



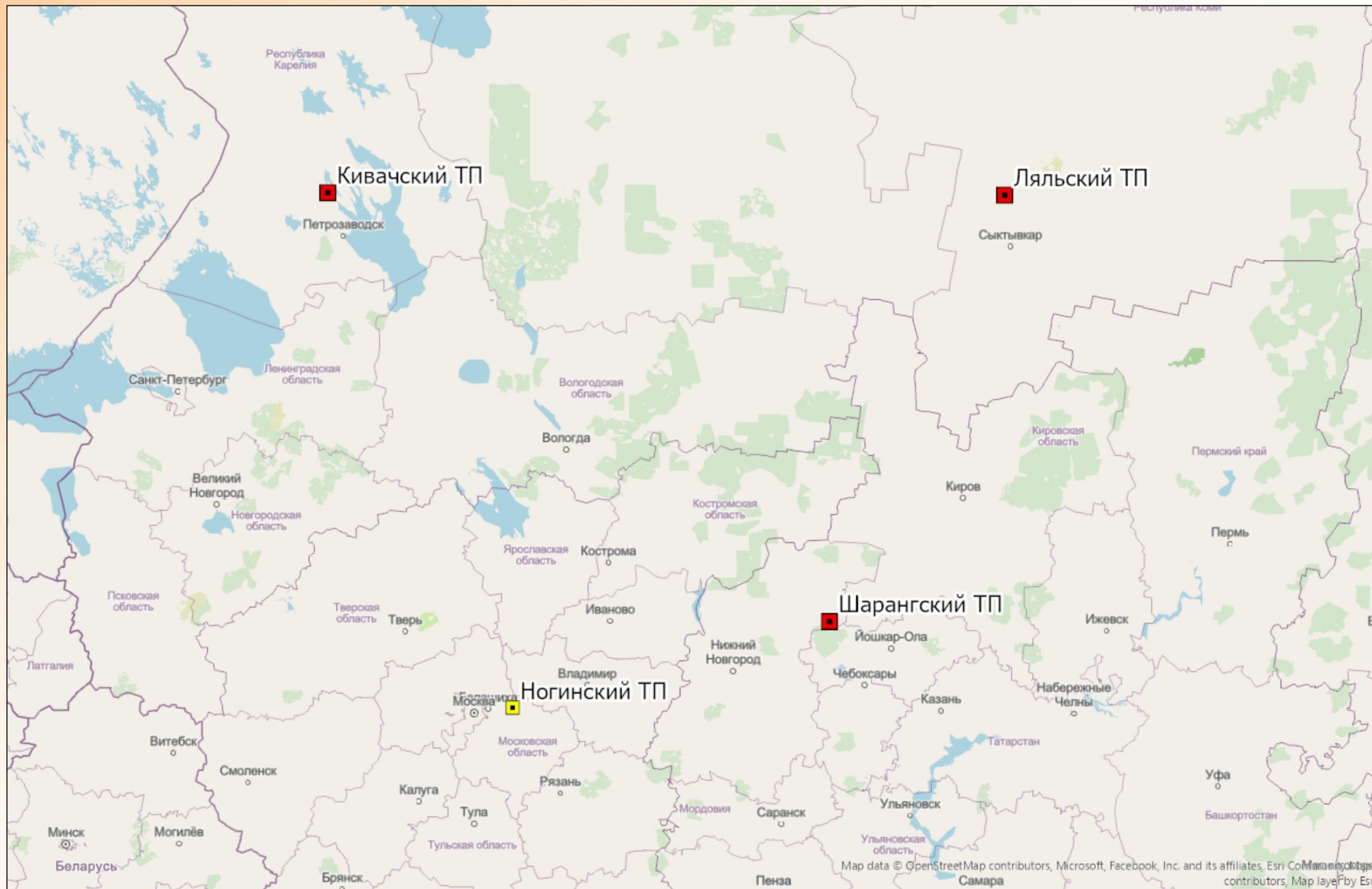
**ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ  
УГЛЕРОДА В ДРЕВЕСНОМ ПУЛЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДЗЗ  
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБУЧАЮЩИХ ВЫБОРОК НАЗЕМНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ С ПРОБНЫХ ПЛОЩАДЕЙ РАЗНОГО ТИПА**

***Гаврилюк Е.А.***

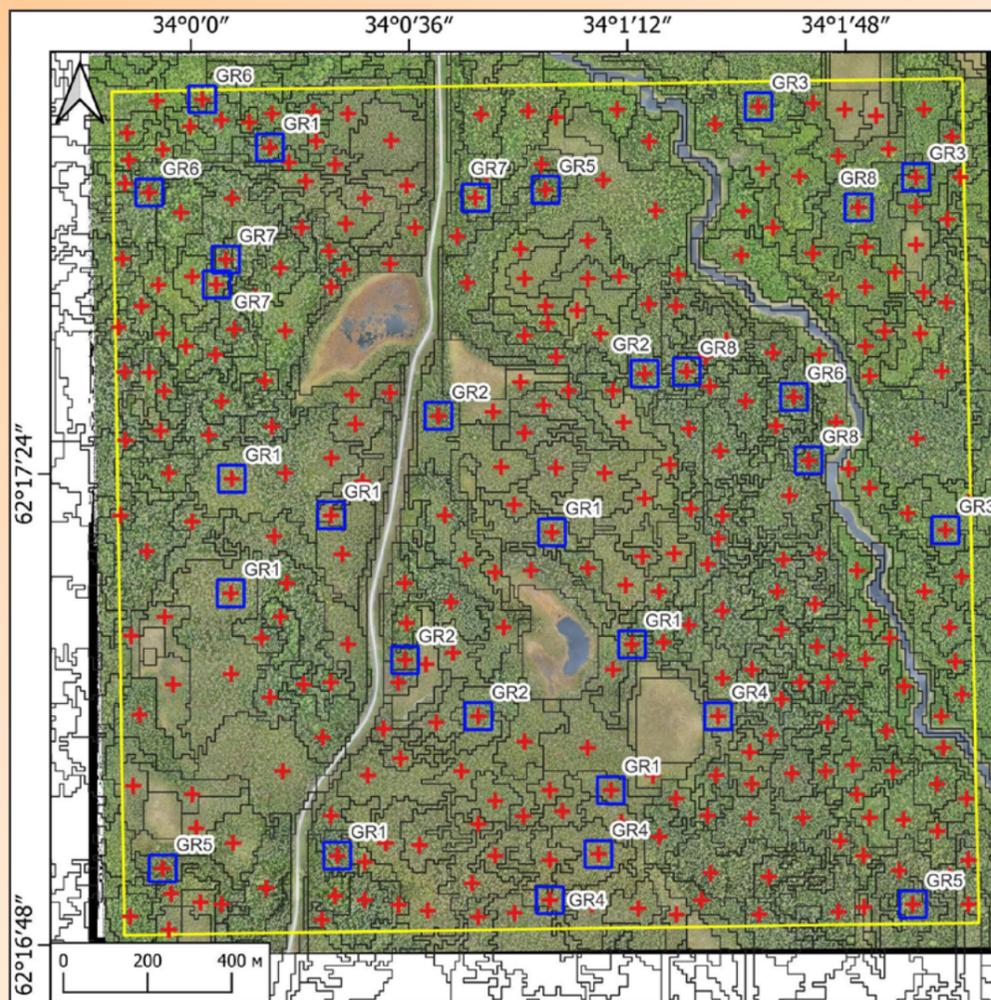
**Центр по проблемам экологии  
и продуктивности лесов РАН  
г. Москва, Россия**

- » В рамках работ по созданию национальной сети мониторинга климатически активных веществ на территории **тестовых полигонов интенсивного уровня** закладываются **два типа наземных пробных площадей (ПП) – рекогносцировочные и постоянные.**
- » В случае **лесных тестовых полигонов** для обоих типов ПП на основе получаемых наземных измерений могут быть оценены **запасы древесного пула углерода.**
- » На рекогносцировочных ПП (**РПП**) используются методы **глазомерно-измерительной таксации**, аналогичные применяемым при **лесоустроительных работах**, а на постоянных пробных площадях (**ППП**) проводится **сплошной подеревный пересчет** и сопутствующие измерения по стандартам научных исследований.
- » Не считая ПП, закладываемых в рамках ГИЛ, **данные двух обозначенных типов являются наиболее распространенными источниками наземной информации о лесах России**, и чаще всего используются при геопространственном моделировании характеристик древостоев с использованием **данных ДЗЗ.**

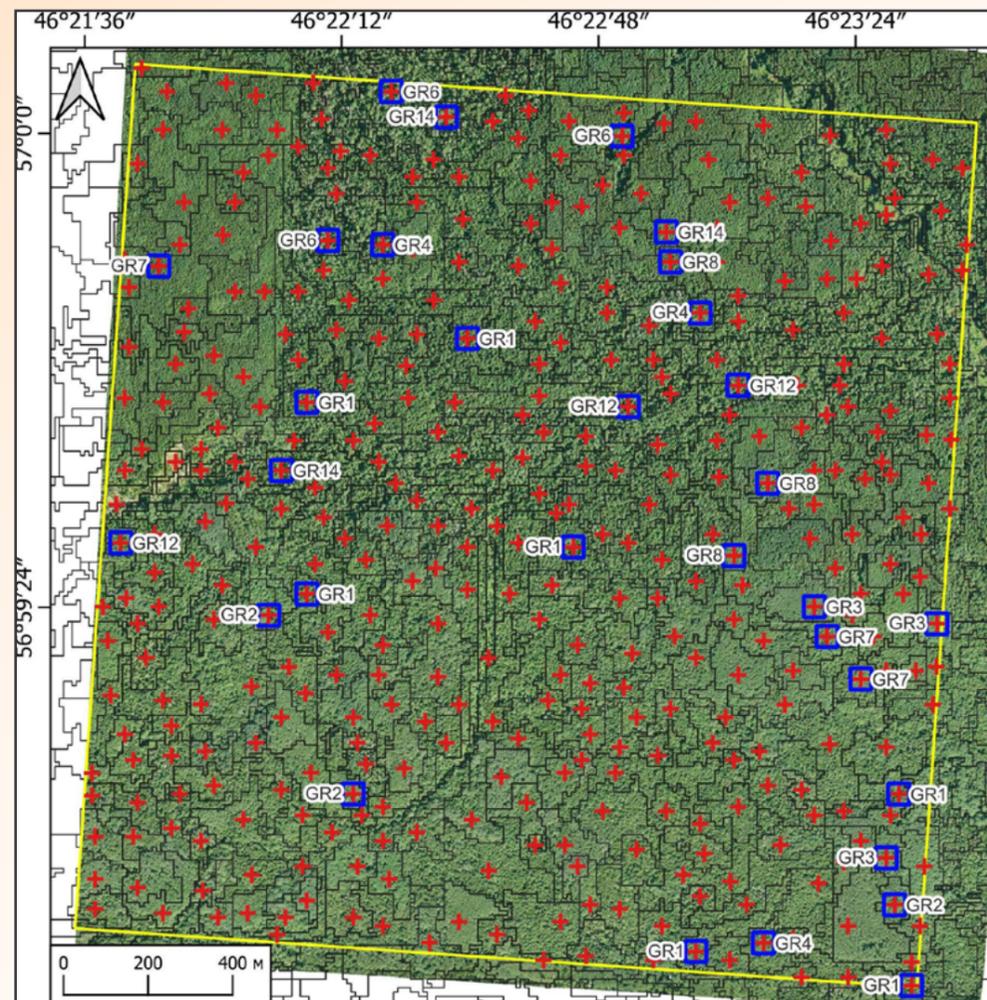
**Цель данной работы** – получить геопространственные оценки запасов углерода в **древесном пуле** с использованием **ПП двух разных типов** для территории одних и тех же лесных тестовых полигонов и **сравнить полученные результаты** между собой.



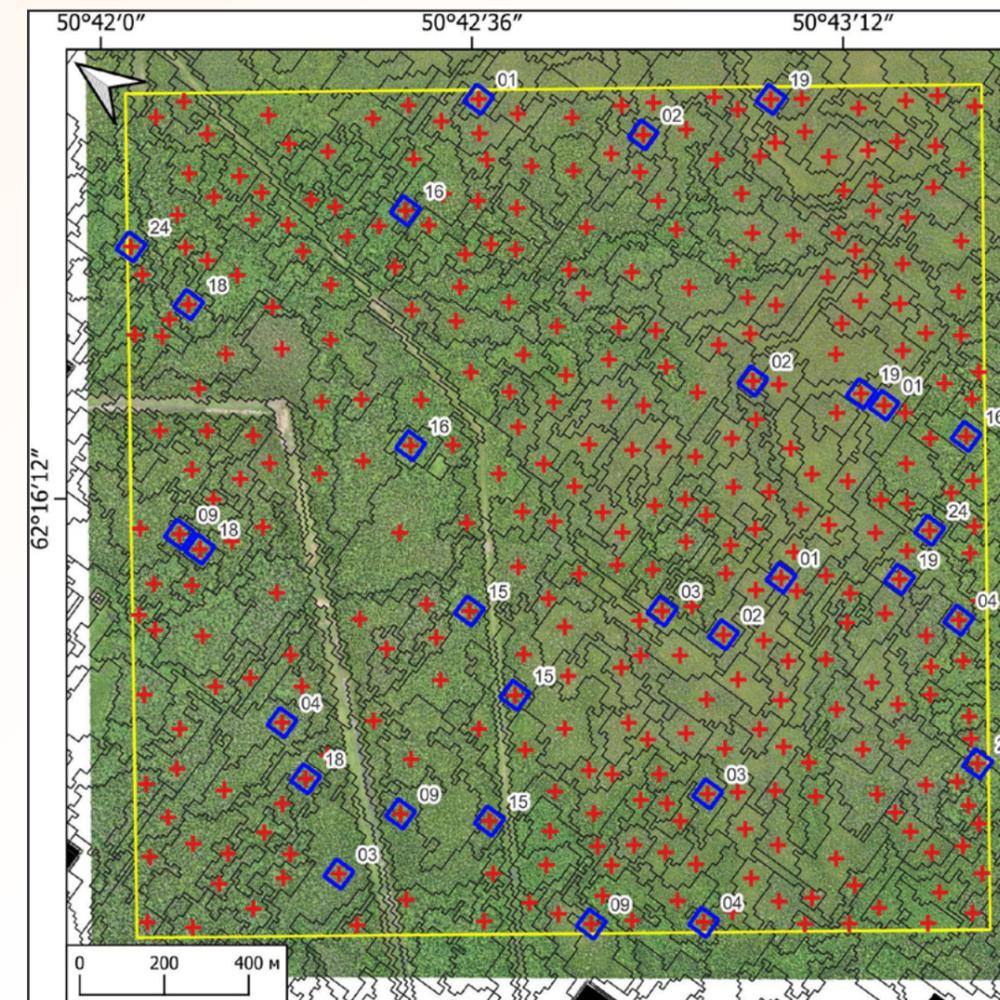
## Кивачский ТП



## Шарангский ТП



## Ляльский ТП



### » Пробные площади:

- РПП – реласкопические, 300-400 штук на полигон, глазомерно-измерительная таксация;
- ППП – 50x50 м, 29-30 штук на полигон, сплошная перечислительная таксация;

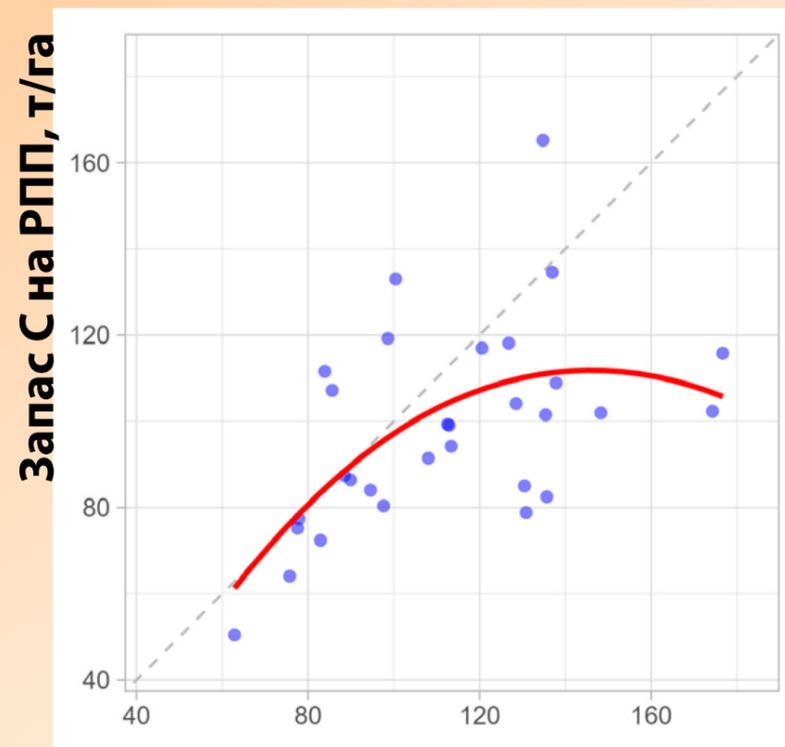
### » Обработка полевых измерений – в АИС Carbon;

### » Конверсия в древесную фитомассу:

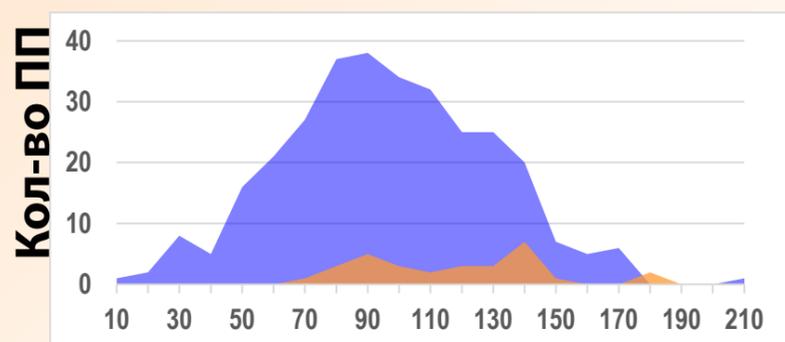
- **живой древесиной** – через **аллометрические уравнения** – функционал **allobd** (Gonzalez-Akre et al., 2022) + **собственные уравнения** на основе измерений из актуальной **БД В.А. Усольцева**;
- **мертвая древесина** – через **запас** и **таблицы базовой плотности** по стадиям разложения (Harmon et al., 2008);

### » Конверсия фитомассы в углерод – через коэффициент **0.5**.

## Кивачский ТП

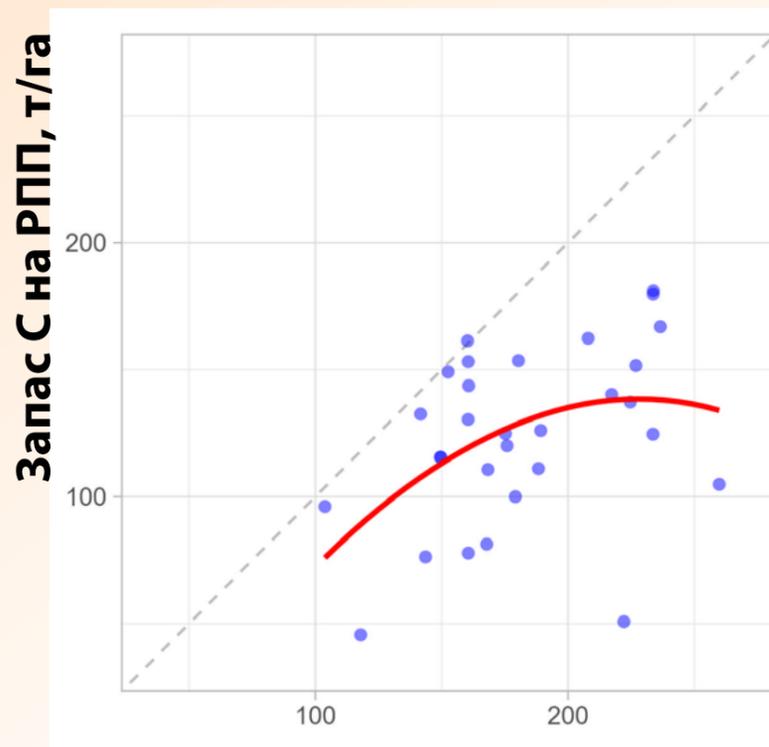


Запас С на РПП, т/га

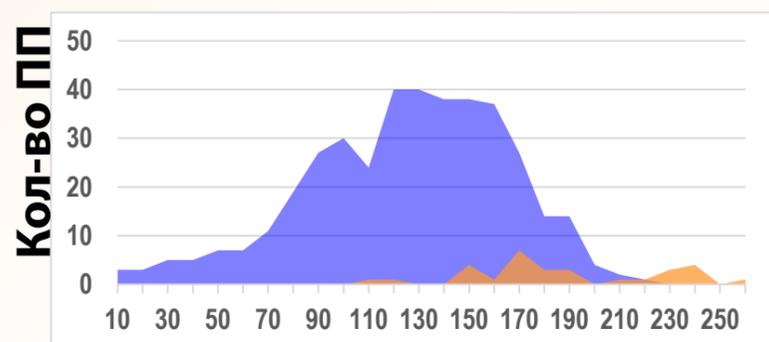


Запас С, т/га

## Шарангский ТП

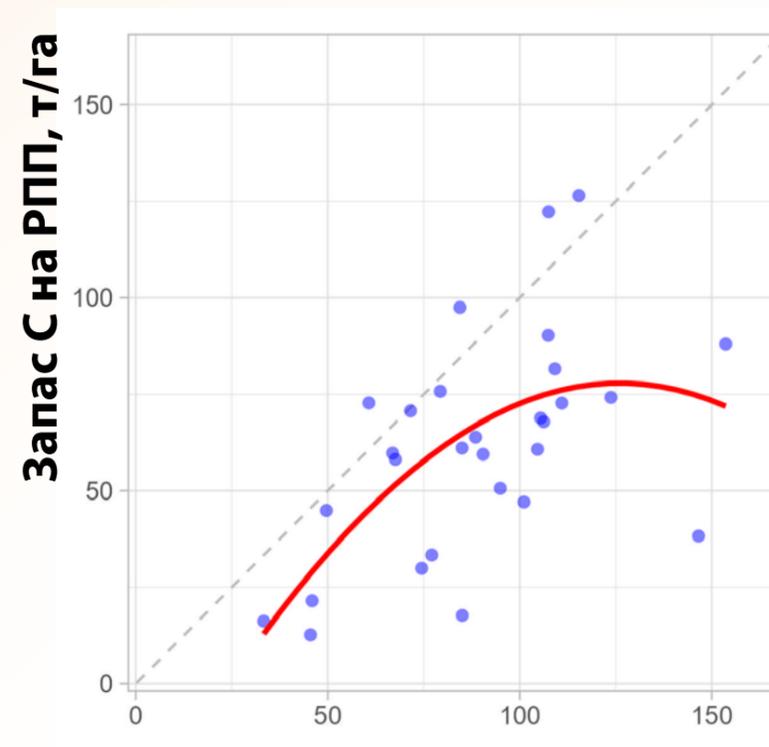


Запас С на РПП, т/га

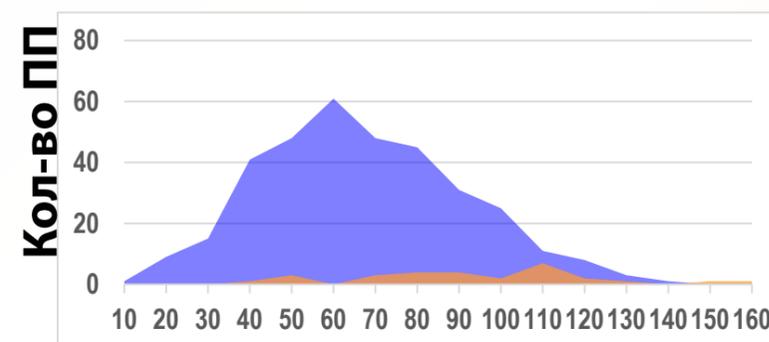


Запас С, т/га

## Ляльский ТП



Запас С на РПП, т/га



Запас С, т/га

Тип	Ср.	Ст.О	r	САО	СКО
ППП	112.7	28.7	0.49	23.2	29.9
РПП	91.3	32.9			

Тип	Ср.	Ст.О	r	САО	СКО
ППП	182.7	38.8	0.39	58.7	70.9
РПП	120.9	39.6			

Тип	Ср.	Ст.О	r	САО	СКО
ППП	89.4	28.6	0.53	31.4	39.0
РПП	62.3	24.2			

**Ср.** – среднее значение запаса С по выборке (т/га), **Ст.О** – стандартное отклонение по выборке (т/га), **САО** – среднее абсолютное отклонение между выборками (т/га), **СКО** – среднее квадратическое отклонение между выборками (т/га), **r** – коэффициент корреляции Пирсона.

## Радарные спутниковые данные:

**Sentinel-1** – разносезонные радарные данные С-диапазона;

- **VV, VH** – коэффициенты обратного рассеяния в двух режимах поляризации;
- **VV/VV + VH** – их нормализованное отношение;
- **GLCM** – основные текстурные признаки Харалика (8 метрик);
- **Результаты PCA-преобразования** (компоненты суммарно описывающие 95% вариации).

## Оптические спутниковые данные:

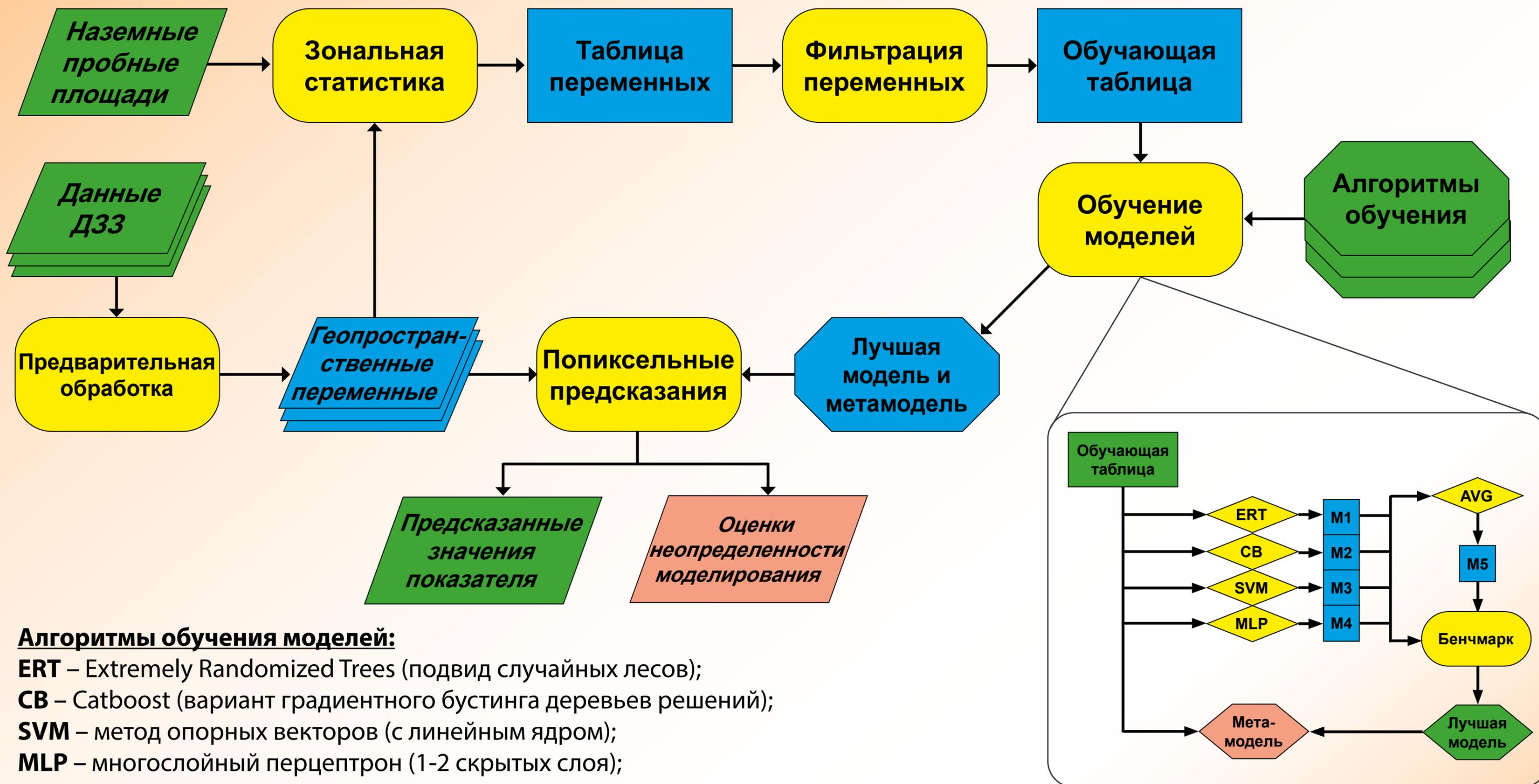
**Sentinel-2** – разносезонные мультиспектральные данные видимого, ближнего и среднего инфракрасного диапазонов;

- **B2:8, 8A, 11, 12** – коэффициенты спектральной яркости в 10 каналах;
- **NRI** – попарные нормализованные отношения каналов (45);
- **Результаты PCA-преобразования** (компоненты суммарно описывающие 95% вариации)

## Лидарные данные с БПЛА:

**Результаты ВЛС** – нормализованное облако точек (трехмерные координаты возвратов сигнала лазера);

- **Цифровая модель высот полого;**
- Два набора одинаковых метрик – для **первых** и для **всех** возвратов:
  - **перцентили** распределения значений **высот** (21) и показатели **разброса** между ними (10);
  - **доли возвратов выше** различных **порогов высоты** (с шагом в 2 м);
  - **доли возвратов** в различных **диапазонах высот** (с шагом в 2 м);
  - **прозрачность слоев высот** (с шагом в 2 м);
  - **энтропия** распределения значений **высот**.



## Алгоритмы обучения моделей:

**ERT** – Extremely Randomized Trees (подвид случайных лесов);

**CB** – Catboost (вариант градиентного бустинга деревьев решений);

**SVM** – метод опорных векторов (с линейным ядром);

**MLP** – многослойный перцептрон (1-2 скрытых слоя);

**AVG** – взвешенная сумма предсказаний всех 4-х моделей;

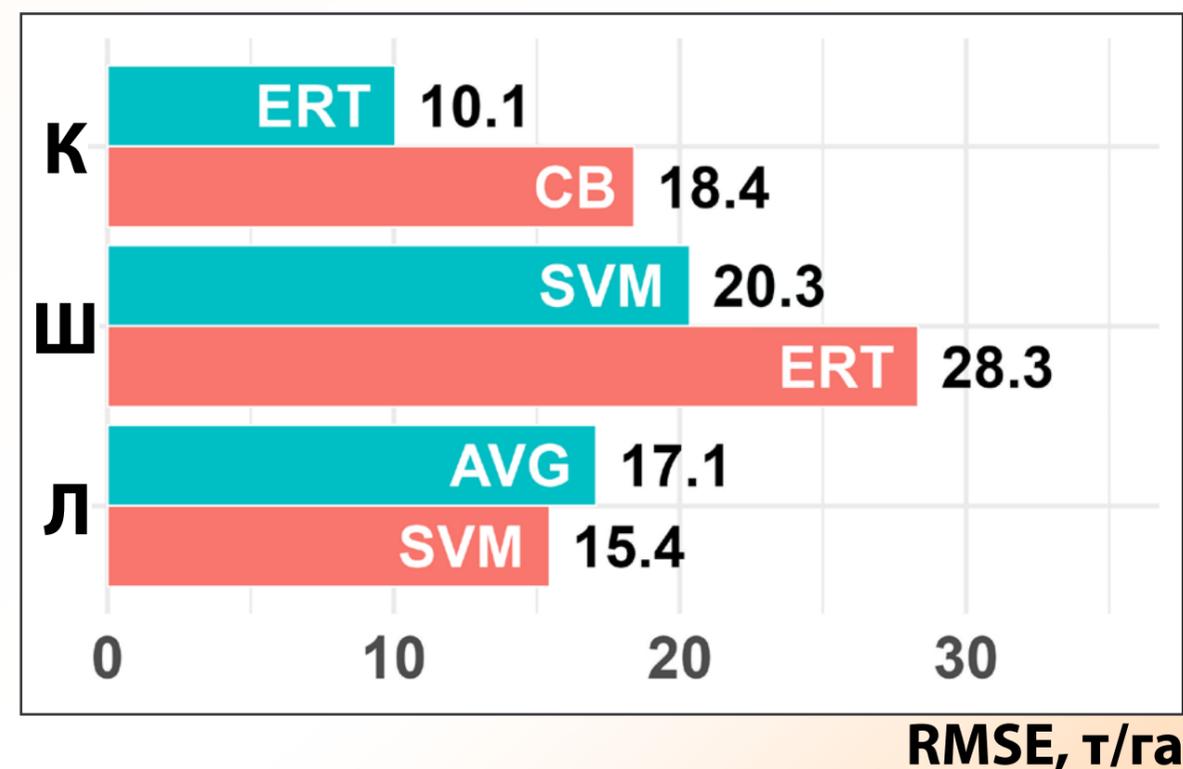
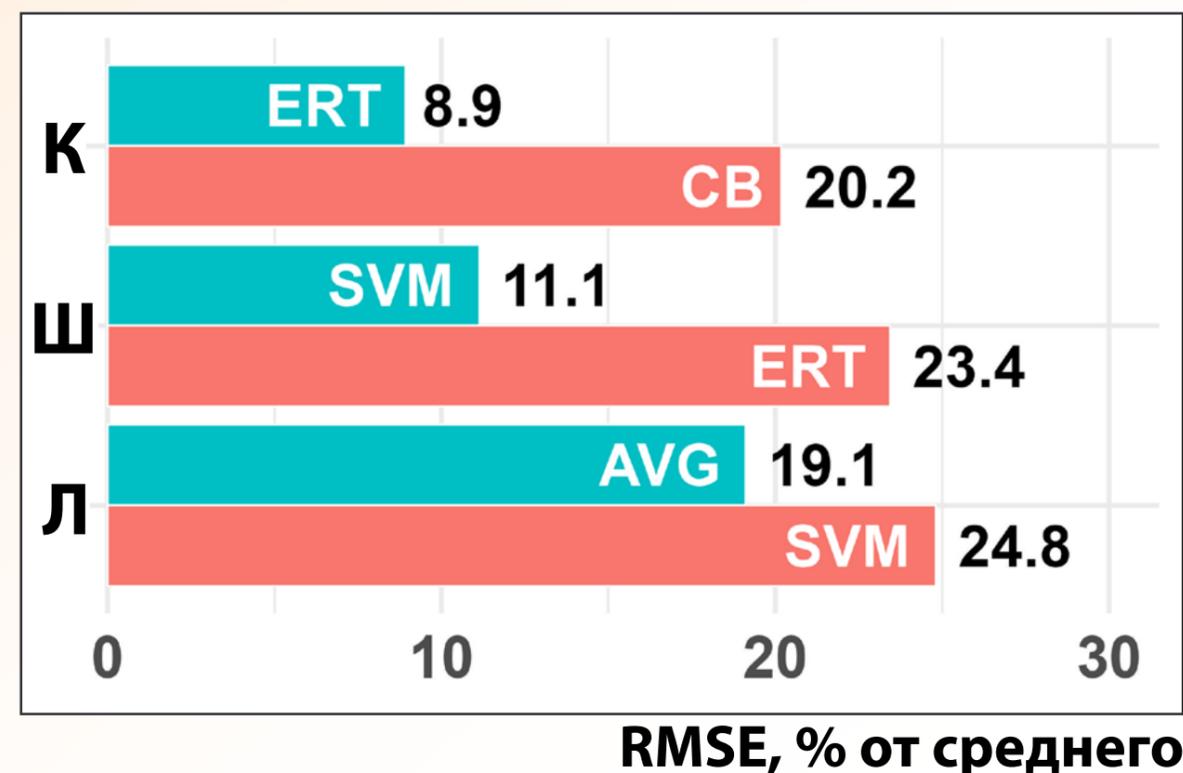
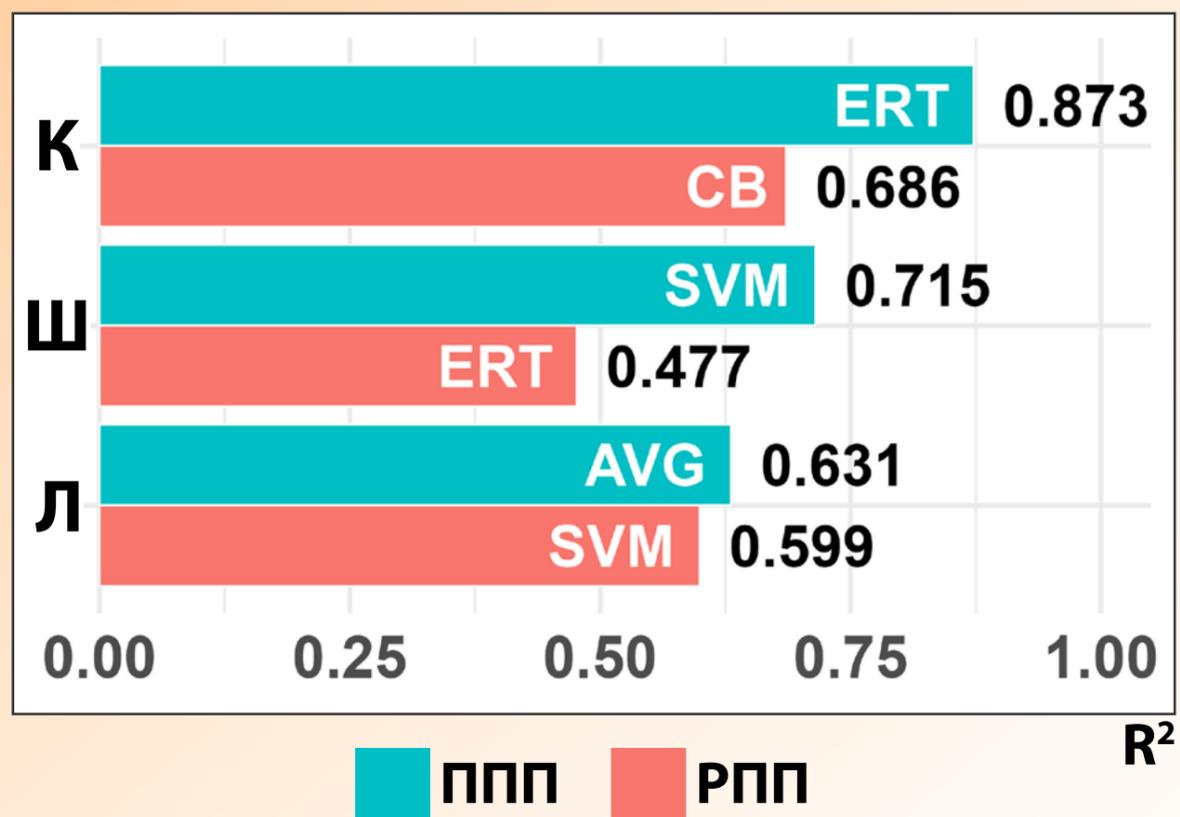
**Метамодель** – квантильный случайный лес, для оценок стандартных ошибок и доверительных интервалов предсказаний выбранной модели.

Источник данных	Тип переменной	Кивачский ТП		Ляльский ТП		Шарангский ТП	
		РПП	ППП	РПП	ППП	РПП	ППП
Воздушное лазерное сканирование	Высота полога					+	+
	Перцентили высот, № ГК*	1	1,5			2	
	Доля сигналов по диапазонам высот, № ГК	1, 2, 6, 7	1,2		1, 3		
Sentinel-2	№ ГК	2, 7, 8	2	1, 2, 4, 7	4	1, 4, 5, 13, 19, 25, 41	2, 4
Sentinel-1	№ ГК		41		9, 31, 79	11, 34, 86	33, 87
–	Широта/долгота пикселя					+	
<b>Всего</b>		<b>8</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>14</b>	<b>5</b>

\* Номер главной компоненты

## Методы отбора:

- 1) **Кластеризация переменных** на основе их **попарной корреляции** с последующим выбором **одной переменной из каждого кластера** (с наибольшей корреляцией со значениями моделируемого показателя);
- 2) **Voruta** на основе **Catboost** для оценки информативности переменных.



**Полигоны:**

К – Кивачский ТП, Ш – Шарангский ТП, Л – Ляльский ТП

**Метрики (на основе пространственной кросс-валидации):**

R<sup>2</sup> – коэффициент детерминации модели

RMSE – средняя квадратическая ошибка модели

**Лучшая модель:**

ERT – Extremely Randomized Trees

CB – Catboost

SVM – метод опорных векторов

MLP – многослойный перцептрон

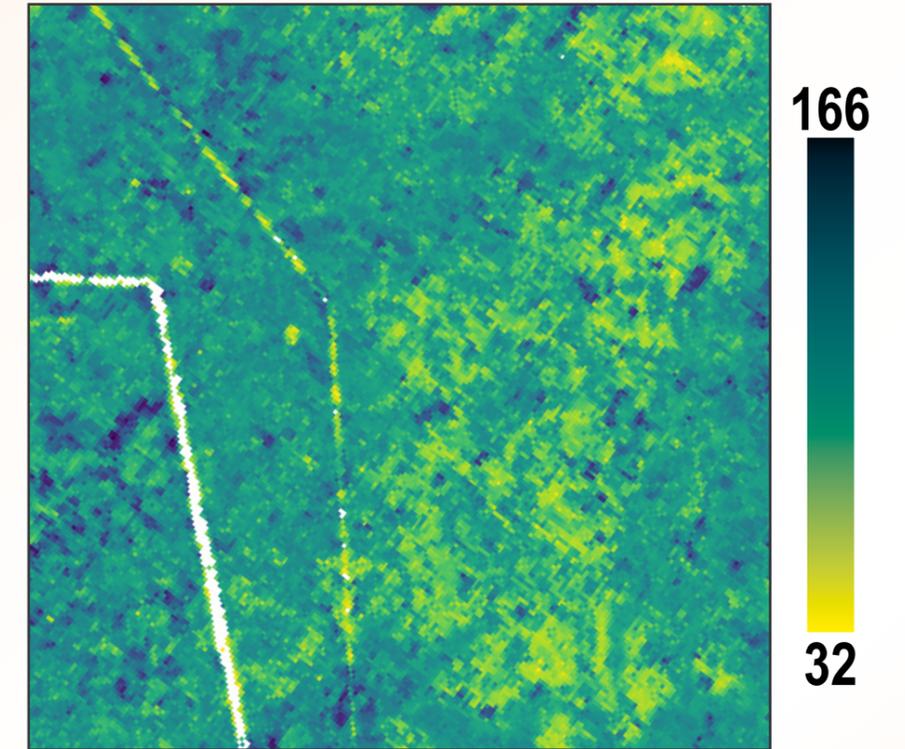
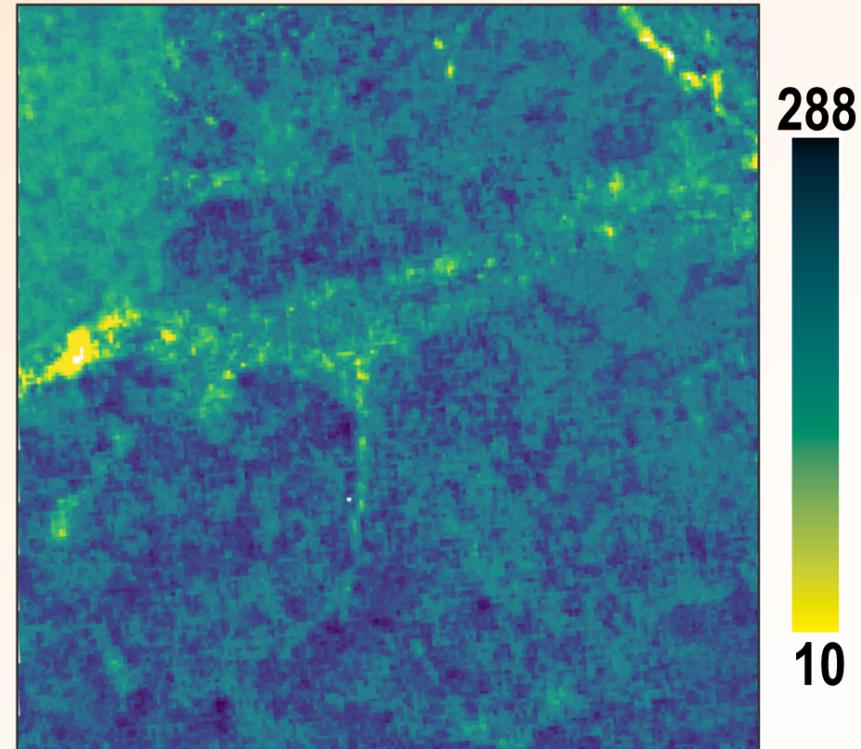
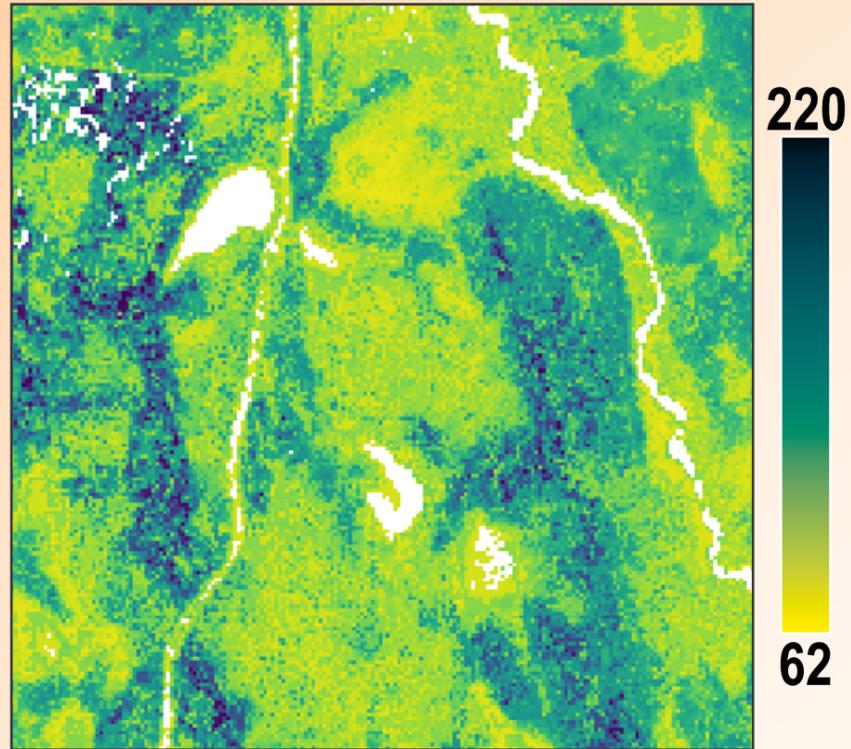
AVG – комбинированная модель (ERT+CB+SVM+MLP)

## Кивачский ТП

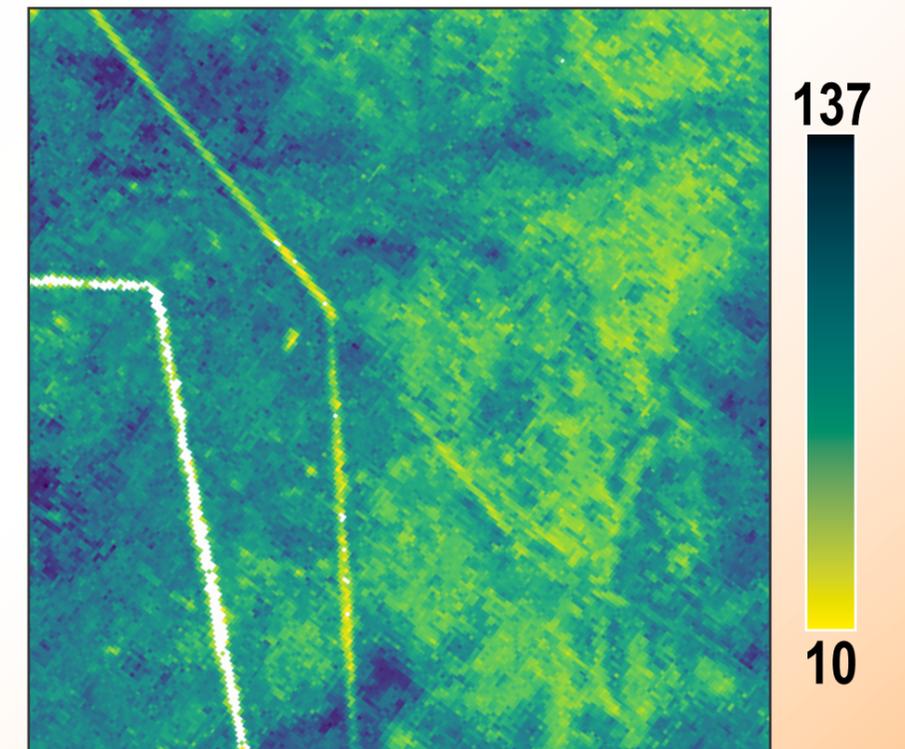
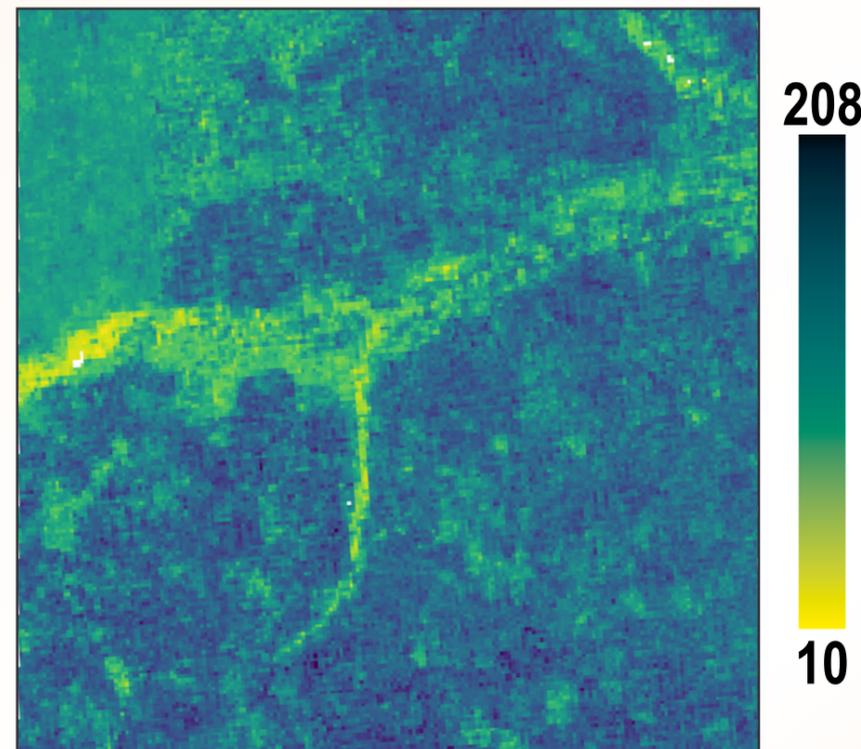
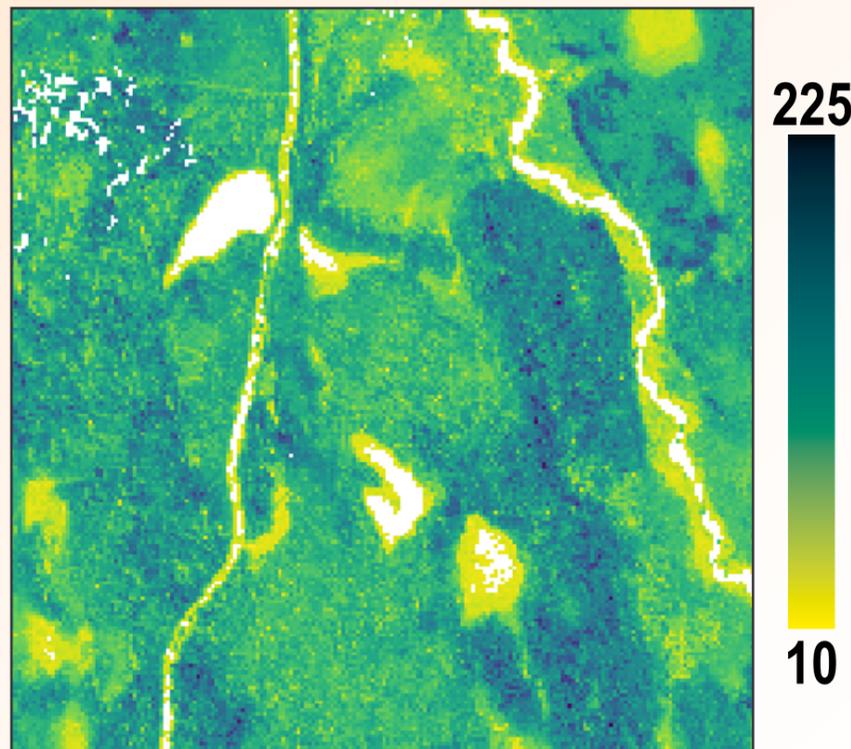
## Шарангский ТП

## Ляльский ТП

ППП



РПП

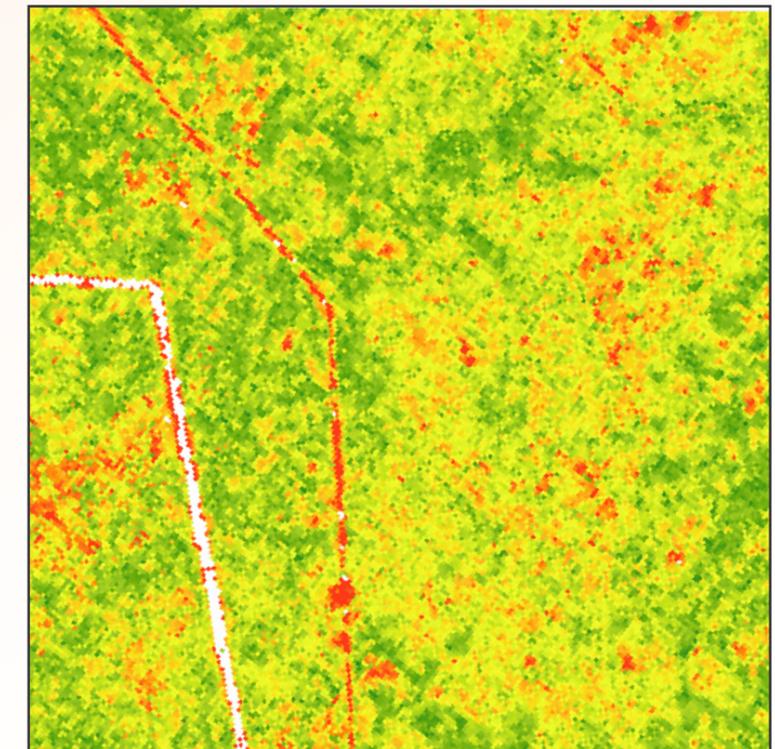
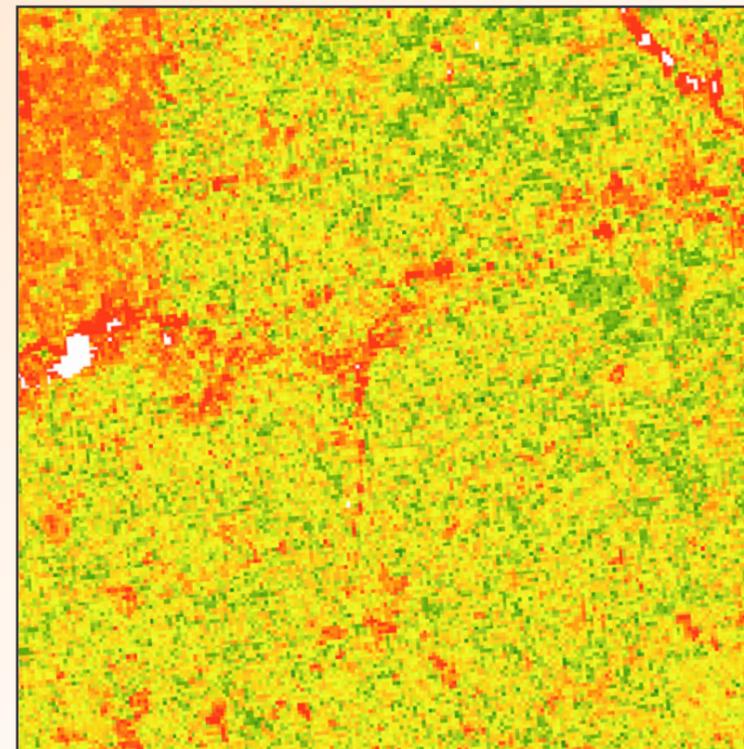
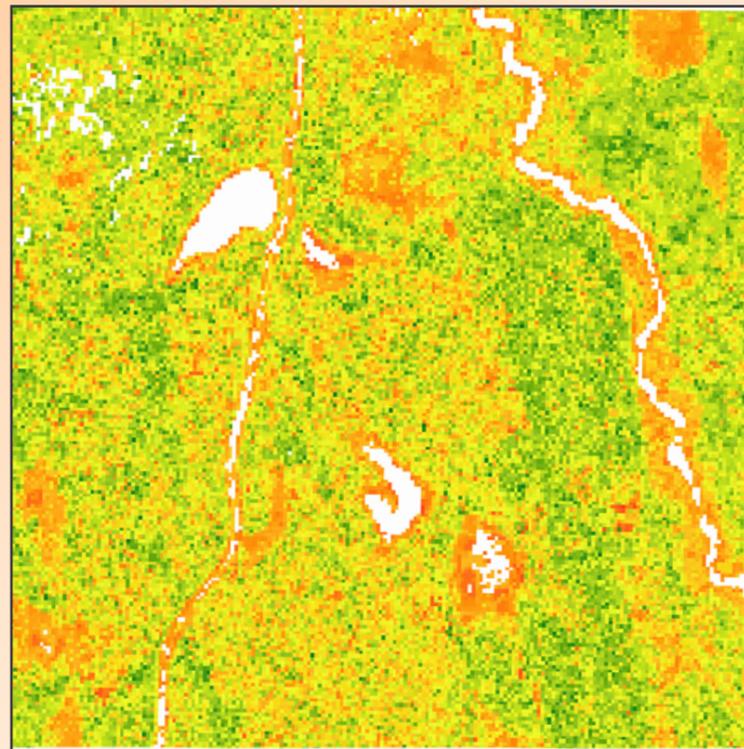


## Кивачский ТП

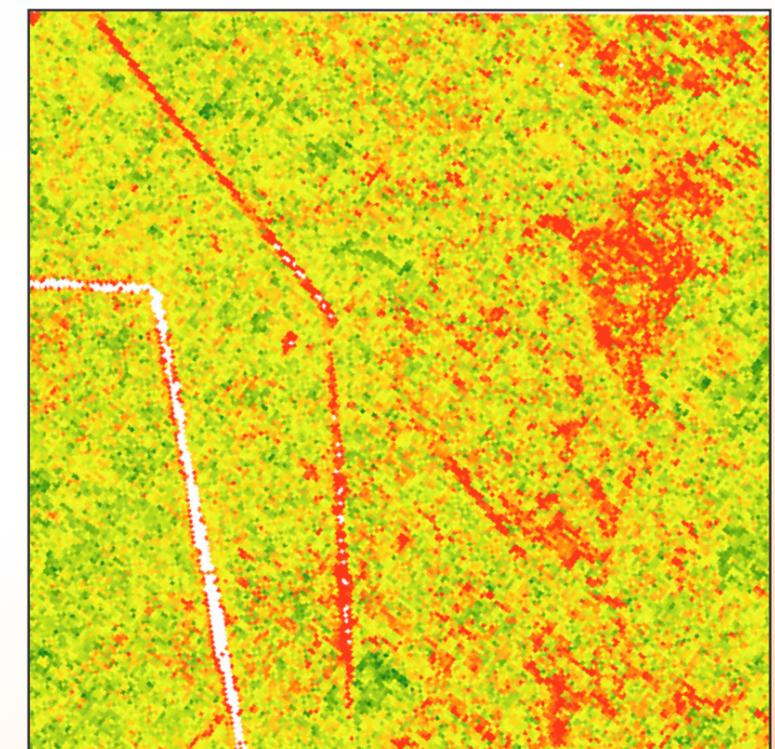
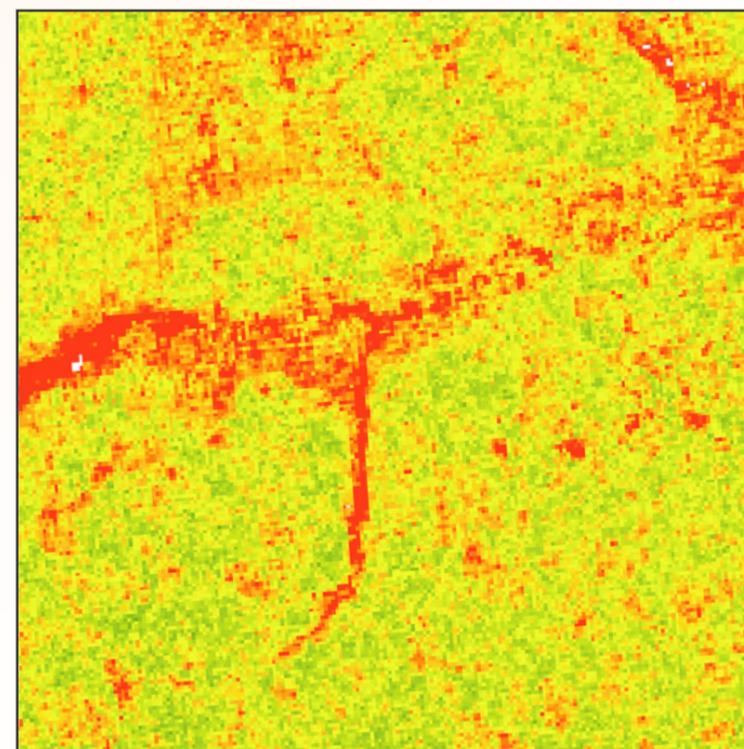
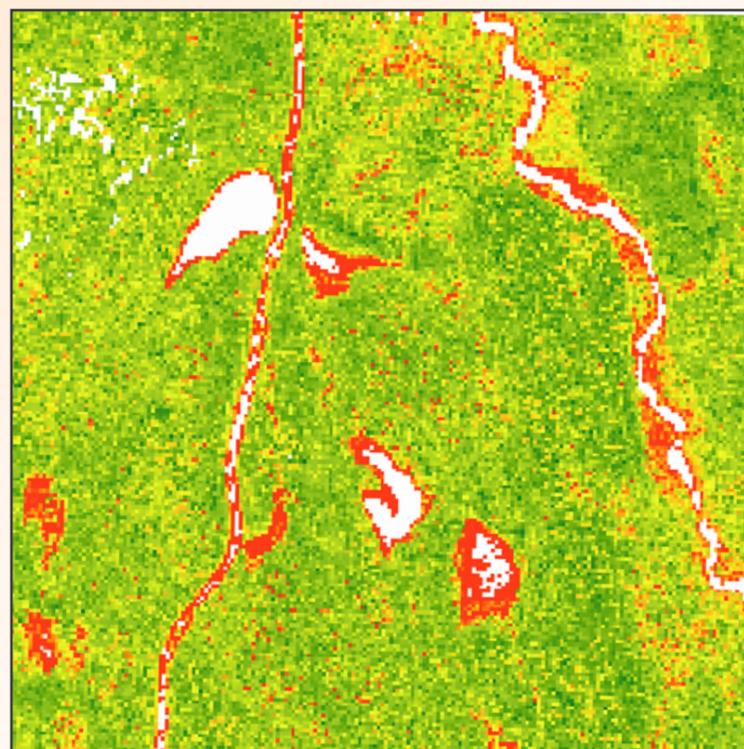
## Шарангский ТП

## Ляльский ТП

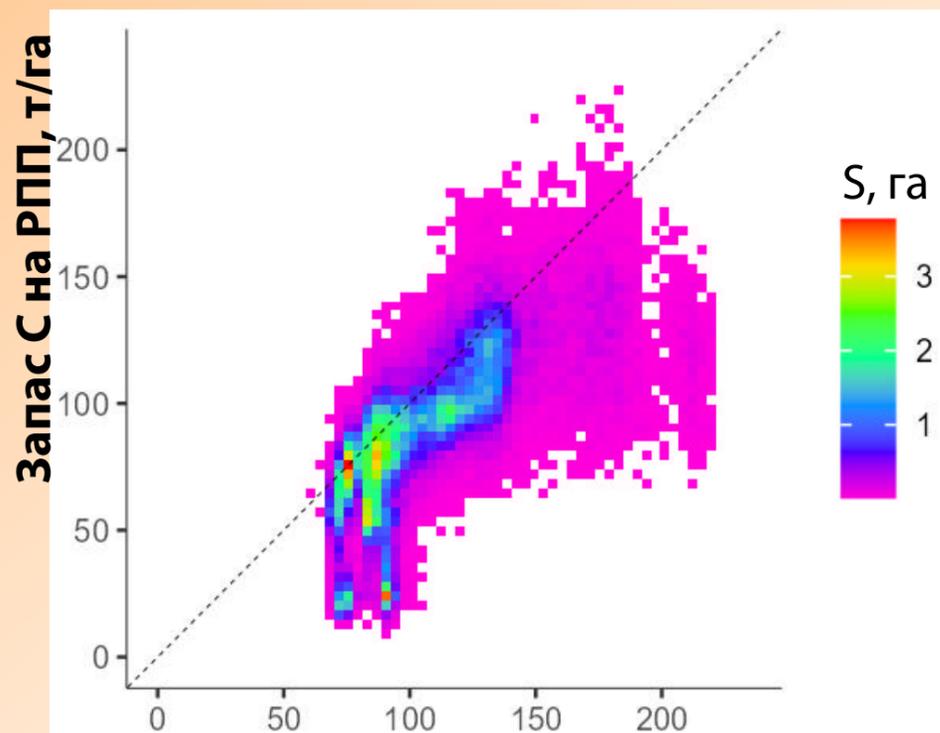
ППП



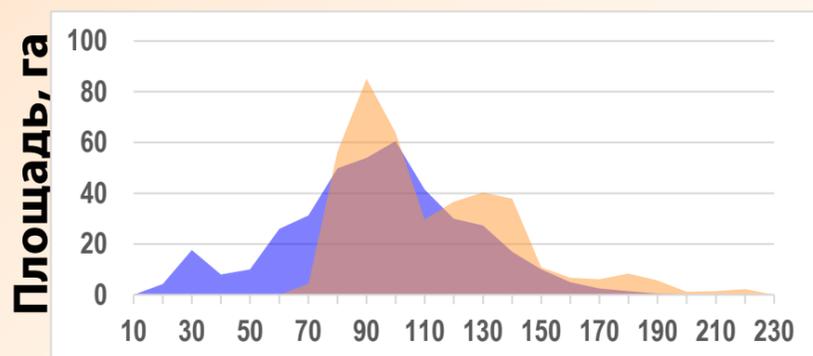
РПП



## Кивачский ТП

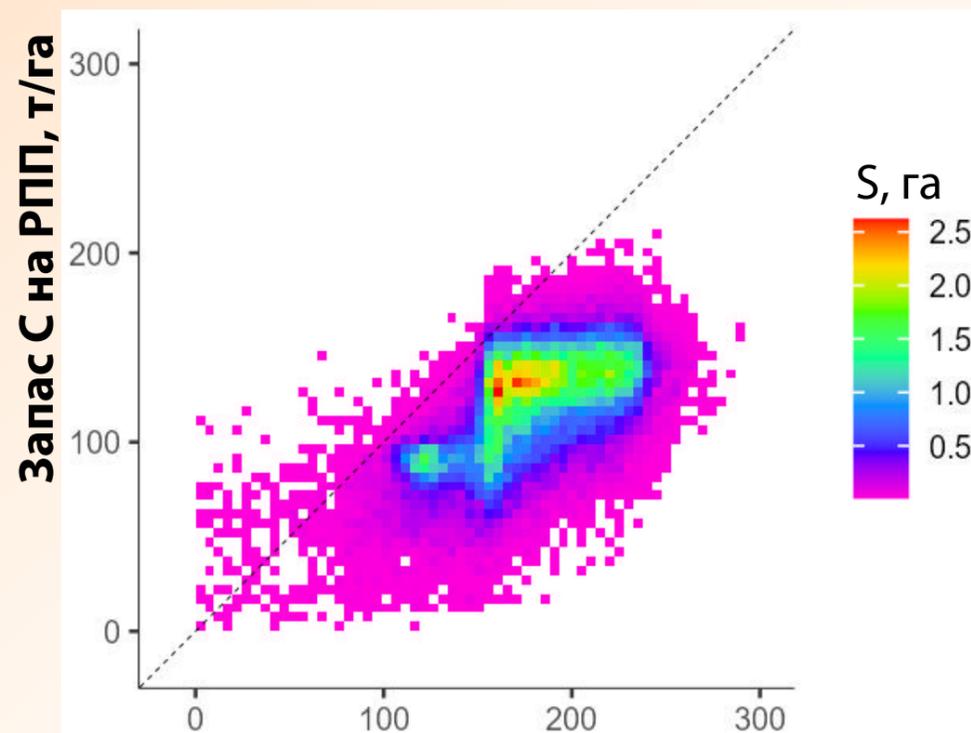


Запас С на ППП, т/га

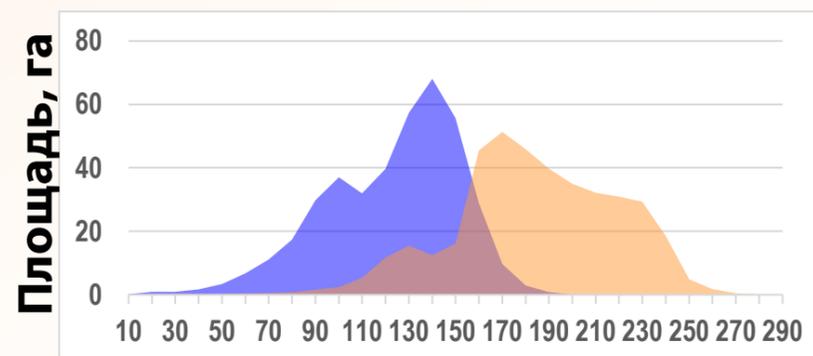


Запас С, т/га

## Шарангский ТП

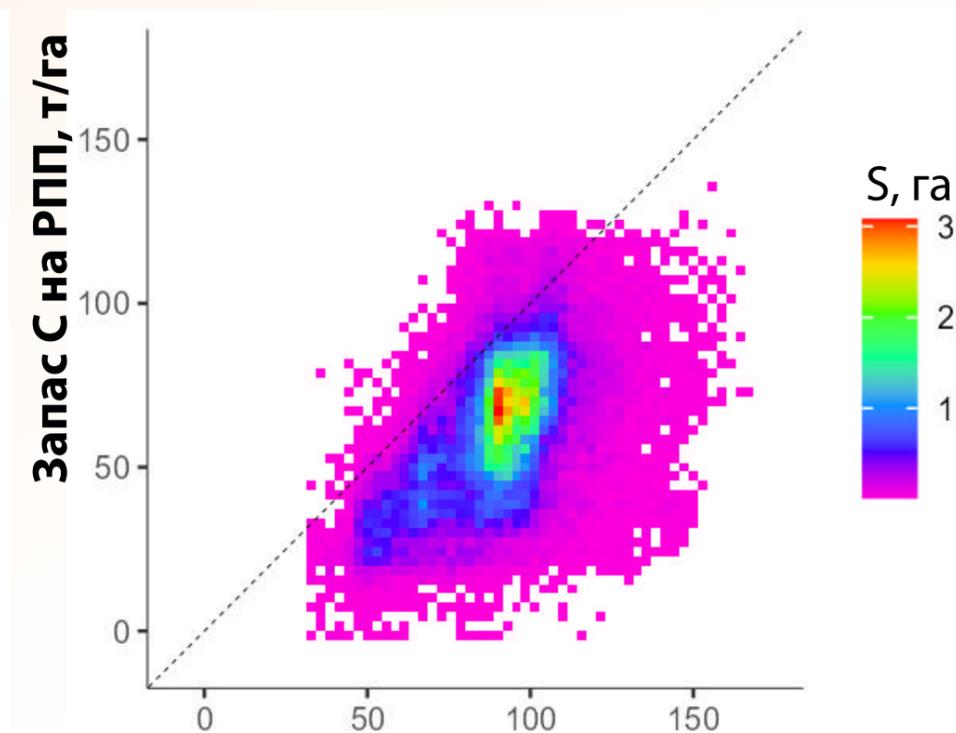


Запас С на ППП, т/га

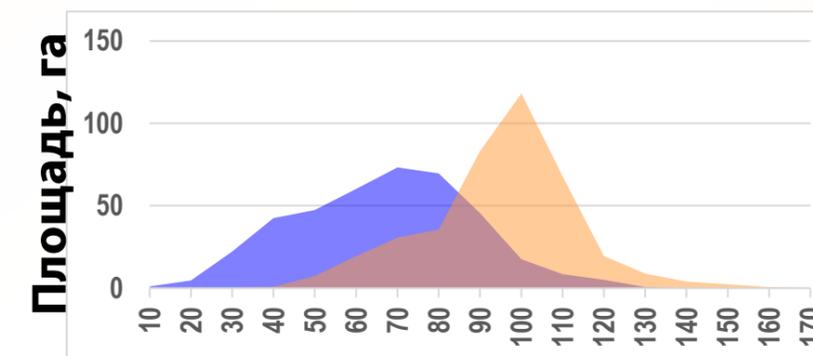


Запас С, т/га

## Ляльский ТП



Запас С на ППП, т/га



Запас С, т/га

Тип	Ср.	Ст.О	r	CAO	CKO
ППП	106.8	29.1	0.72	21.5	28.9
РПП	89.0	31.2			

Тип	Ср.	Ст.О	r	CAO	CKO
ППП	178.0	37.0	0.59	60.6	67.2
РПП	118.0	29.1			

Тип	Ср.	Ст.О	r	CAO	CKO
ППП	90.0	17.8	0.53	29.1	34.0
РПП	61.9	21.1			

**Ср.** – среднее значение запаса С по выборке (т/га), **Ст.О** – стандартное отклонение по выборке (т/га), **CAO** – среднее абсолютное отклонение между выборками (т/га), **CKO** – среднее квадратическое отклонение между выборками (т/га), **r** – коэффициент корреляции Пирсона.

Тестовый полигон	Данные для модели	Площадь ТП, га	Запас древесного углерода, т/га			Стандартная ошибка, т/га		Стандартная ошибка, %
			Ср.	Ст.О	Сумма	Ср.	Сумма	
Шарангский	РПП	405.7	118.0	29.1	47869.5	31.7	12849.6	26.8
	ППП		178.0	37.0	72212.7	19.7	8000.4	11.1
				<b>Разница, %:</b>		<b>+50.9</b>	<b>-</b>	<b>-37.7</b>
Кивач	РПП	396.9	89.0	31.2	35309.9	18.9	7519.5	21.3
	ППП		106.8	29.1	42394.6	10.4	4136.4	9.8
				<b>Разница, %:</b>		<b>+20.1</b>	<b>-</b>	<b>-45.0</b>
Ляльский	РПП	398.0	61.9	21.1	24621.0	12.9	5138.7	20.9
	ППП		90.0	17.8	35804.4	16.2	6451.7	18.0
				<b>Разница, %:</b>		<b>+45.4</b>	<b>-</b>	<b>+25.6</b>

» **Оценки запасов углерода в древесном пуле** лесных тестовых полигонов по измерениям на **РПП** и **ППП** заметно **разнятся** (различия до 1.5 раз) и относительно **слабо коррелируют** между собой ( $r \sim 0.4-0.5$ ). Для большинства совмещенных площадок оценки на **ППП** численно выше аналогичных значений на **РПП**, но встречаются и обратные ситуации. **Степень выраженности этих различий** меняется от полигона к полигону – наименьшая на Кивачском ТП, наибольшая на Шарангском ТП.

**Повидимому, это зависит от «сложности» обследуемых древостоев.**

» Соответствующие **результаты геопространственного моделирования** запасов углерода в древесном пуле с использованием данных ДЗЗ, в целом, **сохраняют различия, свойственные исходным обучающим данным.**

**Это означает, что результаты, полученные на основе разных типов пробных площадей, не могут использоваться совместно.**

» При этом, на основе **обоих типов данных** можно получить **статистически значимые модели** с сопоставимыми значениями формальных показателей эффективности.

**То есть, без прямого сравнения (или привлечения независимых референсных данных) крайне сложно определить степень достоверности получаемых результатов моделирования.**

» **Модели на основе данных с ППП** имеют формально **более высокие показатели эффективности** относительно моделей на основе **РПП**, однако имеют очевидные недостатки, связанные с малым объемом обучающей выборки, в частности, неполный диапазон предсказываемых значений.

**Количество РПП не компенсирует неточность используемых на них методов наземных измерений, а малого количества более точных оценок с ППП не достаточно для построения надежной модели.**



***СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!***

***Гаврилюк Е.А.***

**Центр по проблемам экологии и  
продуктивности лесов РАН  
г. Москва, Россия**

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

**Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).**