29	36	I	0,6	277
	Моделирование	Б	68	24,4	24	I	0,6	250
	Отклонение, %		<b>-20</b>	<b>-15,9</b>	<b>-33,3</b>		<b>0</b>	<b>-9,7</b>
25	Таксация	Б	100	30	40	I	0,5	260
	Моделирование	Е	75	26,8	31,6	Ia	0,6	321
	Отклонение, %		<b>-25</b>	<b>-10,7</b>	<b>-21</b>		<b>20</b>	<b>23,5</b>
26	Таксация	Б	17	8	8	II	0,8	55
	Моделирование	Б	71	23,2	34,4	II	0,9	218
	Отклонение, %		<b>317,6</b>	<b>190</b>	<b>330</b>		<b>12,5</b>	<b>296,4</b>
27	Таксация	С	90	28	32	I	0,7	399
	Моделирование	С	64	22,9	24,7	I	0,6	280
	Отклонение, %		<b>-28,9</b>	<b>-18,2</b>	<b>-22,8</b>		<b>-14,3</b>	<b>-29,8</b>
28	Таксация	Ос	76	29	29	Ia	0,7	357
	Моделирование	Ос	74	26,8	30,7	Ia	0,6	273
	Отклонение, %		<b>-2,6</b>	<b>-7,6</b>	<b>5,9</b>		<b>-14,3</b>	<b>-23,5</b>
29	Таксация	Б	100	31	45	Ia	0,6	273
	Моделирование	Б	73	26,1	28	Ia	0,6	267
	Отклонение, %		<b>-27</b>	<b>-15,8</b>	<b>-37,8</b>		<b>0</b>	<b>-2,2</b>
30	Таксация	Олч	30	16	13	I	0,9	198
	Моделирование	Олч	67	22	27,8	I	0,9	203
	Отклонение, %		<b>123,3</b>	<b>37,5</b>	<b>113,8</b>		<b>0</b>	<b>2,5</b>

\* С – сосна обыкновенная, Е – ель европейская, Лп – липа мелколистная, Д – дуб черешчатый, Олч – ольха чёрная, Б – берёза повислая (бородавчатая), О – осина, или тополь дрожащий

Таким образом, результаты показывают приемлемую точность определения преобладающей в сегменте (условном выделе) породы (особенно для хвойных). В то же время отклонения по запасу позволяют использовать описываемую технологию только в простых по составу древостоях с большой долей спелых и перестойных насаждений в структуре объекта работ, что характерно для резервных лесов (зоны экстенсивного ведения лесного хозяйства), обеспечивая погрешность его определения в пределах  $\pm 30\%$ .

## Выводы

По результатам анализа полученных в рамках эксперимента данных можно отметить следующее:

- ✓ методология пространственного моделирования основных таксационных характеристик лесов на основе материалов космической съёмки и исходных данных ТДУ, заложенных при государственной инвентаризации лесов, позволяет определять основные таксационные характеристики насаждения (прежде всего преобладающую породу и средний запас древесины на 1 га) с точностью, сопоставимой с точностью метода автоматизированной обработки и анализа материалов ДЗЗ (согласно п. 215 действующей Лесо-строительной инструкции) [10];
- ✓ сегменты, выделенные на основании спектрально-яркостных характеристик космической съёмки, не являются прямым аналогом таксационных выделов,

оконтуренных при проведении лесоустройства исходя из однородности таксационных характеристик насаждения, однако возможность регулирования размера результирующих сегментов позволяет приблизить их к границам, получаемым в результате ручного контурного дешифрирования, особенно для резервных лесов (зоны экстенсивного ведения лесного хозяйства);

- ✓ точность определения таксационных показателей снижается с возрастанием разнообразия лесорастительных условий на объекте работ и увеличением количества пород в составе насаждений,

а также доли молодняков и средневозрастных насаждений, имеющих высокие коэффициенты вариации количественных характеристик по сравнению со спелыми и перестойными древостоями.

Применение апробированной в рамках эксперимента технологии моделирования основных таксационных характеристик насаждений по данным ДЗЗ можно использовать на территориях с простыми по составу насаждениями, значительной долей спелых и перестойных древостоев в структуре объекта работ. Она перспективна и может быть рекомендована для зоны экстенсивного ведения лесного хозяйства.

## Список источников

1. Бореальные леса России: возможности для смягчения изменения климата. – Текст : электронный / А.Н. Филипчук, Н.В. Малышева, Т.А. Золина, А.Н. Югов // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 1. – С. 92–113. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10. – Режим доступа: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.
2. Анализ результатов первого цикла государственной инвентаризации лесов и предложения по совершенствованию методики ее проведения во втором цикле. – Текст : электронный / А.М. Бердов, С.В. Федоров, А.А. Приставко, В.Н. Манович, Е.Г. Малахова // Лесохозяйственная информация. – 2020. – № 3. – С. 67–80. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06. – Режим доступа: URL: <http://lhi.vniilm.ru>
3. Зонирование таежной зоны европейской части России по режимам ведения лесного хозяйства в зависимости от доступности лесов. – Текст : электронный / В.М. Сидоренков, А.А. Мартынюк, Е.М. Сидоренкова, Д.О. Астапов, Т.В. Липкина, Ю.С. Ачиколова // Лесохозяйственная информация. – 2022. – № 3.– С. 58–72. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.05 – Режим доступа: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.
4. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов. – Москва : ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
5. Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО. – Текст : электронный / Е.Н. Социлова, Н.В. Сурков, Д.В. Ершов, В.А. Хамедов // Вопросы лесной науки. – 2018. – Т. 1 (1). – С. 1–22. DOI:10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-23.
6. Возможности использования спутниковой съемки с космического аппарата Метеор-М для определения количественных и качественных характеристик лесов. – Текст : электронный / В.М. Сидоренков, Д.О. Астапов, Е.С. Рыбкин, Ю.С. Ачиколова, О.В. Рябцев // Лесохозяйственная информация. – 2022. – № 2. – С. 5–12. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.01. – Режим доступа: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.
7. Бурцев, М.А. Оценка возможности использования данных спутников Канопус-В №№ 3, 4 для оценки изменений в лесном покрове / М.А. Бурцев, Е.А. Лупян, Л.С. Крамарева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : сб. тез. докл. 16-й Всероссийской открытой конференции (12–16 ноября 2018). – Москва : ИКИ РАН, 2018. – С. 392.
8. Вечеров, В.В. Применение автоматизированного дешифрирования данных Sentinel-2 для создания актуализированных карт-схем страт ГИЛ на территории труднодоступных районов Российской Федерации. – Текст : электронный / В.В. Вечеров // Лесохозяйственная информация. – 2019. – № 2. – С. 5–14. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2019.2.01. – Режим доступа: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.
9. Об утверждении Регламента организации и проведения мероприятий по государственной инвентаризации лесов центральным аппаратом Рослесхоза, территориальными органами Рослесхоза и подведомственными Рослесхозу организациями. Приказ Рослесхоза от 06.05.2022 № 556 (ред. от 20.09.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025).
10. Об утверждении Лесоустроительной инструкции. Приказ Минприроды России от 05.08.2022 № 510.

## References

1. Boreal'nye lesa Rossii: vozmozhnosti dlya smygcheniya izmeneniya klimata. – Tekst : elektronnyj / A.N. Filipchuk, N.V. Malysheva, T.A. Zolina, A.N. Yugov // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2020. – № 1. – S. 92–113. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.1.10. – Rezhim dostupa: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.
2. Analiz rezul'tatov pervogo cikla gosudarstvennoj inventarizacii lesov i predlozheniya po sovershenstvovaniyu metodiki ee provedeniya vo vtorom cikle. – Tekst : elektronnyj / A.M. Berdov, S.V. Fedorov, A.A. Pristavko,

V.N. Manovich, E.G. Malahova // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2020. – № 3. – S. 67–80. – DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2020.3.06. – Rezhim dostupa: URL: <http://lhi.vniilm.ru>

3. Zonirovanie taezhnoj zony evropejskoj chasti Rossii po rezhimam vedeniya lesnogo hozyajstva v zavisimosti ot dostupnosti lesov. – Tekst : elektronnyj / V.M. Sidorenkov, A.A. Martynyuk, E.M. Sidorenkova, D.O. Astapov, T.V. Lipkina, Yu.S. Achikolova // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2022. – № 3. – S. 58–72. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2022.3.05 – Rezhim dostupa: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.

4. Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii / S.A. Bartalev, V.A. Egorov, V.O. Zharko, E.A. Lupyan, D.E. Plotnikov, S.A. Hvostikov, N.V. Shabanov. – Moskva : IKI RAN, 2016. – 208 s.

5. Ocenka zapasov fitomassy lesnyh porod po sputnikovym izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya (na primere lesov Hanty-Mansijskogo AO. – Tekst : elektronnyj / E.N. Sochilova, N.V. Surkov, D.V. Ershov, V.A. Hamedov // Voprosy lesnoj nauki. – 2018. – T. 1 (1). – S. 1–22. DOI:10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-23.

6. Vozmozhnosti ispol'zovaniya sputnikovoj s"emki s kosmicheskogo apparata Meteor-M dlya opredeleniya kolichestvennyh i kachestvennyh harakteristik lesov. – Tekst : elektronnyj / V.M. Sidorenkov, D.O. Astapov, E.S. Rybkin, Yu.S. Achikolova, O.V. Ryabcev // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2022. – № 2. – S. 5–12. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2022.2.01. – Rezhim dostupa: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.

7. Burcev, M.A. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya dannyh sputnikov Kanopus-V №№ 3, 4 dlya ocenki izmenenij v lesnom pokrove / M.A. Burcev, E.A. Lupyan, L.S. Kramareva // Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa : sb. tez. dokl. 16-j Vserossijskoj otkrytoj konferencii (12–16 noyabrya 2018). – Moskva : IKI RAN, 2018. – S. 392.

8. Veчерov, V.V. Primenenie avtomatizirovannogo deshifirovaniya dannyh Sentinel-2 dlya sozdaniya aktualizirovannyh kart-skhem strat GIL na territorii trudnodostupnyh rajonov Rossijskoj Federacii. – Tekst : elektronnyj / V.V. Veчерov // Lesohozyajstvennaya informaciya. – 2019. – № 2. – S. 5–14. DOI: 10.24419/LHI.2304–3083.2019.2.01. – Rezhim dostupa: URL: <http://lhi.vniilm.ru>.

9. Ob utverzhdenii Reglamenta organizacii i provedeniya meropriyatij po gosudarstvennoj inventarizacii lesov central'nym apparatom Rosleskhoza, territorial'nymi organami Rosleskhoza i podvedomstvennymi Rosleskhozu organizacijami. Prikaz Rosleskhoza ot 06.05.2022 № 556 (red. ot 20.09.2024) (s izm. i dop., vstup. v silu s 01.01.2025).

10. Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noj instrukcii. Prikaz Minprirody Rossii ot 05.08.2022 № 510.