



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

*СЕКЦИЯ «МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ И ПОЧВЕННЫХ ПОКРОВОВ»*

# **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ LANDSAT И SENTINEL-2 ДЛЯ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ НА ЛОКАЛЬНОМ И РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЯХ**

***Е.А. Гаврилюк***  
***ЦЭПЛ РАН, г. Москва***

**Москва, ИКИ РАН, 15 ноября 2022 года**

# ВВЕДЕНИЕ

В докладе систематизированы результаты ряда исследований, проводившихся в **ЦЭПЛ РАН** в последние годы.

Все они имели целью анализ возможностей **геопространственного моделирования** различных структурных и функциональных характеристик отдельных элементов лесных экосистем, в частности, **древостоев и органогенных горизонтов почв**.

При этом, в качестве основных данных для формирования набора независимых переменных-предикторов использовались разносезонные спутниковые данные **Landsat** и **Sentinel-2**.

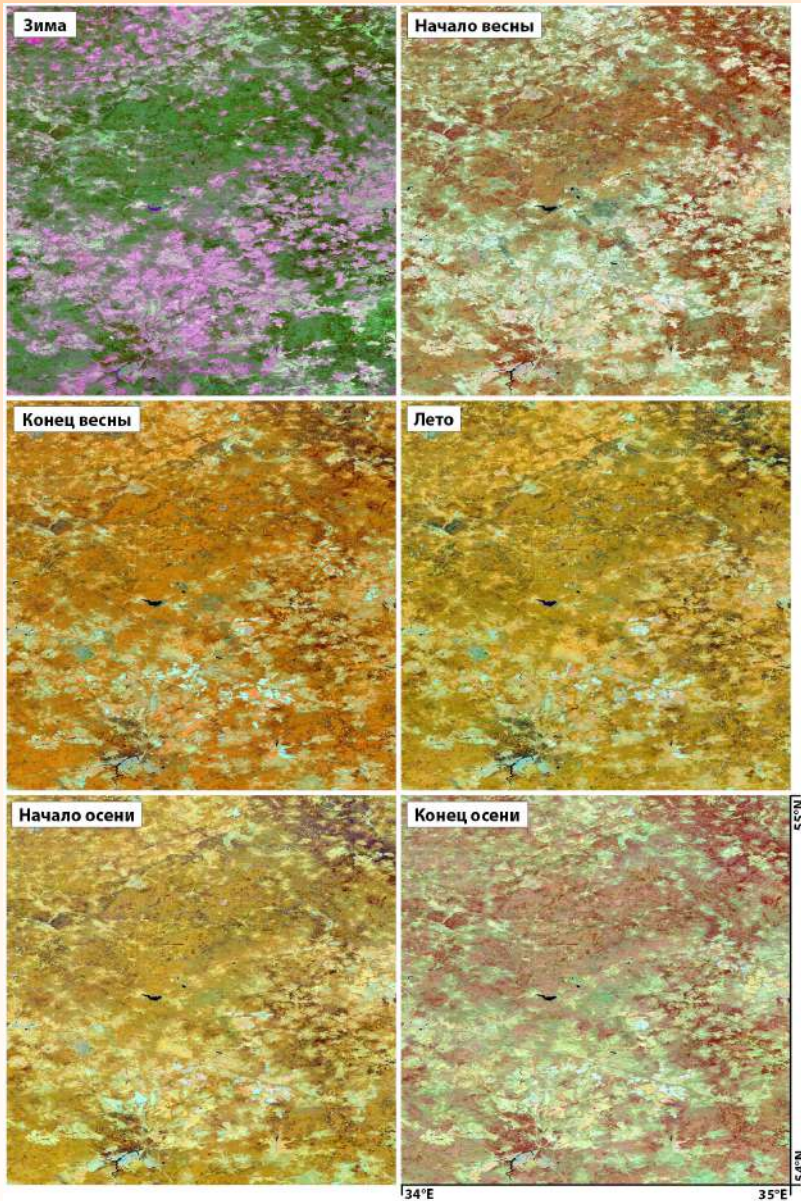
Кроме того, для их тематической обработки применялся **единообразный набор методов**, независимо от типа оцениваемого показателя и масштабов анализируемой территории.

# ЭТАПЫ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

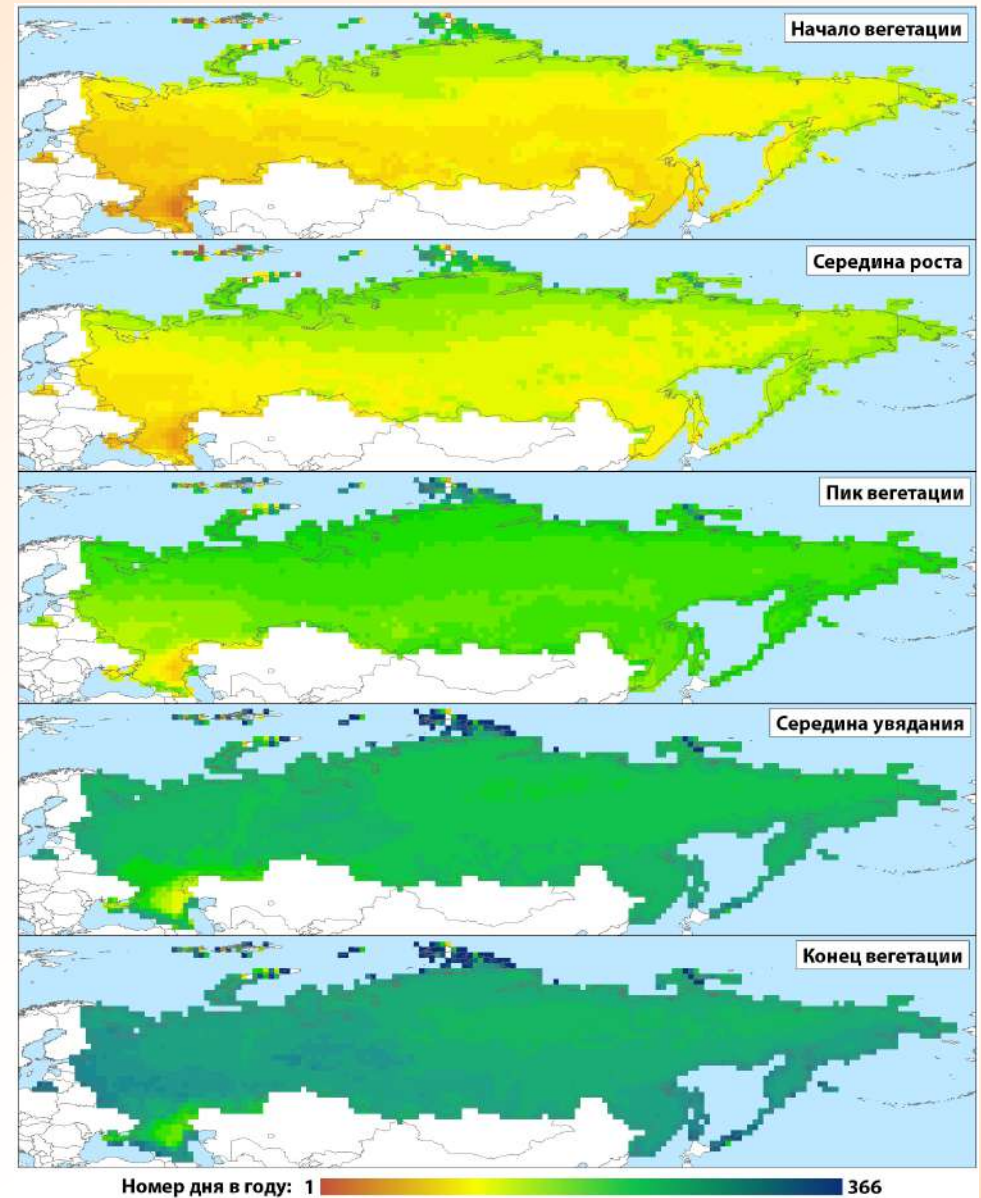
1. Формирование набора **мультиспектральных спутниковых изображений** на территорию интереса;
2. Преобразование исходных значений пикселей в каналах спутниковых изображений в **производные спектральные переменные-предикторы** (индексы и т.п.);
3. Формирование набора **дополнительных геопространственных переменных** для моделирования (пространственные координаты, характеристики рельефа и т.п.);
4. Извлечение значений признаков в местах расположения эталонных участков, входящих в **обучающую выборку**, с известными характеристиками лесных экосистем;
5. **Обучение классификационной или регрессионной модели** по извлеченным значениям переменных;
6. Применение обученной модели ко всем пикселям на территории интереса и получение, таким образом, **тематического изображения**, характеризующего пространственное распределение моделируемого показателя.

# МЕТОДЫ: СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

## Разносезонные композитные изображения



## Данные MODIS о динамике наземного покрова (MCD12Q2)



# МЕТОДЫ: СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ

Попарные нормализованные отношения спектральных каналов являются обобщенными функциональными аналогами широко распространенных вегетационных индексов (таких как NDVI и т.п.), и рассчитываются по формуле:

$$\mathbf{NRI}_{i+n,i} = \mathbf{B}_{i+n} / \mathbf{B}_i + \mathbf{B}_{i+n}$$

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

$\mathbf{B}_i$  – значение пикселя в канале изображения с порядковым номером  $i$ ;

$\mathbf{B}_{i+n}$  – значение пикселя в канале изображения с порядковым номером  $i+n$ ;

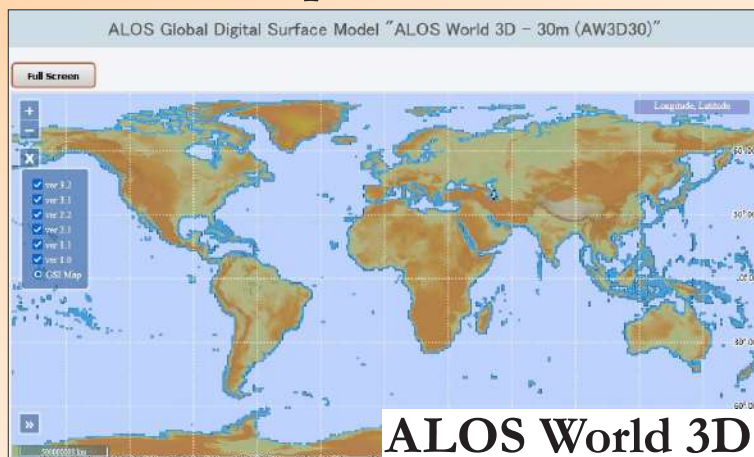
$i$  – целое число в пределах от 1 до  $N-1$ ;

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

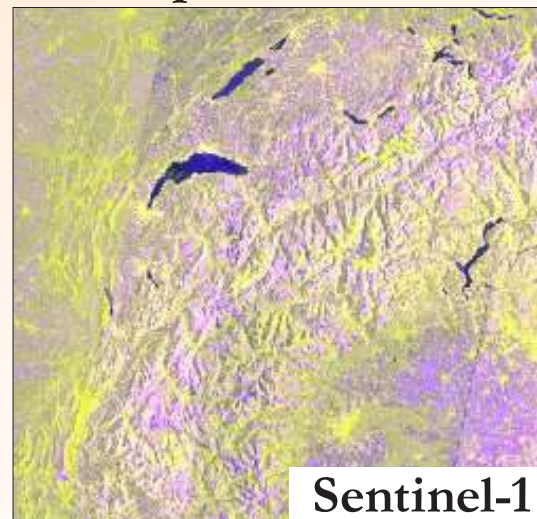
$N$  – общее число каналов в изображении.

# МЕТОДЫ: ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРЕДИКТОРЫ

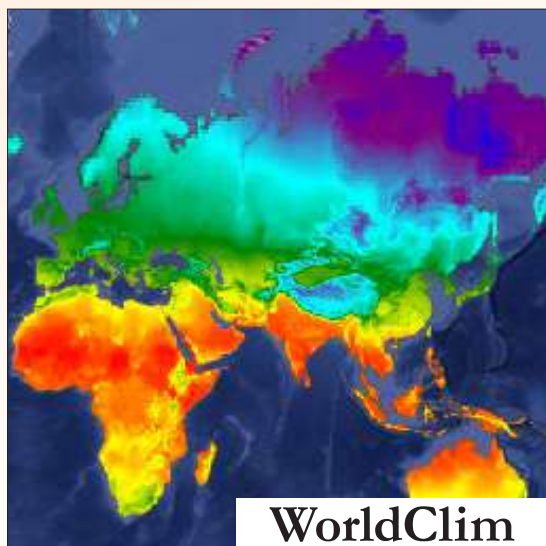
## ЦММ и координаты пикселей



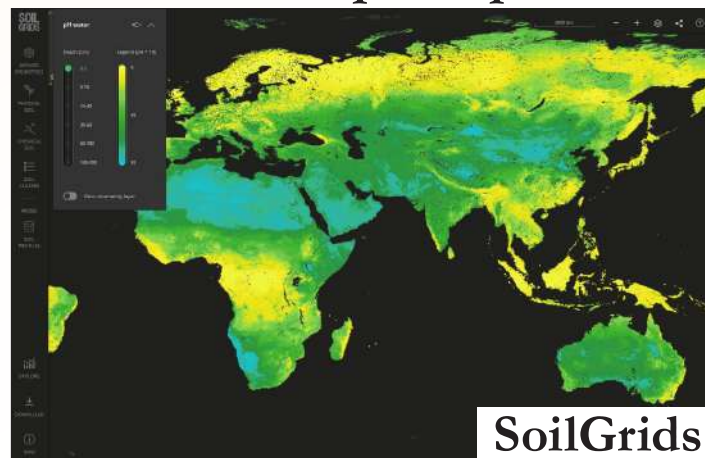
## Радарные данные



## Климатические данные



## Почвенные характеристики



# МЕТОДЫ: ИЗВЛЕЧЕНИЕ ПРИЗНАКОВ

Тип эталонных участков по размеру Локальная однородность извлекаемых признаков	Полигоны (несколько десятков пикселей)	Точки (один или несколько пикселей)
Однородные	Медиана	Медиана из ближайшей окрестности
Неоднородные	Исключение из выборки	Поиск наилучшего пикселя

# МЕТОДЫ: ОБУЧЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

## Случайные леса (Random Forest):

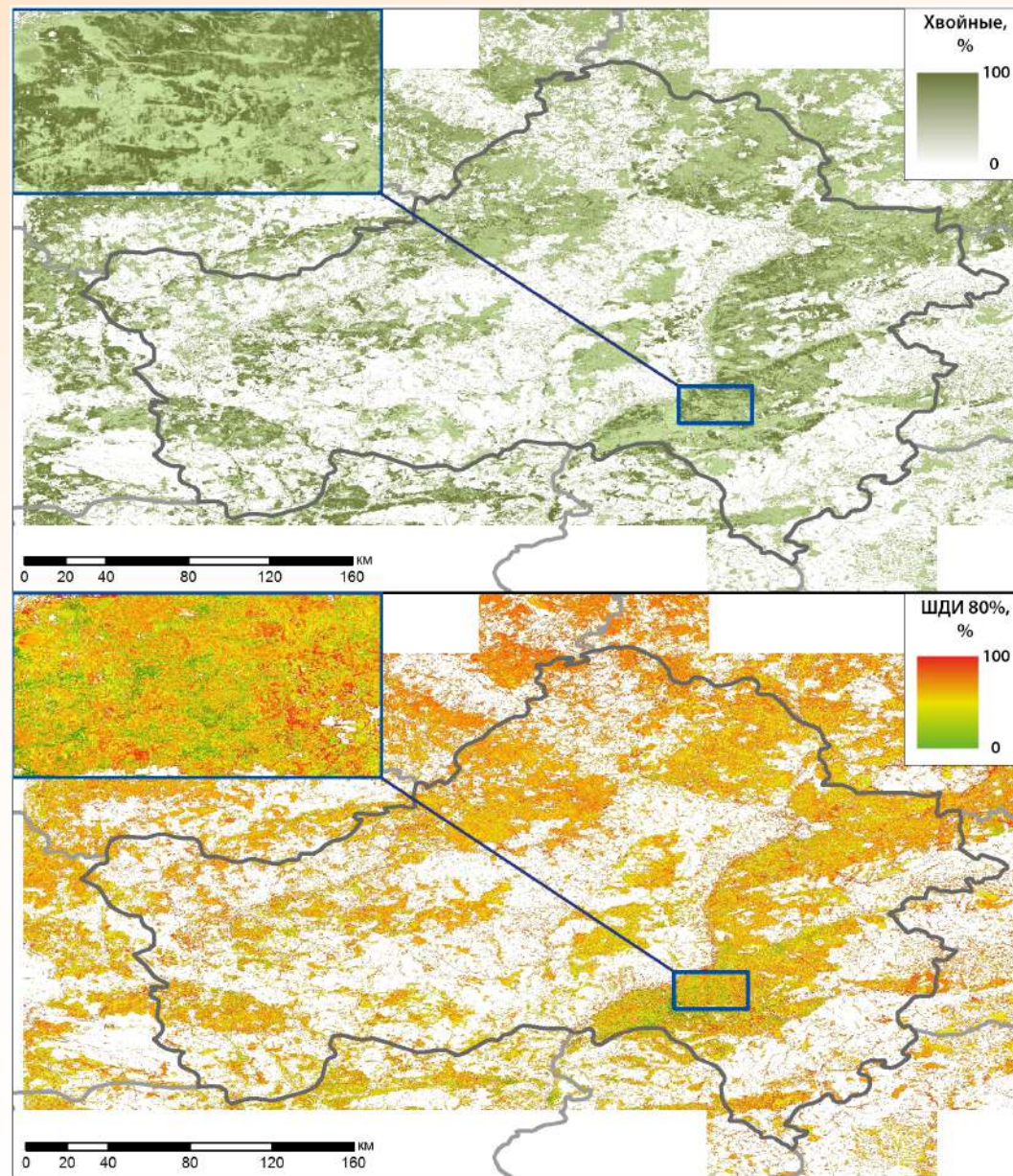
- + подходит как для задач классификации, так и для регрессии;
  - + параметры алгоритма (относительно) легко настраиваются;
  - + работает с большим количеством предикторов и не требует их специальной подготовки (преобразований);
  - + имеет встроенный функционал для анализа качества обучающей выборки, информативности переменных и валидации обученной модели;
  - + легко масштабируется для работы с большими объемами данных;
  - + хорошо изучен и имеет множество примеров эффективного использования для задач классификации и регрессии в различных сферах использования машинного обучения.
- 
- не может предсказывать за пределы диапазона значений исходной обучающей выборки;
  - более сложные алгоритмы моделирования (градиентный бустинг, нейросети), как правило, немного точнее.



# МЕТОДЫ: ПРЕДСКАЗАНИЯ МОДЕЛЕЙ

Результаты геопространственного моделирования сопровождаются попиксельными оценками неопределенности:

- для классификации – вероятность предсказанного класса;
- для регрессии – ширина доверительного интервала предсказанного значения.



# РЕЗУЛЬТАТЫ НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ

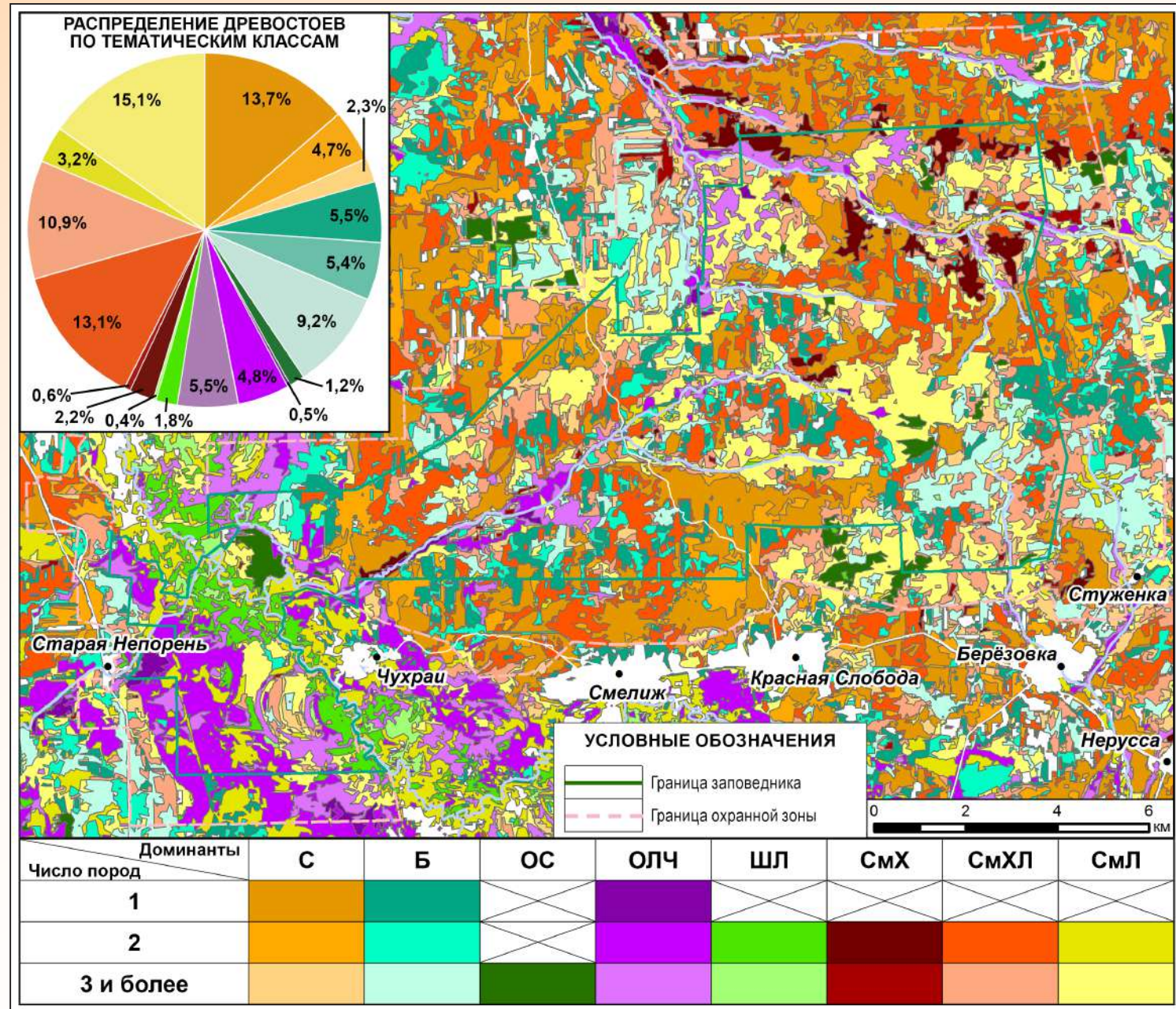
## ГПБЗ «Брянский лес»

Доминанты  
древесного полога

ОА = 89.6%

Число древесных  
пород

ОА = 72.4%



# РЕЗУЛЬТАТЫ ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ

## ГПБЗ «Брянский лес»

Запас стволовой  
древесины

$$R^2 = 0.70$$

$$RMSE = 54 \text{ м}^3/\text{га}$$

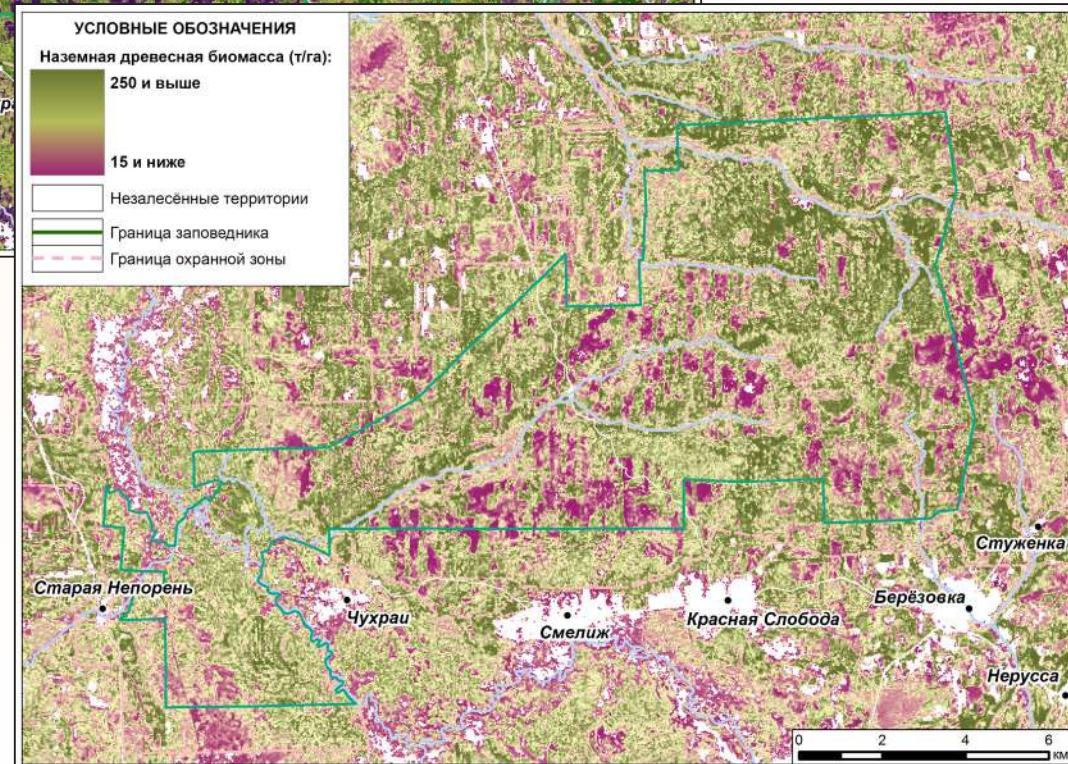
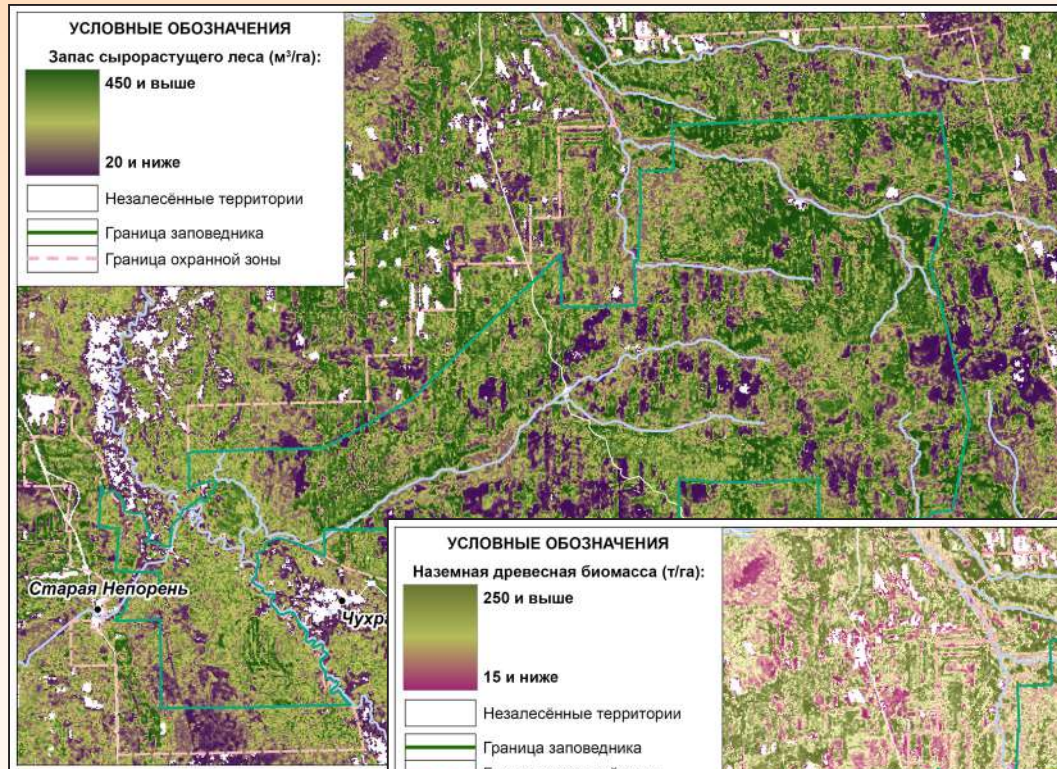
$$RMSE_{\%} = 22\%$$

Наземная древесная  
биомасса

$$R^2 = 0.68$$

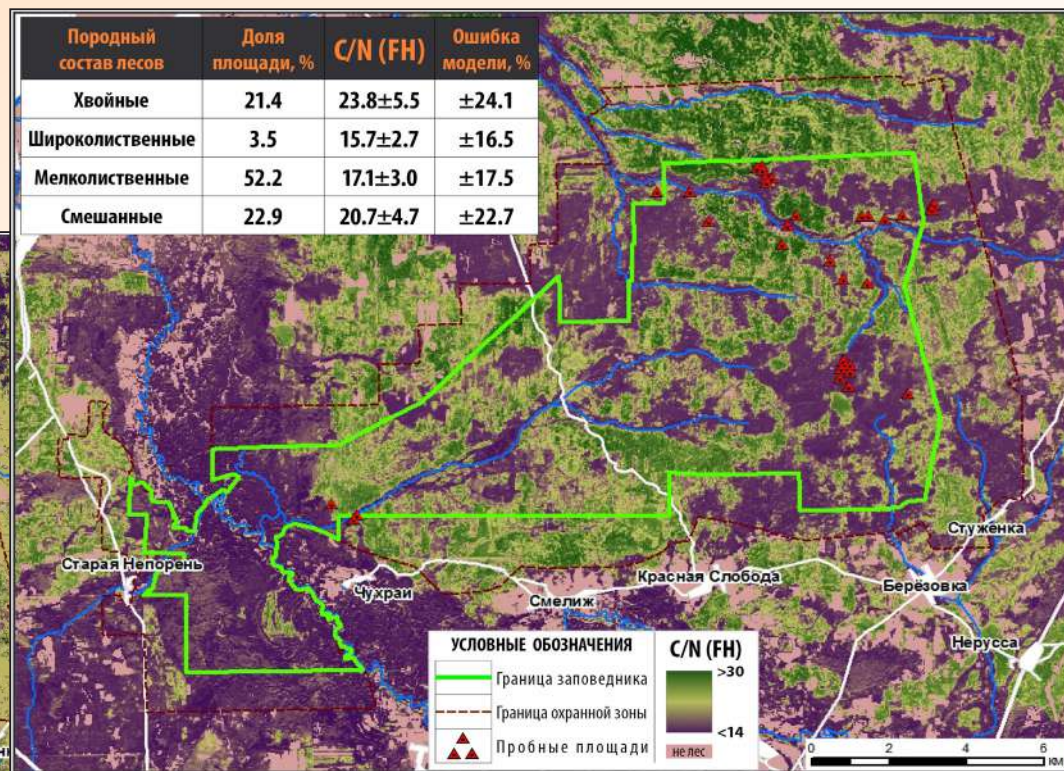
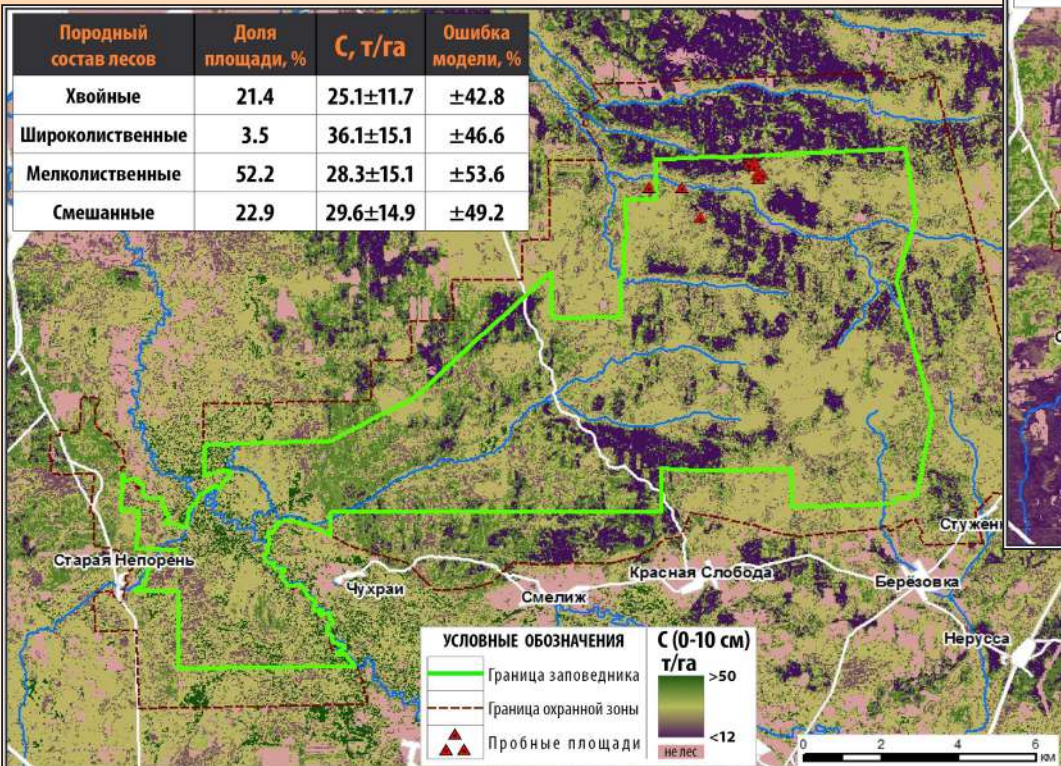
$$RMSE = 30 \text{ т}/\text{га}$$

$$RMSE_{\%} = 21\%$$



# РЕЗУЛЬТАТЫ НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ

## ГПБЗ «Брянский лес»



Показатель	C:N		Запас C		
	L	FH	L	FH	0-10 см
$R^2$	0.71	0.83	0.61	0.37	0.34
RMSE	2.7	2.1	0.7 т/га	1.9 т/га	11 т/га
RMSE <sub>%</sub>	13%	11%	40%	49%	39%

# РЕЗУЛЬТАТЫ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

## Брянская область

### Возраст древостоев

$$R^2 = 0.39$$

$$RMSE = 20 \text{ лет}$$

$$RMSE_{\%} = 37\%$$

### Высота древостоев

$$R^2 = 0.53$$

$$RMSE = 4.5 \text{ м}$$

$$RMSE_{\%} = 24\%$$

### Диаметр ствола

$$R^2 = 0.46$$

$$RMSE = 6.6 \text{ см}$$

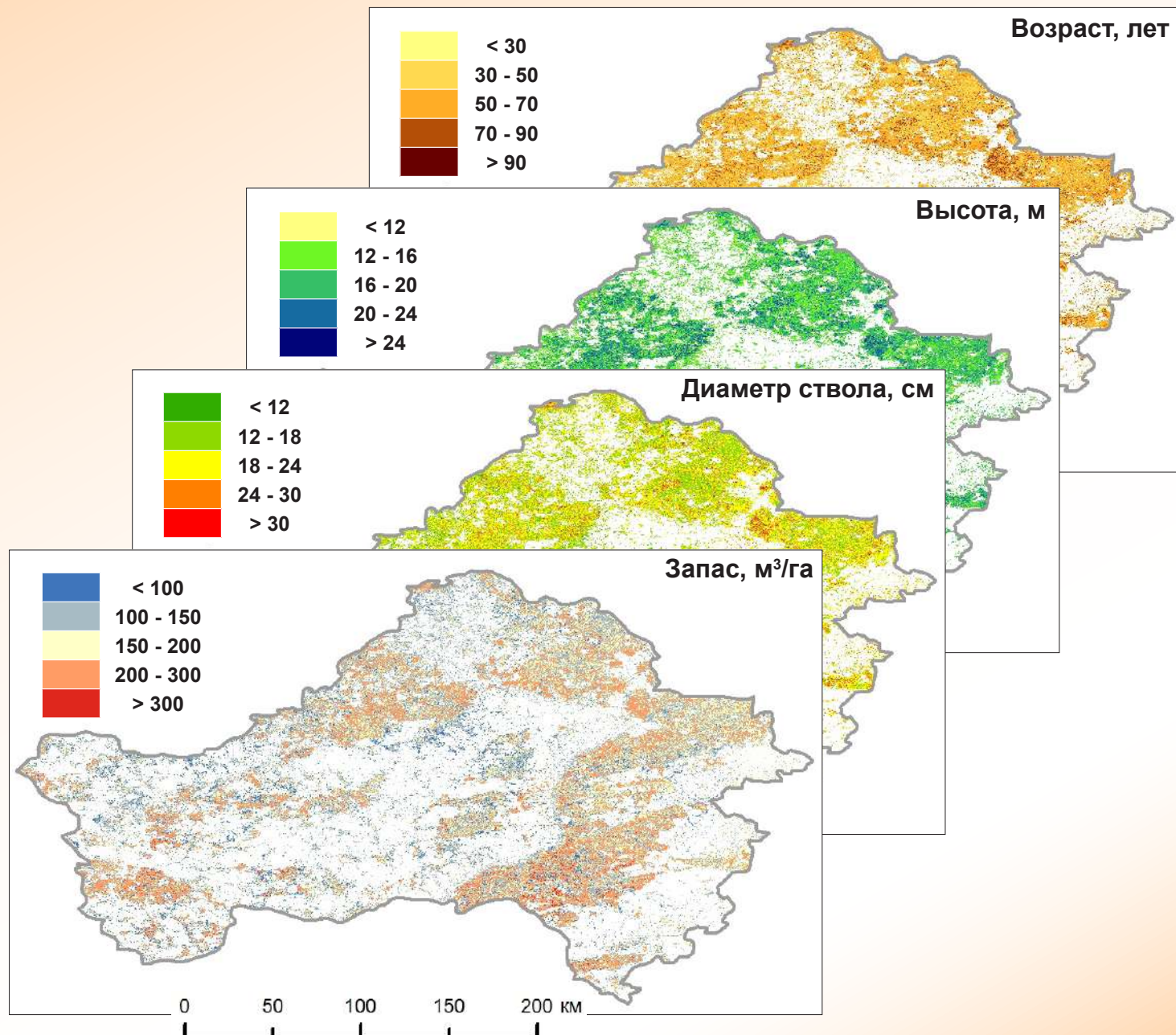
$$RMSE_{\%} = 33\%$$

### Запас

$$R^2 = 0.55$$

$$RMSE = 66 \text{ м}^3/\text{га}$$

$$RMSE_{\%} = 35\%$$



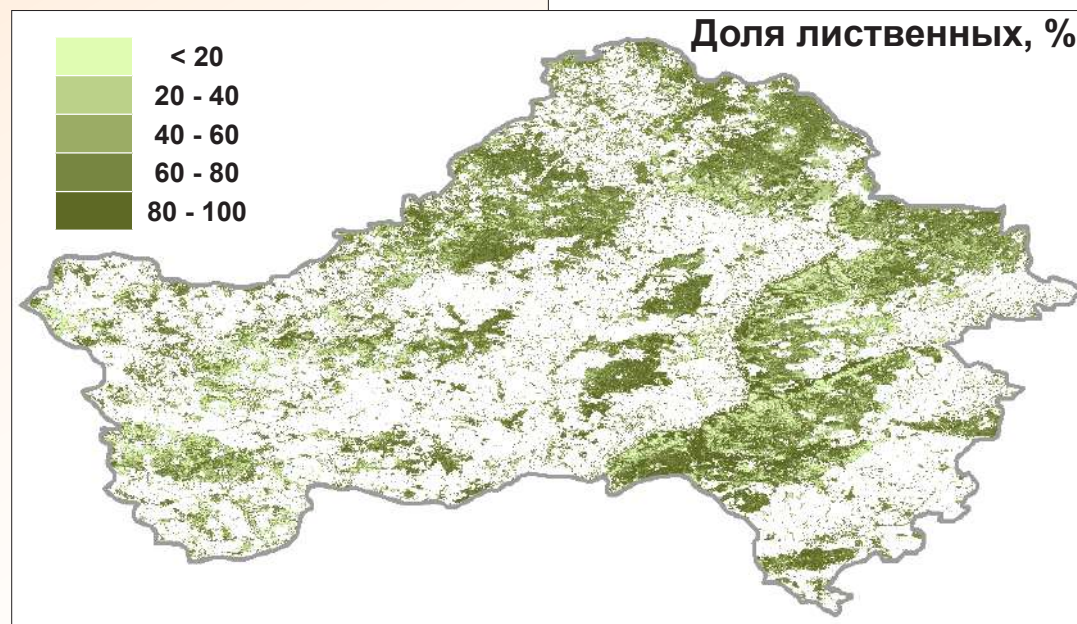
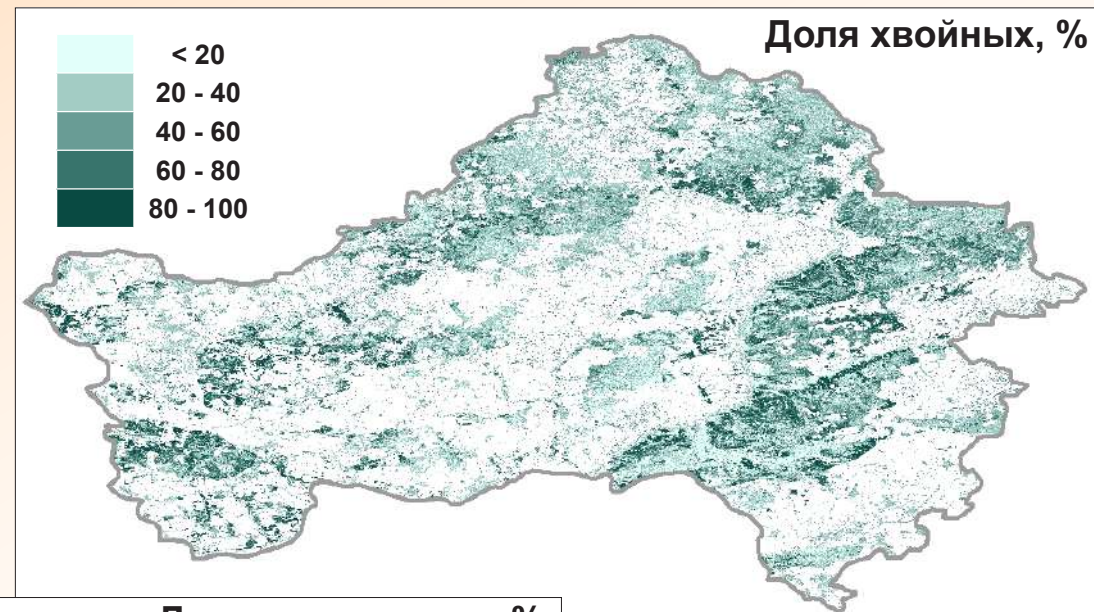
# РЕЗУЛЬТАТЫ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

## Брянская область

Доля хвойных/лиственных  
пород по запасу

$$R^2 = 0.66$$

$$RMSE = 21\%$$



0 50 100 150 200 км

# РЕЗУЛЬТАТЫ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ

## Республика Карелия

С:N в подгоризонте FH

$$R^2 = 0.57$$

$$RMSE = 6.3$$

$$RMSE_{\%} = 17\%$$

### Запас С

в подгоризонте FH

$$R^2 = 0.21$$

$$RMSE = 20 \text{ т/га}$$

$$RMSE_{\%} = 62\%$$

### Запас С

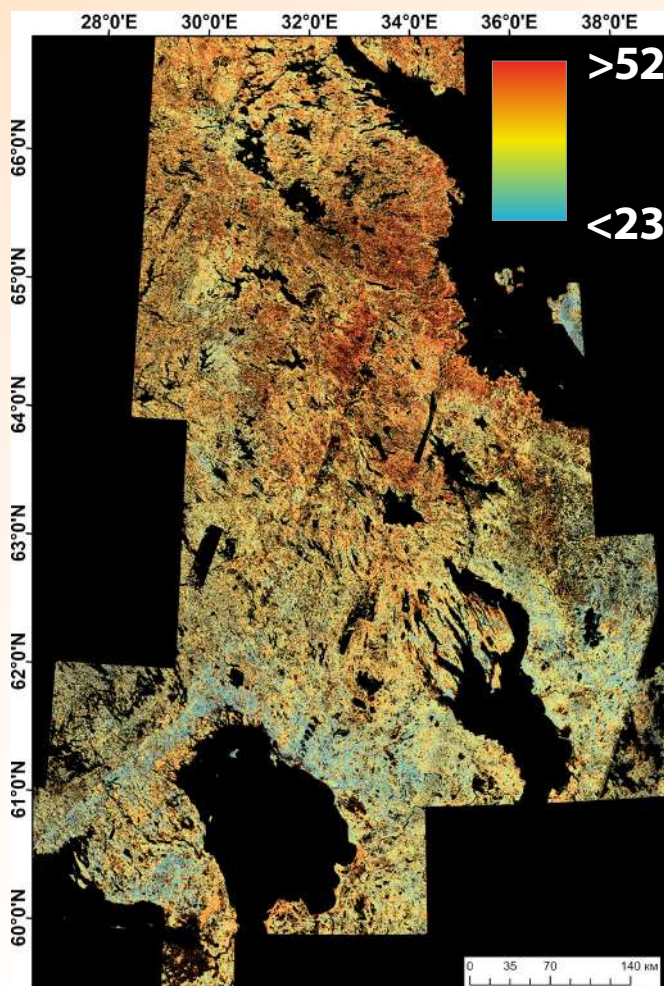
в слое почвы 0-10 см

$$R^2 = 0.32$$

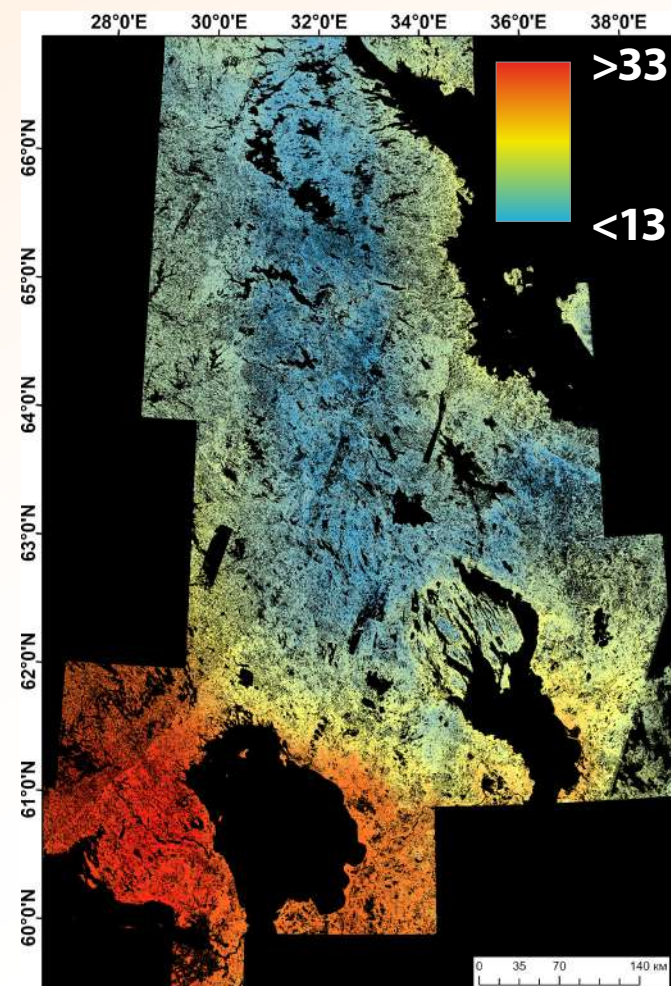
$$RMSE = 19 \text{ т/га}$$

$$RMSE_{\%} = 69\%$$

С:N (FH)



Запас С (0-10 см)



# ВЫВОДЫ

- Описанный набор методов в достаточной степени универсален для задач пространственной оценки структурных и функциональных характеристик лесных экосистем с использованием оптических спутниковых данных высокого пространственного разрешения.
- Показаны возможности пространственного переноса и масштабирования этих методов при моделировании не только различных свойств древостоев, но и органогенных горизонтов лесных почв.
- Полученные показатели **эффективности моделей** в полной мере согласуются с результатами похожих зарубежных и российских работ.
- Реализация автоматизированных этапов методики на платформе **Google Earth Engine** (или аналогичных) потенциально позволяет получать тематические продукты для территорий неограниченного пространственного охвата (вплоть до глобального) при условии наличия достаточно представительной опорной выборки.





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

*СЕКЦИЯ «МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ И ПОЧВЕННЫХ ПОКРОВОВ»*

***СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!***

***Е.А. Гаврилюк***

***ЦЭПЛ РАН, г. Москва***

**e-mail: [egor@ifi.rssi.ru](mailto:egor@ifi.rssi.ru)**

Работы выполнены в рамках ГЗ ЦЭПЛ РАН «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем» (регистрационный номер НИОКТР 121121600118-8, тематическая и статистическая обработка данных) при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19-77-30015, подготовка исходных спутниковых данных и написание программных скриптов; проект № 21-74-20171, работы в отношении характеристик лесной подстилки).

**Москва, ИКИ РАН, 15 ноября 2022 года**