

**Разработка карты высот лесного покрова России  
на основе совместного использования продуктов обработки  
оптических и лидарных спутниковых данных ДЗЗ.**

*Жарко В.О.<sup>1,2</sup>, Барталев С.А.<sup>1, 2</sup>, Богодухов М.А.<sup>1, 2</sup>*

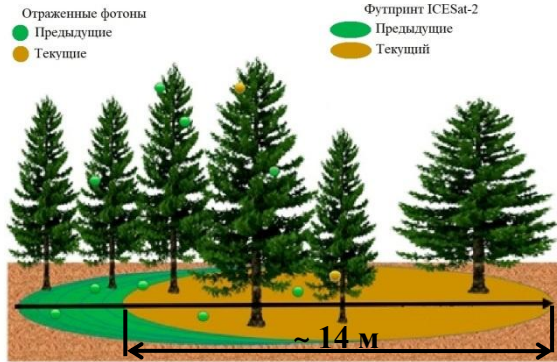
<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН

<sup>2</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН

# Цель исследования

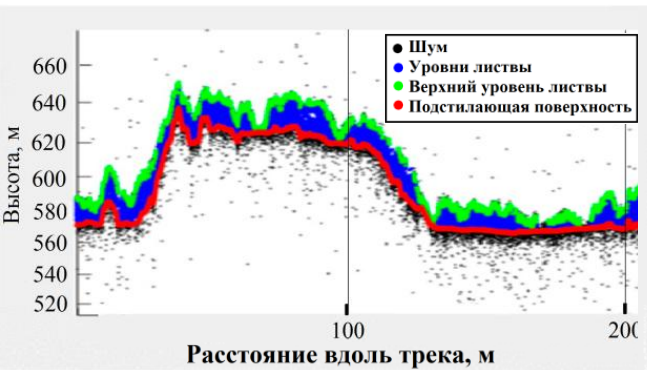
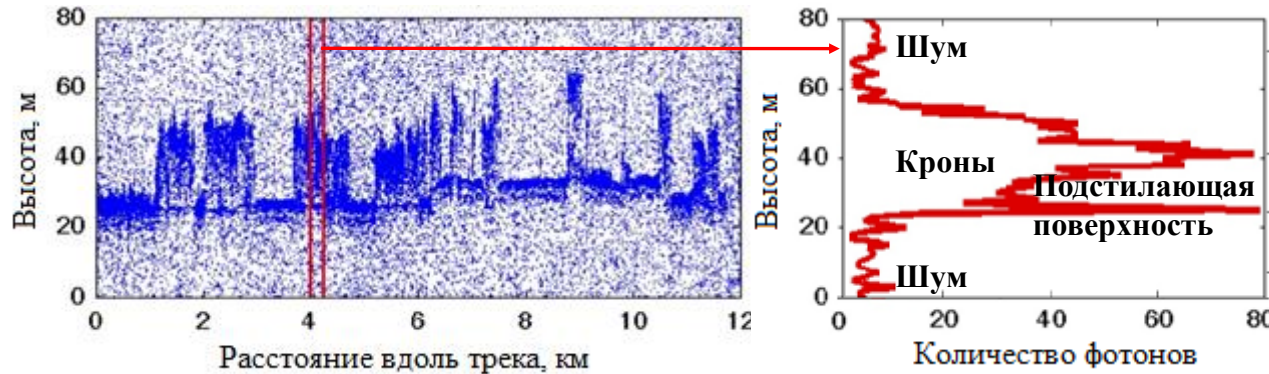
- В последние годы все более доступны становятся спутниковые лидарные данные, в том числе обеспечивающие глобальное покрытие:  
В настоящее время: ATLAS/ICESat-2, GEDI/МКС;  
Ранее: GLAS/ICESat (2003-2010);
- Такие приборы позволяют проводить непосредственные измерения высоты объектов земной поверхности, включая получение информации о вертикальной структуре растительности, на больших территориях, но не обеспечивают непрерывного покрытия рассматриваемой территории;
- В настоящей работе исследуется возможность совместного использования продуктов обработки оптических данных MODIS и лидарных данных ICESat-2 для разработки карты высот лесов России.

# Спутниковые лидарные данные ATLAS ATLO8

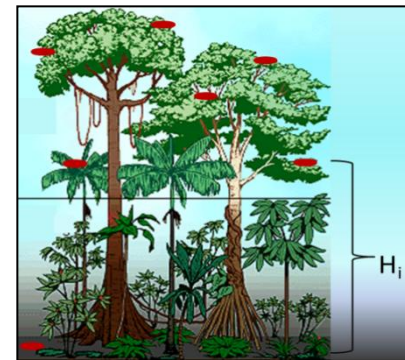


- ATLAS испускает лазерные импульсы с высокой частотой и детектирует отдельные отраженные фотоны (**Photon Counting Lidar** – лидар с подсчетом фотонов);
- Измерение времени полета фотона совместно с информацией о положении и ориентации прибора позволяет рассчитать координаты отражающего объекта земной поверхности, включая его высоту;
- Размер футпринта прибора составляет ~ 14 м, смещение футпринтов вдоль трека между двумя последовательными импульсами – около 70 см;

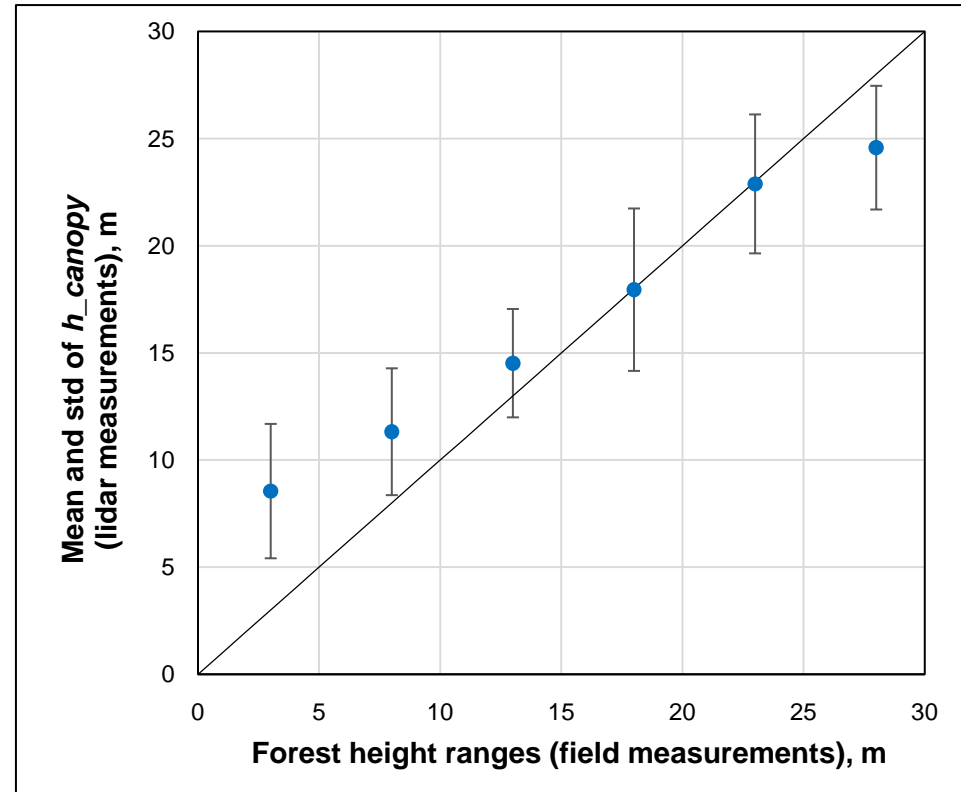
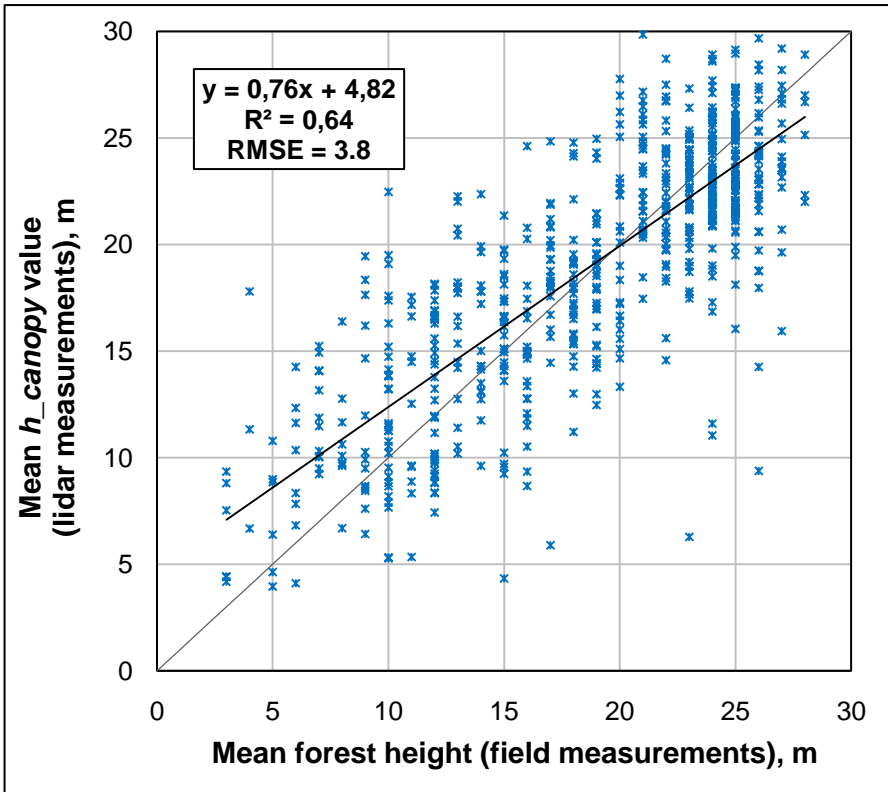
- Совокупность фотонов, детектируемых при выполнении измерений вдоль трека, формирует **облако точек** (координат отражающих объектов) для дальнейшего анализа распределения высот.



- Облако точек классифицируется на уровни листвы/крон растительности, подстилающую поверхность и шум;
- Непрерывный трек шириной ~ 14 м разбивается на сегменты по 100 м;
- Каждое измерение в наборе данных содержит статистику высот растительности относительно поверхности в пределах участков 100x14 м.



# Оценка точности данных ATL08



- Локальная оценка точности данных ICESat-2 ATL08 на уровне выделов;
- Выбран параметр  $h_{canopy}$  – 98 перцентиль высот растительности на измеряемом участке.

# Приведение к разрешению MODIS и оценка неопределенности

$h_i$  – измерения  $h\_canopy$  внутри пикселя MODIS

( $h_i < 1.6$  м и  $h_i > 50$  м отфильтровываются);

$u_i$  – неопределенность измерений  $h\_canopy$  (из ATL08);

$w_i = 1 - u_i/h_i$  – веса измерений  $h\_canopy$

(измерения с  $w_i < 0$  отфильтровываются);

$H = \sum w_i h_i / \sum w_i$  – средняя высота леса для пикселя MODIS;

$U = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  – неопределенность высоты для пикселя MODIS, где:

$\sigma_1 = \sqrt{\sum (w_i u_i)^2 / \sum w_i}$  – неопределенность исходных измерений;

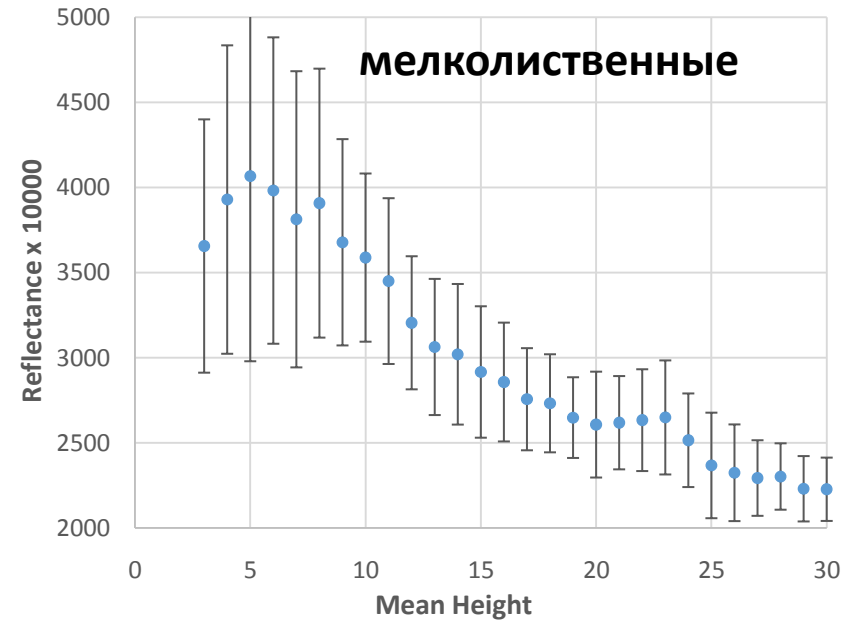
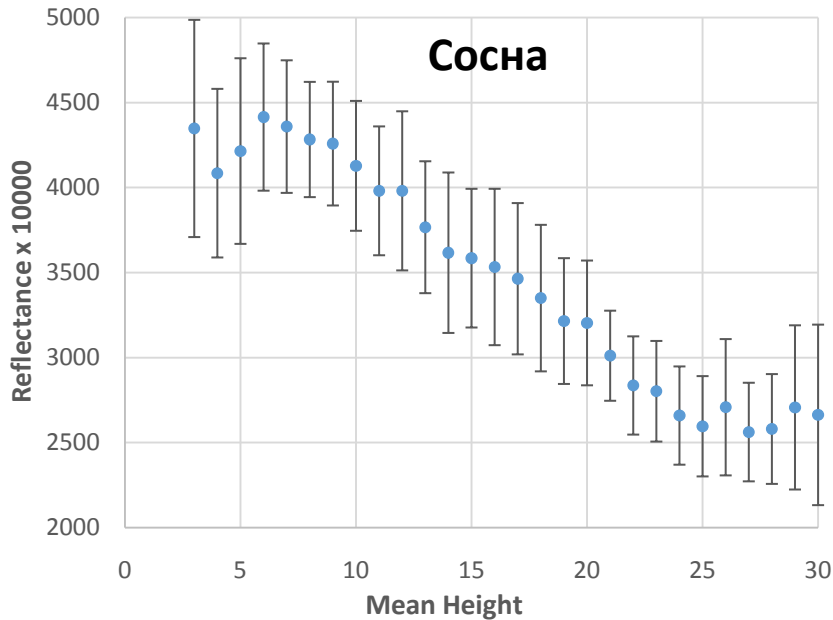
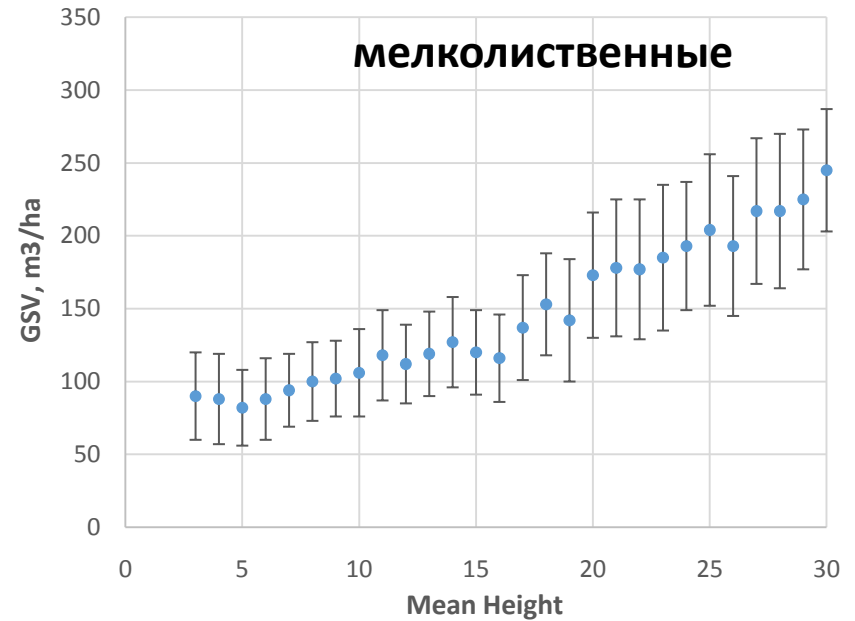
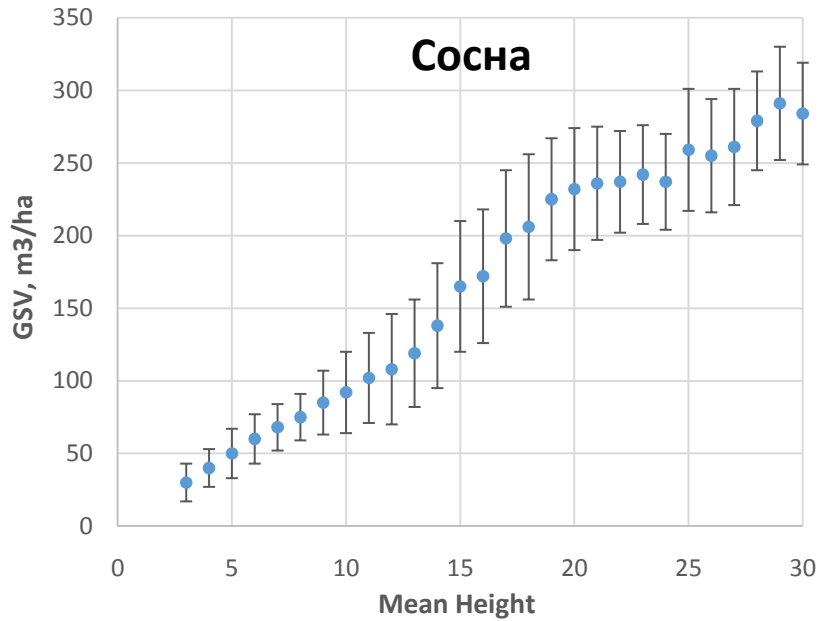
$\sigma_2 = \sqrt{(\sum w_i h_i^2 / \sum w_i - H^2) / n - 1}$  \* – неоднородность пикселя.

Было обработано более 125 млн лидарных измерений на территории России за период с октября 2018 по июль 2020; в результате был получен набор данных из более 30 млн пикселей MODIS с информацией о средней высоте леса, который использовался в качестве обучающей выборки (после дополнительной фильтрации).

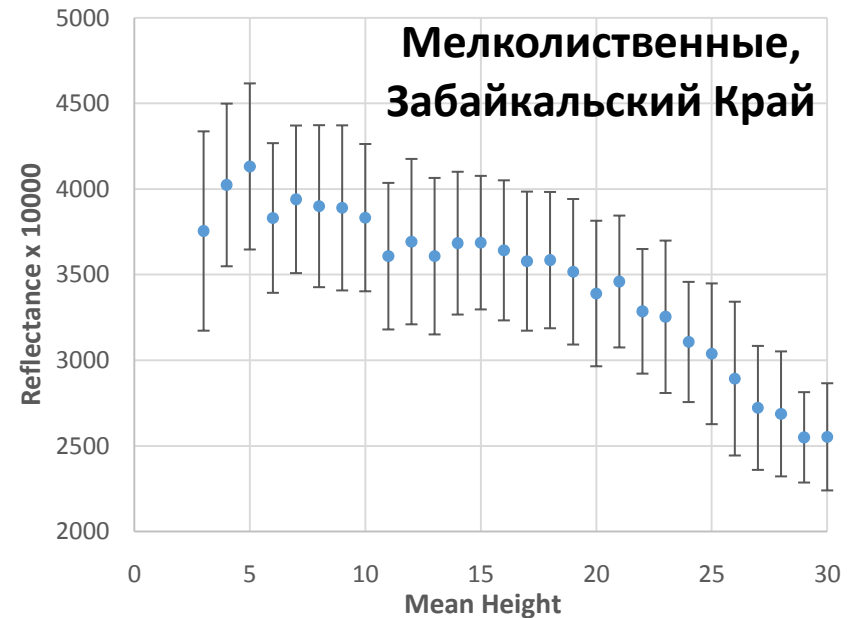
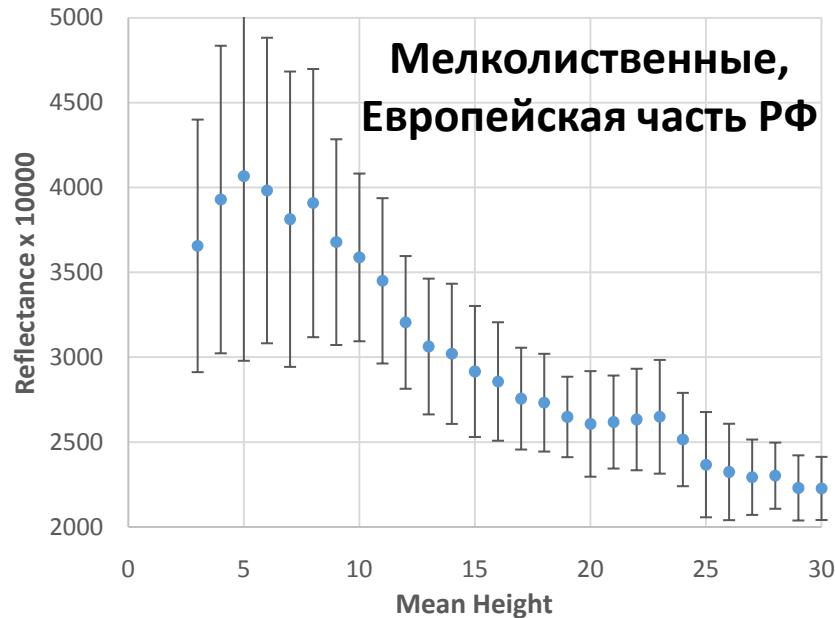
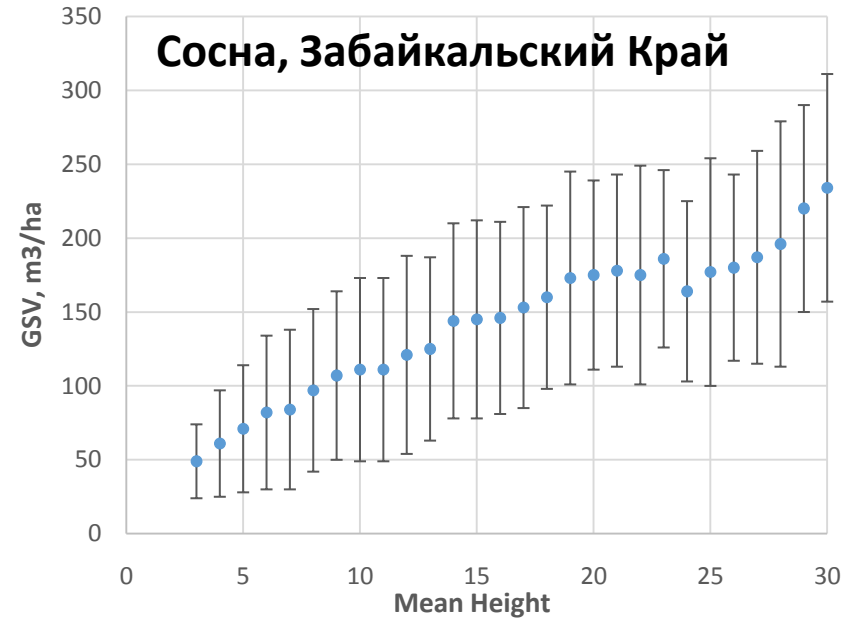
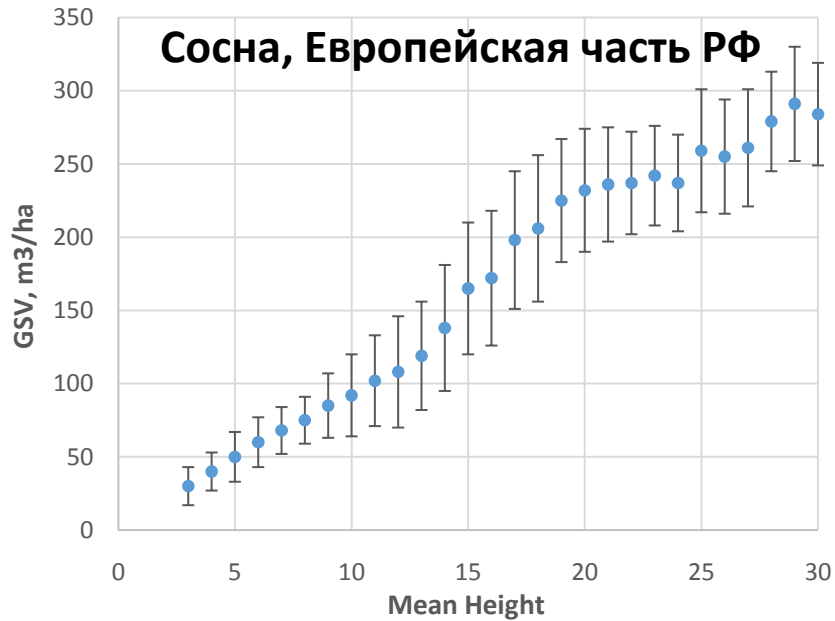
\*[http://seismo.berkeley.edu/~kirchner/Toolkits/Toolkit\\_12.pdf](http://seismo.berkeley.edu/~kirchner/Toolkits/Toolkit_12.pdf)



# Зависимость высота-запас/КСЯ (разные типы леса)

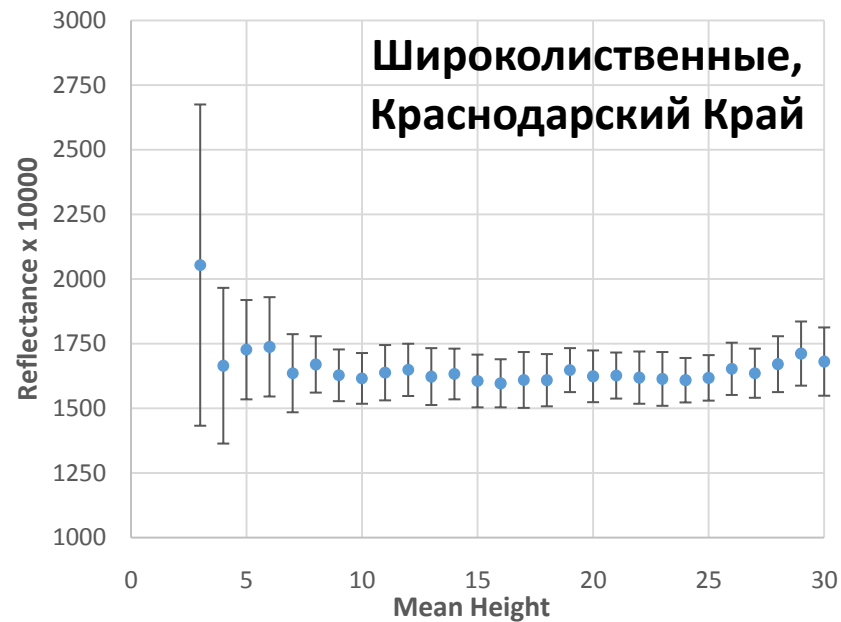
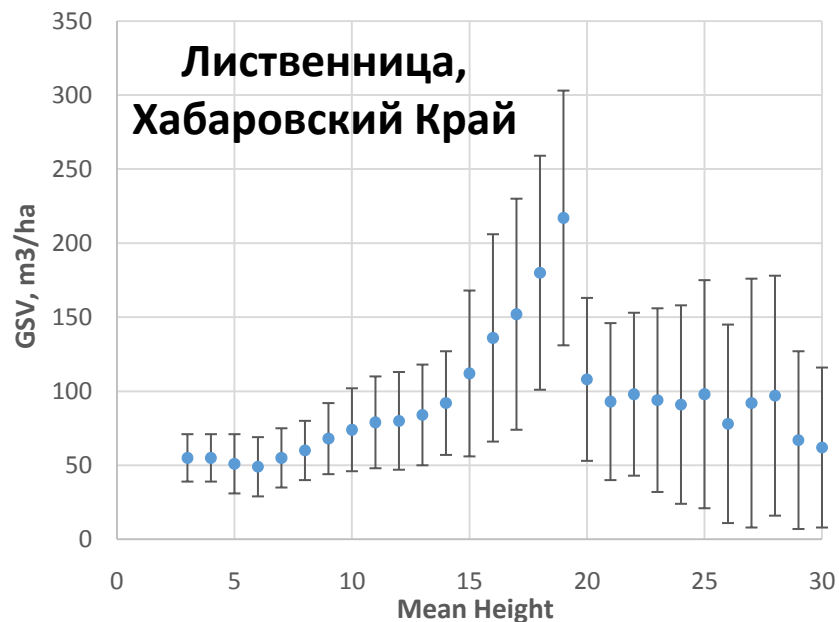


# Зависимость высота-запас/КСЯ (разные территории)





# Зависимость высота-запас/КСЯ (проблемные участки)



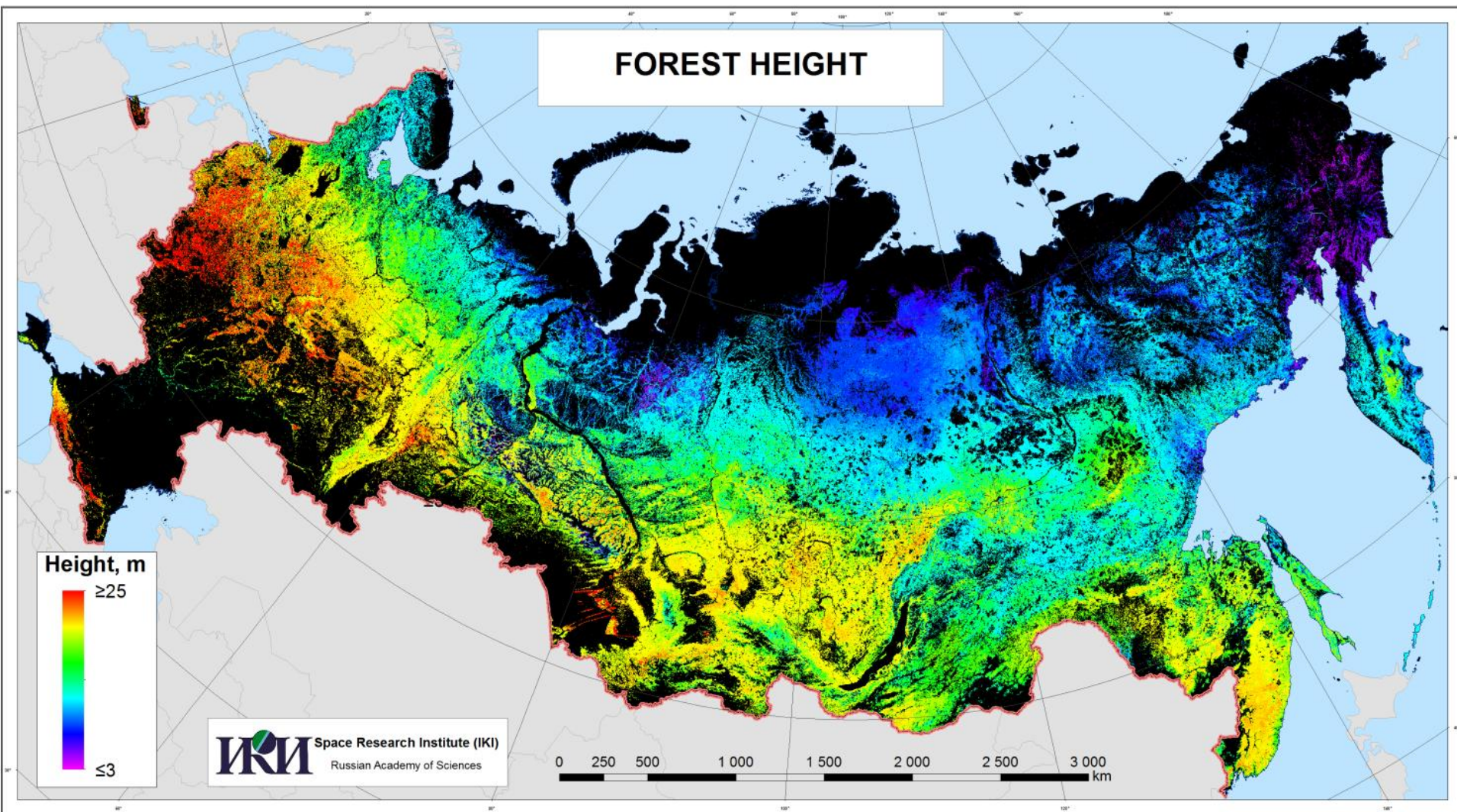
- Отсутствие обучающих данных для некоторых диапазонов высот для определенных комбинаций тип леса + территория (менее критично при локализованном моделировании – такие леса не присутствуют на данной территории);
- Отсутствие зависимости; может быть связано с изменениями признаков вследствие вариаций лесистости/сомкнутости при постоянной высоте – необходимо учитывать горизонтальную структуру лесов.

# Моделирование средней высоты лесов

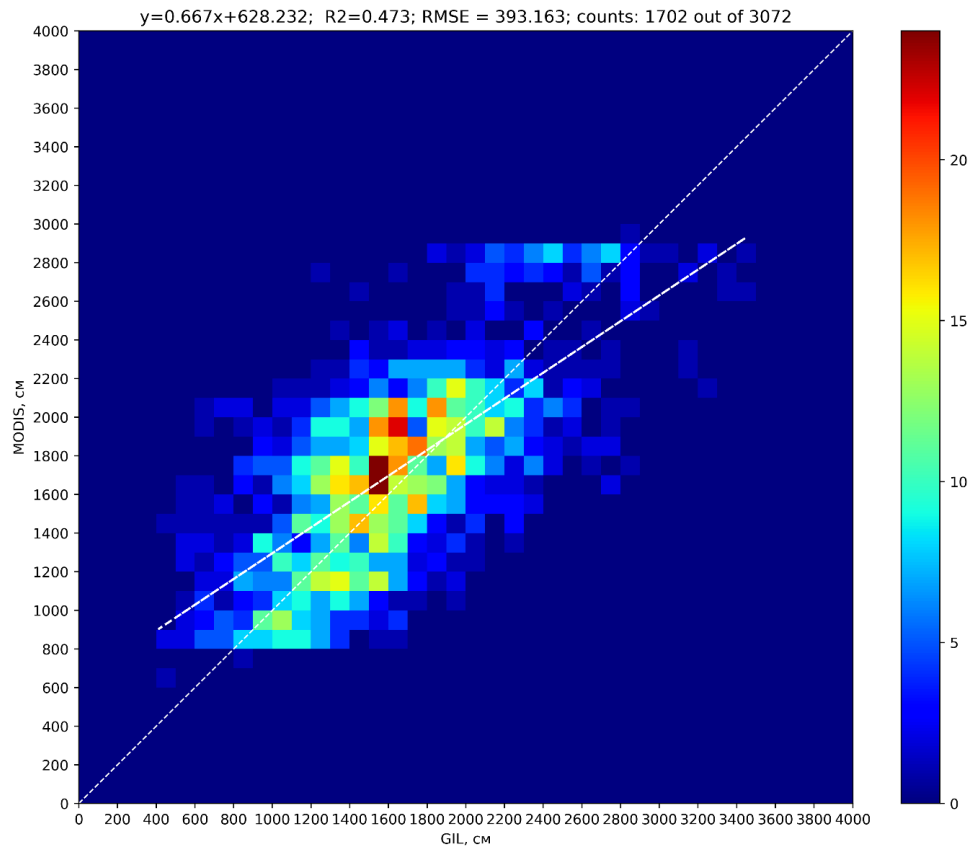
- Регрессионное моделирование на основе случайных лесов с использованием локально-адаптивного подхода LAGMA\*:  
Территория исследования покрывается регулярной сеткой, для каждого узла которой настройка и применение модели выполняются независимо на основе поднабора обучающих данных, локализованного вблизи указанного узла сетки; это обеспечивает возможность однородной автоматической обработки данных ДЗЗ на больших территориях с учетом пространственной внутриклассовой изменчивости спектрально-отражательных характеристик без необходимости предварительной стратификации;
- Обучающие данные – на основе ATLAS ATL08;
- Признаки:
  - КСЯ покрытых снегом лесов в красном и ближнем ИК каналах;
  - Типы земного покрова/преобладающие породы;
  - Подпиксельная структура лесного покрова.

\* Bartalev et al. A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5, Iss. 1, pp. 55-64.

# Экспериментальная карта высот по состоянию на 2019 год с пространственным разрешением 250 м



# Предварительная оценка точности



Сравнение с данными пробных площадей  
( $R^2 = 0.47$ ,  $RMSE = 3.9$  m)

# Дальнейшие исследования

- Детальная валидация;
- Добавление новых информативных признаков: ЦМР, оптические данные в течение вегетационного сезона, радарные данные;
- Исследование возможностей формирования временной серии карт высот для изучения динамики лесов.

**Спасибо за внимание!**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-77-30015). Обработка и анализ данных выполнялись с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С.151-170) , развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 01.20.0.2.00164).