



**ХІХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА**

СЕКЦИЯ «ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ И ПОЧВЕННЫХ ПОКРОВОВ»

**ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОМЕТРИЧЕСКИХ И
СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСОВ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ
НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ И ВЫБОРОЧНЫХ
ЛЕСОТАКСАЦИОННЫХ ДАННЫХ**

*Е.А. Гаврилюк, Н.В. Королева, Д.А. Карпухина, Е.Н. Соколова, Д.В. Ершов
ЦЭПЛ РАН, г. Москва*

Москва, ИКИ РАН, 16 ноября 2021 года

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Геопространственная информация о породно-возрастной структуре и основных биометрических показателях древостоев является необходимым элементом исходных данных как для задач оценки ресурсного потенциала, биоразнообразия и экосистемных функций лесов, так и для прогнозного моделирования их естественного или управляемого развития.

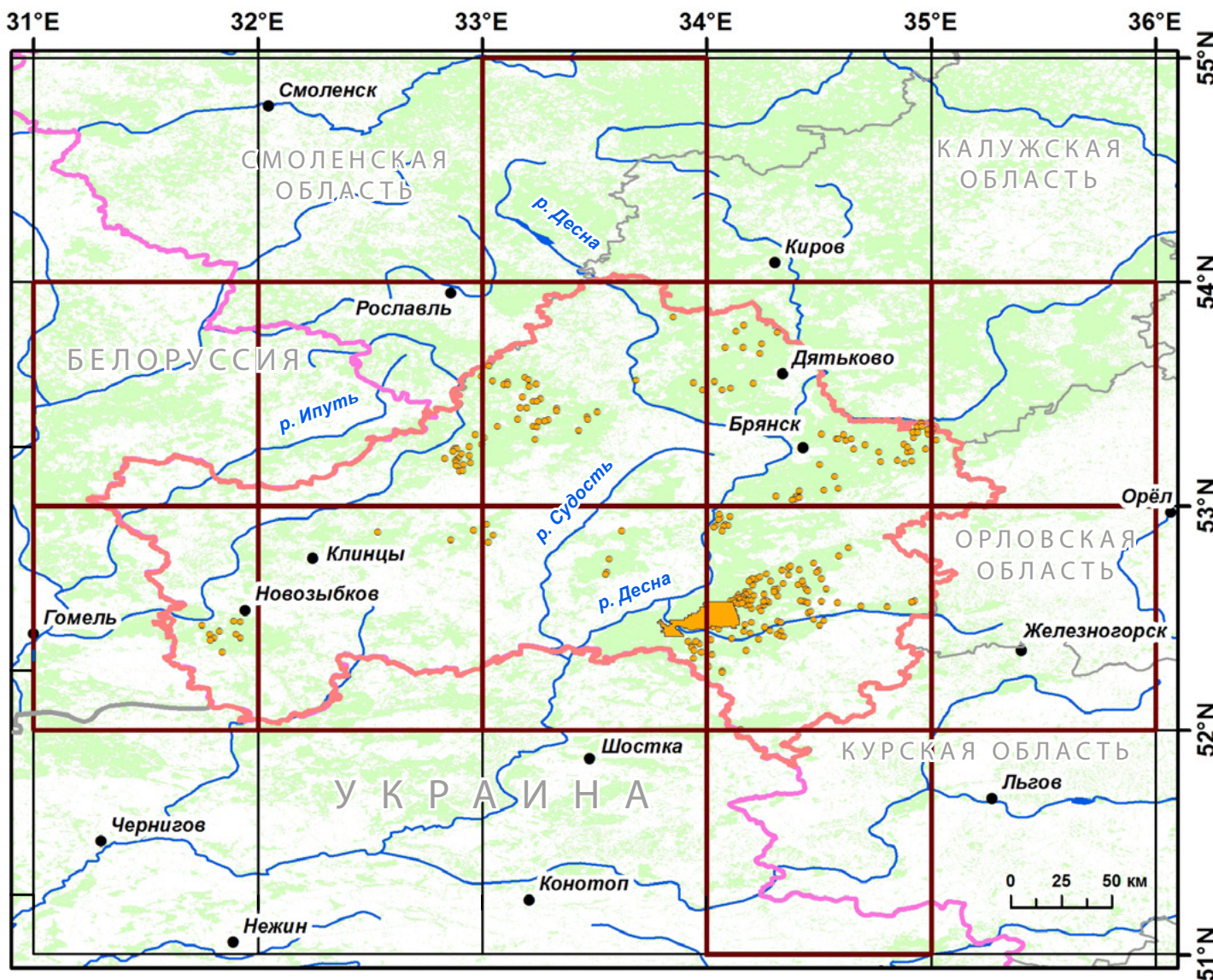
Использование выборочных лесоустроительных данных в сочетании со спутниковыми изображениями – довольно распространенная практика в локальных исследованиях на территории России при оценке породной и возрастной структуры, а также отдельных биометрических и производных от них показателей древостоев.

Однако нам не известны работы, в которых бы применялась универсальная методика геопространственного моделирования для единовременной оценки нескольких структурных и биометрических характеристик древостоев в региональном масштабе на основе разносезонных данных ДЗЗ высокого пространственного разрешения и материалов лесоустройства в формате повывделенной таксации.

Целью настоящего исследования являлась оценка возможностей такого моделирования для показателей среднего возраста, высоты, диаметра ствола и запаса древесины на корню, а также соотношения по запасу хвойных и лиственных пород в насаждениях на примере лесов Брянской области.

ТЕРРИТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Брянская область



- Лесной покров (GFC)
- Заповедник «Брянский лес»
- Оцифрованные кварталы

Лесистость – 33%

Хвойных – 48%

Породный состав:

- Сосна – 38%
- Береза – 29%
- Ель – 10%
- Осина – 9%
- Ольха черная – 7%
- Дуб – 6%

Возрастная структура:

- Молодняков – 20%
- Средневозрастных – 49%
- Приспевающих – 18%
- Спелых и перестойных – 13%

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ – ТАКСАЦИЯ

Исходный набор данных – таксационные описания для территории государственного природного биосферного заповедника «Брянский лес» и 87 участковых лесничеств области, полученные в результате лесоустроительных работ **2002-2005** гг. Эти материалы охватывают **199565 выделов в 8685 кварталах** в пределах лесного фонда **на площади 693429 га (60% от всех лесов области)**.

Из общего объема лесоустроительной информации в работе использовались данные о **450 кварталах**, содержащих около **10000 выделов** с общей площадью **35 тыс. га**. Примерно половина из этих кварталов приходится на территорию заповедника «Брянский лес» (включая его охранную зону), для которой электронные лесоустроительные материалы были предоставлены администрацией. Остальные кварталы, нерегулярно распределенные по территории Брянской области, были оцифрованы и «привязаны» вручную по лесоустроительным планам.

Кварталы для оцифровки подбирались таким образом, чтобы максимально полно охватить вариабельность моделируемых характеристик на уровне выделов. Для этого все выделы площадью более 1 га за пределами заповедника «Брянский лес» были стратифицированы на **комплексные тематические группы** с уникальными сочетаниями дискретных значений четырех показателей: **класса возраста** (10 классов от 1 до 10), **бонитета** (5 классов с I по V), **относительной полноты** (4 класса от 0.3 до 1.0 через 0.2 единицы) и **доли хвойных пород в формуле породного состава** (6 классов от 0 до 10 через 2 единицы). Для каждой тематической группы выбиралось по одному кварталу с максимальным числом остальных тематических групп в нем.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ – LANDSAT

Использовались все доступные на территорию исследования сцены **Landsat 7** (сенсор **ETM+**) за период **1999-2003 гг.** из первого раздела первой коллекции (**Collection 1 Tier 1**), прошедшие стандартные процедуры предварительной обработки и преобразованные в значения спектральной яркости на уровне подстилающей поверхности (**Surface Reflectance**).

Из сцен **Landsat** формировались разносезонные композитные изображения для **6 фенологических периодов**. Границы периодов подбирались индивидуально для каждой градусной ячейки по данным **MODIS** о динамике наземного покрова (**MCD12Q2**) версии 6.

Период	Начало периода, номер дня в году			Окончание периода, номер дня в году			Продолжительность периода, дней			Число безоблачных из- мерений на пиксель		
	min	median	max	min	median	max	min	median	max	min	median	max
Зима	45	45	45	94	99	101	49	54	56	2	5	9
Весна 1	95	99	102	126	129	131	29	30	33	3	8	11
Весна 2	127	129	132	156	157	159	27	29	30	1	4	8
Лето	157	157	160	199	208	211	43	51	54	4	8	11
Осень 1	200	208	212	237	262	268	38	52	58	6	11	15
Осень 2	238	262	269	296	301	309	38	41	59	2	7	10

ПРИЗНАКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Использовались исходные значения спектральной яркости в **зеленом** (2-й канал по порядку, рабочий диапазон длин волн 519–601 нм), **красном** (3, 631–692 нм), **ближнем инфракрасном** (4, 772–898 нм), **первом** (5, 1547–1748 нм) и **втором** (7, 2065–2346 нм) **коротковолновом инфракрасном** каналах полученных композитов, а также их попарные нормализованные отношения. Нормализованные отношения каналов являются обобщенными функциональными аналогами широко распространенных вегетационных индексов, таких как NDVI или SWVI, и рассчитываются по формуле:

$$\text{NRI}_{i+n,i} = \frac{B_{i+n}}{B_i + B_{i+n}}$$

где $\text{NRI}_{i+n,i}$ – значение нормализованного отношения канала с порядковым номером $i+n$ к каналу с порядковым номером i ;

B_i – значение пикселя в канале изображения с порядковым номером i ;

B_{i+n} – значение пикселя в канале изображения с порядковым номером $i+n$;

i – целое число в пределах от 1 до $N-1$;

n – целое число в пределах от 1 до $N-i$;

N – общее число каналов в изображении.

При использовании пяти спектральных каналов можно получить 10 таких отношений. Всего на основе шести разносезонных композитов было получено **90 геопространственных переменных** (30 исходных каналов и 60 нормализованных отношений) + координаты пикселей (**широта и долгота**).

ОБУЧАЮЩАЯ ВЫБОРКА

Отбор оцифрованных выделов в эталонную выборку проводился по критериям:

- **Площадь** не менее 1 га;
- Наличие только **одного древесного яруса**;
- **Возраст** главной породы от 10 лет;
- **Высота** главной породы от 5 м;
- **Диаметр ствола** главной породы от 4 см;
- **Коэффициент вариации** спектральных признаков внутри выдела не более 30%.

В итоговую эталонную выборку вошло **6137 выделов**, которые затем были разбиты на обучающую и контрольную подвыборки в соотношении **3:1**. Для разбиения применялся метод стратифицированного случайного отбора, с использованием в качестве страт описанных выше комплексных тематических групп.

МЕТОДЫ

- **Извлечение признаков для обучения**

Рассчитывалось среднее невзвешенное значение в пределах выдела.

- **Оптимизация состава обучающих признаков**

На основе попарного корреляционного анализа.

- **Обучение и оценка регрессионных моделей**

Random Forest и сопутствующие методы для оценок информативности признаков и производительности моделей.

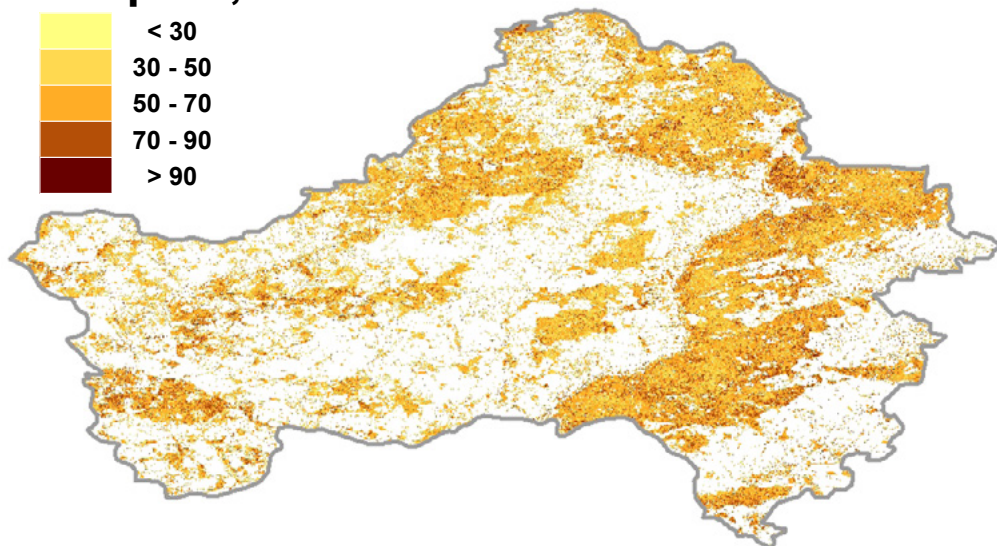
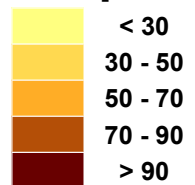
- **Классификация разносезонных композитов**

Последовательно для каждой из 12 градусных ячеек одной обученной моделью.

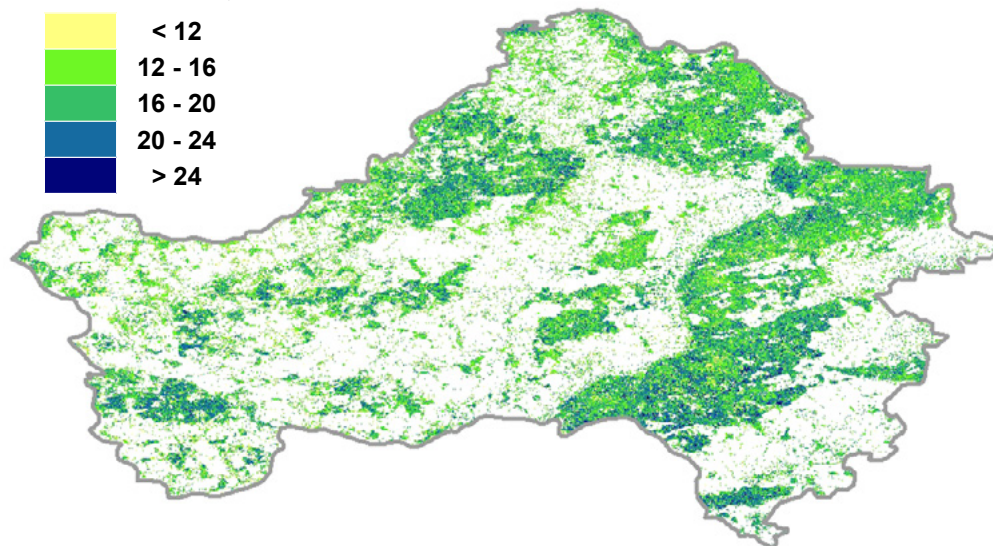
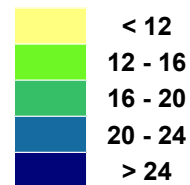
Формирование и классификация композитов, а также извлечение признаков для обучения моделей – в **Google Earth Engine**, подгонка и анализ моделей – локально.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

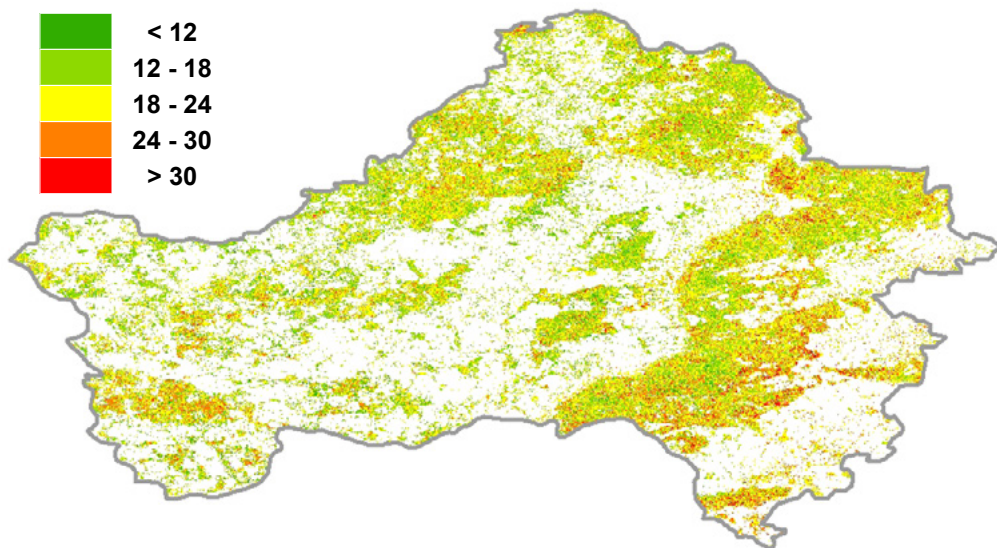
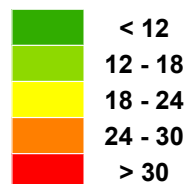
Возраст, лет



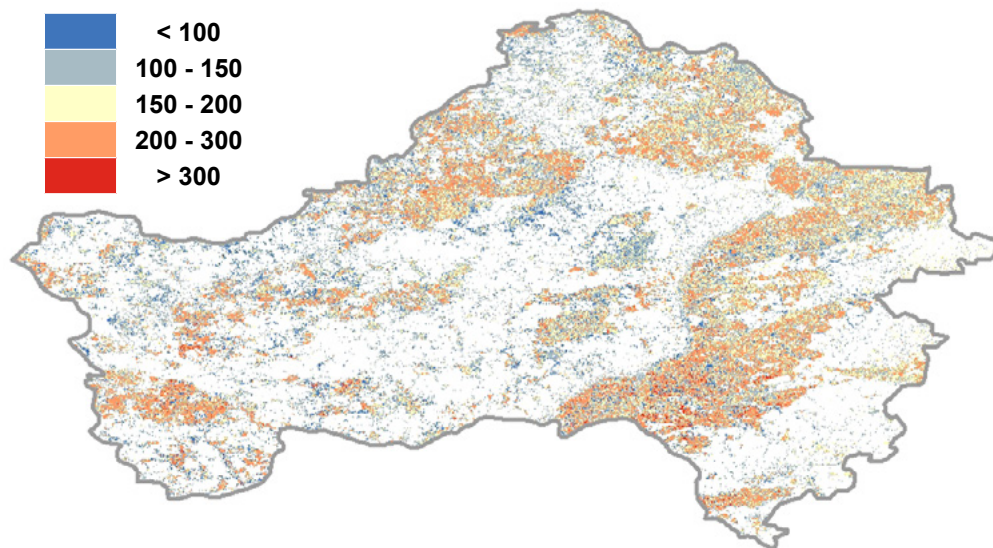
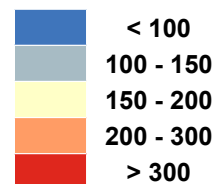
Высота, м



Диаметр ствола, см

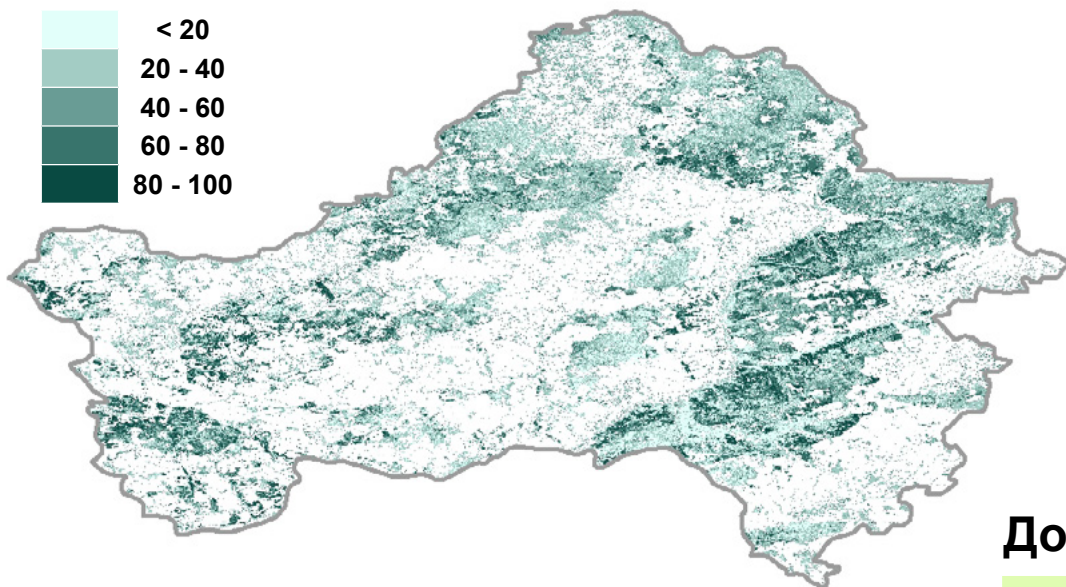
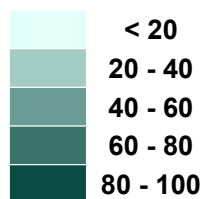


Запас, м³/га

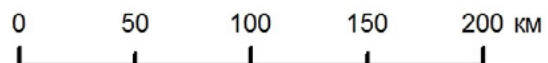
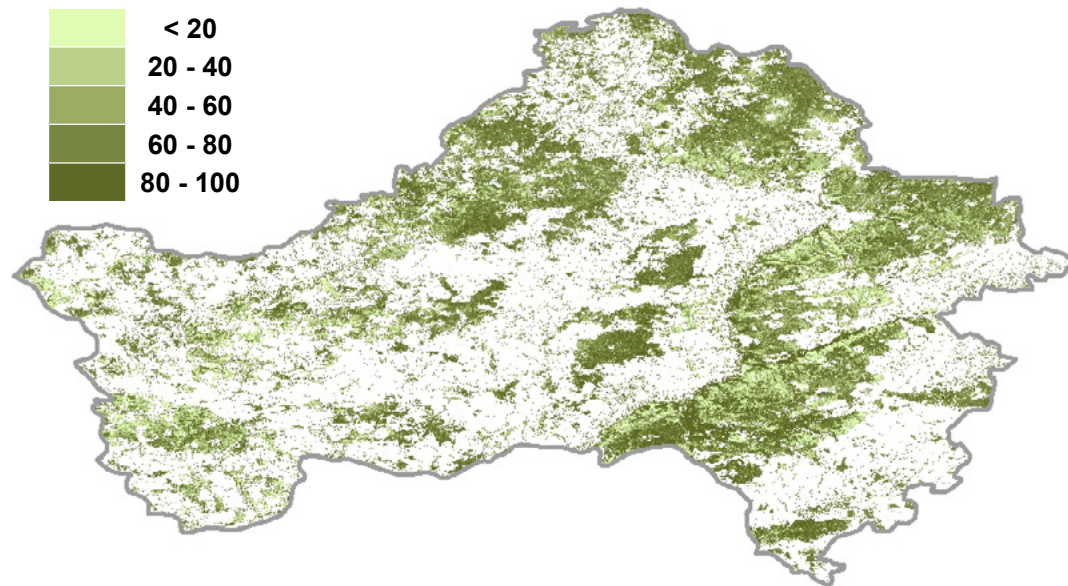
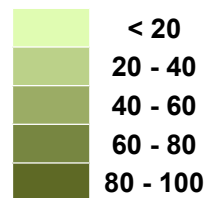


РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Доля хвойных, %



Доля лиственных, %

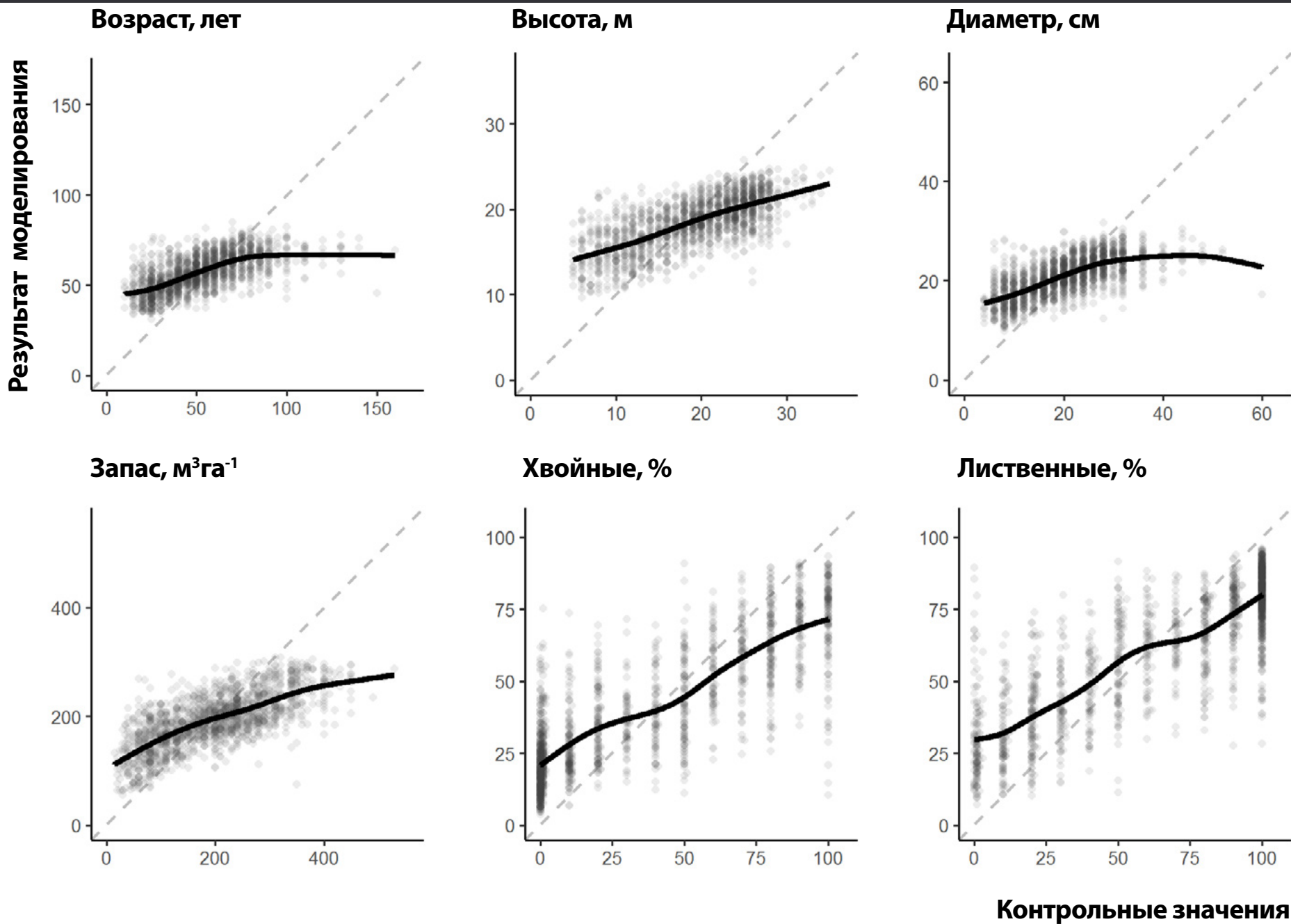


ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ

Метрика	Возраст, лет		Высота, м		Диаметр, см		Запас, м ³ /га		Доля хвойных, %		Доля листв., %	
	OOB	Тест	OOB	Тест	OOB	Тест	OOB	Тест	OOB	Тест	OOB	Тест
R²	0.39	0.39	0.53	0.48	0.46	0.43	0.55	0.50	0.66	0.68	0.66	0.69
MAE	14.0	15.0	3.6	4.0	4.8	5.2	52.2	58.2	15.4	18.5	15.3	18.2
MAE_{RNG}' %	8.7	10.0	11.8	13.3	8.0	9.3	10.6	11.3	15.4	18.5	15.3	18.2
MAE_{AVG}' %	26.2	28.8	18.9	21.0	24.1	26.0	27.7	29.7	42.5	52.3	23.8	28.0
RMSE	19.9	19.1	4.5	4.9	6.6	6.7	66.2	72.7	21.0	22.2	20.9	22.0
RMSE_{RNG}' %	12.4	12.7	15.1	16.3	11.0	12.0	13.5	14.1	21.0	22.2	20.9	22.0
RMSE_{AVG}' %	37.2	36.6	24.2	25.7	33.0	33.7	35.1	37.1	58.0	62.8	32.5	33.7

OOB – эффективность моделей при обучении, Тест – результат валидации тематических продуктов по контрольной выборке; R² – коэффициент детерминации модели (при валидации – квадрат корреляции контрольных и предсказанных значений); MAE – средняя абсолютная ошибка; RMSE – квадратный корень из средней квадратической ошибки; MAE_{RNG} и RMSE_{RNG} – относительные значения соответствующих ошибок, полученные посредством нормирования на величину разброса значений в выборке; MAE_{AVG} и RMSE_{AVG} – относительные значения соответствующих ошибок, полученные посредством нормирования на величину среднего значения по выборке.

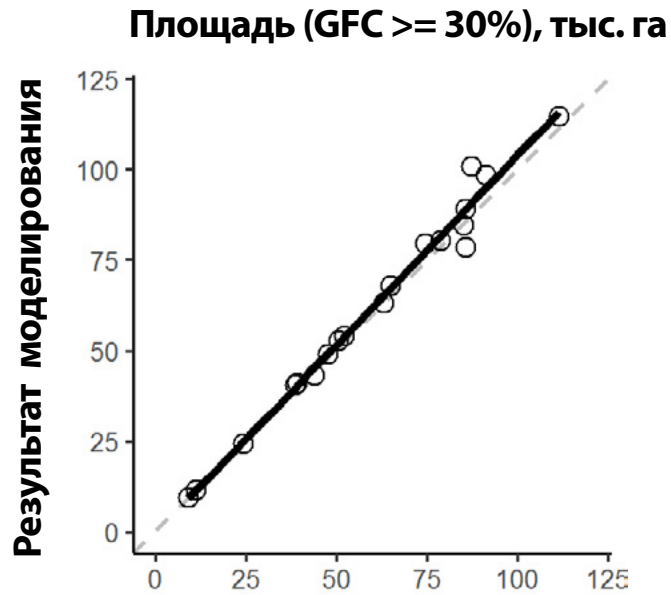
ДИАГРАММЫ РАССЕЯНИЯ ЗНАЧЕНИЙ



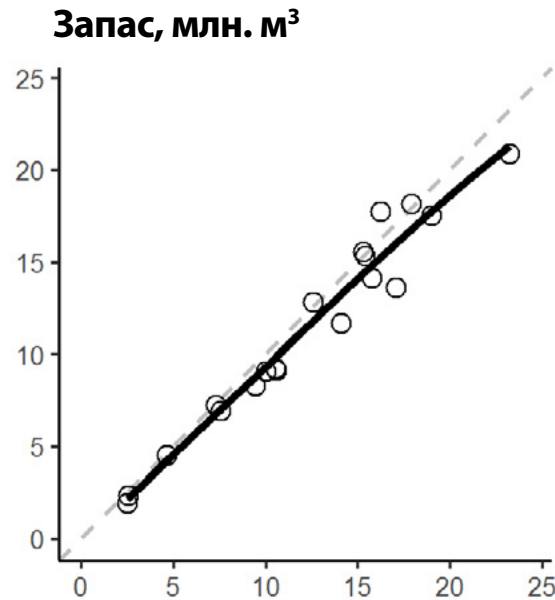
ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ

Метрика	Возраст, лет		Высота, м		Диаметр, см		Запас, м ³ /га	
	20-80	10-160	5-30	5-35	10-30	4-60	50-400	15-500
R²	0.40	0.39	0.47	0.48	0.38	0.43	0.46	0.50
MAE	13.4	15.0	3.9	4.0	3.8	5.2	54.7	58.2
MAE_{RNG'} %	16.7	10.0	15.8	13.3	19.1	9.3	15.6	11.3
MAE_{AVG'} %	25.8	28.8	20.8	21.0	19.2	26.0	27.6	29.7
RMSE	16.4	19.1	4.8	4.9	4.7	6.7	67.8	72.7
RMSE_{RNG'} %	20.5	12.7	19.2	16.3	23.7	12.0	19.4	14.1
RMSE_{AVG'} %	31.7	36.6	25.4	25.7	23.9	33.7	34.3	37.1

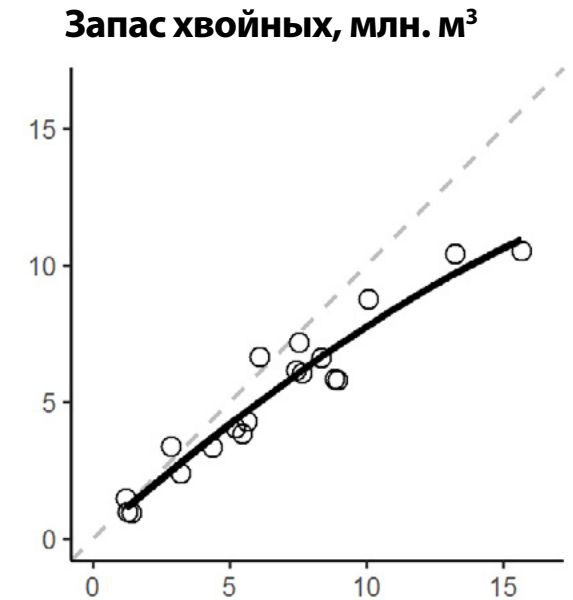
СХОДИМОСТЬ С ЛЕСНЫМ ПЛАНОМ



$r^2 = 0.98$, MD = 5%



$r^2 = 0.96$, MD = 8.6%



Данные Лесного плана 2008 г.

$r^2 = 0.92$, MD = 22.9%

ИНФОРМАТИВНОСТЬ ПЕРЕМЕННЫХ (ТОП-10)

Признак (# канала)	Сезон	MDA / max(MDA), %					
		Возраст	Высота	Диаметр	Запас	Доля ХВОЙНЫХ	Доля ЛИСТВЕННЫХ
К7	Осень 1	100	100	100	100	9.8	9.6
К4	Лето	30.4	45.0	29.5	23.3	100	100
К4	Весна 1	92.1	78.2	77.9	18.5	3.6	3.2
К3	Весна 2	13.3	82.7	27.7	17.8	2.3	2.4
К7/К5	Зима	29.2	39.6	27.0	14.5	73.1	72.0
К7	Осень 2	21.4	7.1	13.1	5.6	63.8	68.5
К3	Осень 1	16.8	62.2	45.4	35.6	2.8	2.9
К3/К2	Зима	57.3	18.0	38.8	21.6	15.1	14.9
К5/К4	Лето	49.8	41.9	50.1	17.5	3.8	4.0
К3/К2	Весна 2	17.2	43.3	22.0	21.0	4.7	5.1

MDA (Mean Decrease in Accuracy) – среднее уменьшение точности модели при пермутации переменной

ВЫВОДЫ

- Полученные показатели точности в полной мере согласуются с результатами похожих зарубежных и российских работ.
- Описанные принципы формирования набора исходных переменных и методика моделирования в достаточной степени универсальны и могут без значительных модификаций быть использованы при работе со спутниковыми данными сходного с Landsat типа (прежде всего, это Sentinel-2) и материалами наземных обследований в виде пробных площадей, а не выделов.
- На основе этих же данных и принципов может проводиться геопространственное моделирование широкого круга характеристик лесных экосистем, включая типологию и индикаторы биоразнообразия.
- Реализация автоматизированных этапов методики на платформе GEE потенциально позволяет получать тематические продукты для территорий неограниченного пространственного охвата (вплоть до глобального) при условии наличия достаточно представительной опорной выборки.

ВЫВОДЫ

- Оптические данные ДЗЗ имеют естественные ограничения, которые не позволяют моделировать параметры, имеющие отношение к стволам древостоев, с высокой точностью.
- Тем не менее, несмотря на умеренную локальную точность, при агрегации результатов моделирования даже на уровне территориальных единиц относительно небольшой площади (в нашем случае средняя площадь лесничеств была около 2 тыс. км²) наблюдается вполне приемлемая сходимость с официальными данными, что означает возможности получения достаточно достоверных оценок, как минимум, в масштабе регионов.

Подробно результаты исследования изложены в статье:

Гаврилюк Е.А., Королева Н.В., Карпухина Д.А., Сочилова Е.Н., Ершов Д.В. Геопро-
странственное моделирование биометрических и структурных характеристик
лесов брянской области на основе спутниковых и выборочных лесотаксацион-
ных данных // **Лесоведение. 2021. №6. С. 609-626.**



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Е.А. Гаврилюк¹, Н.В. Королева, Д.А. Карпущина, Е.Н. Сочилова, Д.В. Ершов

ЦЭПЛ РАН, г. Москва

¹e-mail: egor@ifi.rssi.ru

Исследование выполнено в рамках ГЗ ЦЭПЛ РАН «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем» (№ АААА-А18-118052590019-7) при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-77-30015).