

Двадцатая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Возможности оценки высоты и продуктивности лесов по спутниковым лидарным данным

Жарко В.О., Богодухов М.А.

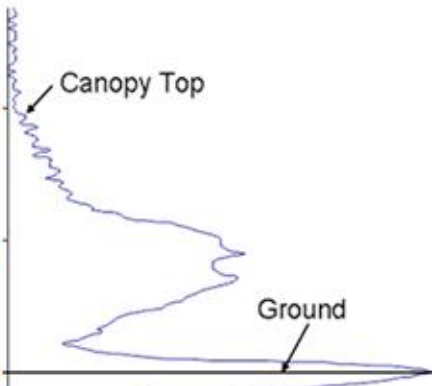
Институт космических исследований РАН

Москва, ИКИ РАН, 18 ноября 2022

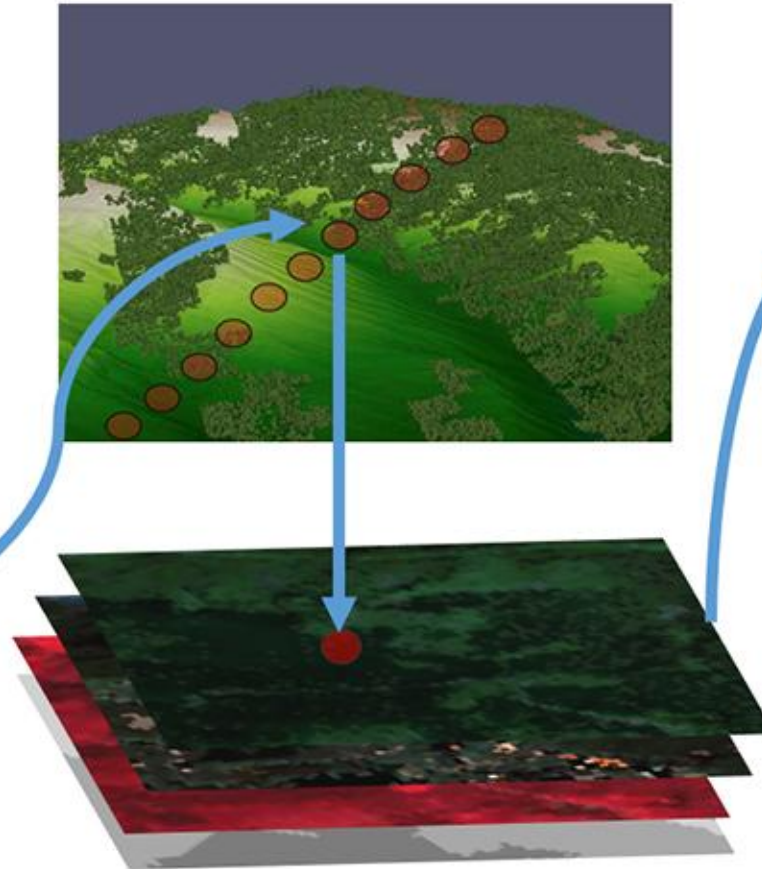
Lidar – Light Detection and Ranging

(«обнаружение и определение дальности с помощью света»)

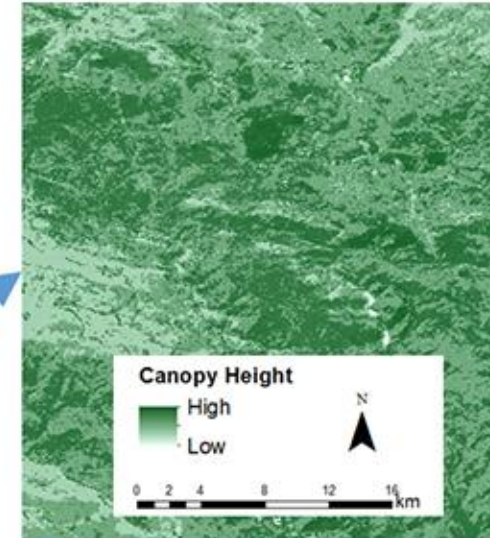
Local measurement and validation



Landscape-scale data acquisition and integration



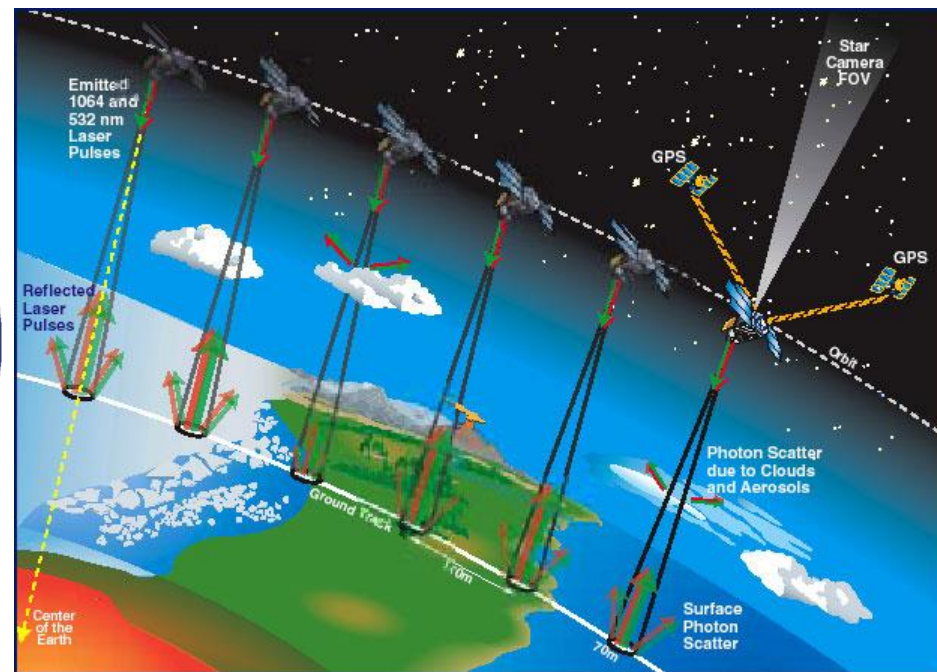
Model building and map production



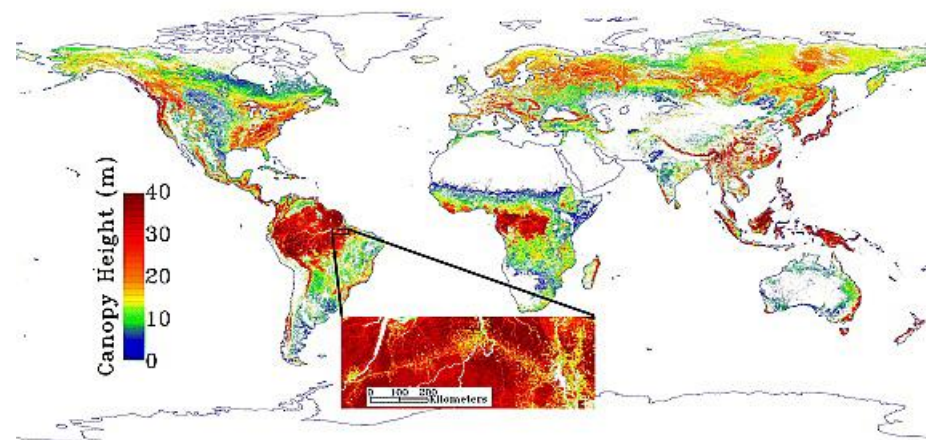
Assessment, monitoring and decision making



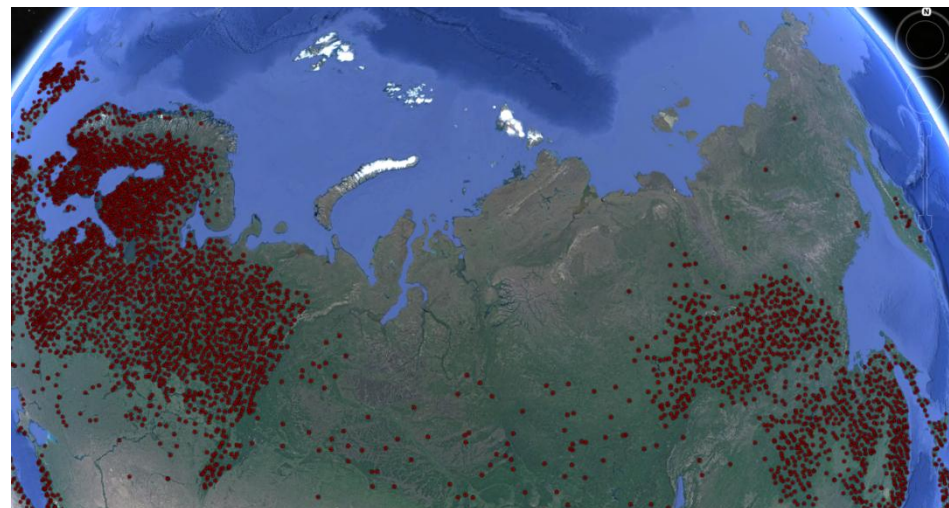
ICESat GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) (2003-2010)



ICESat GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) (2003-2010)



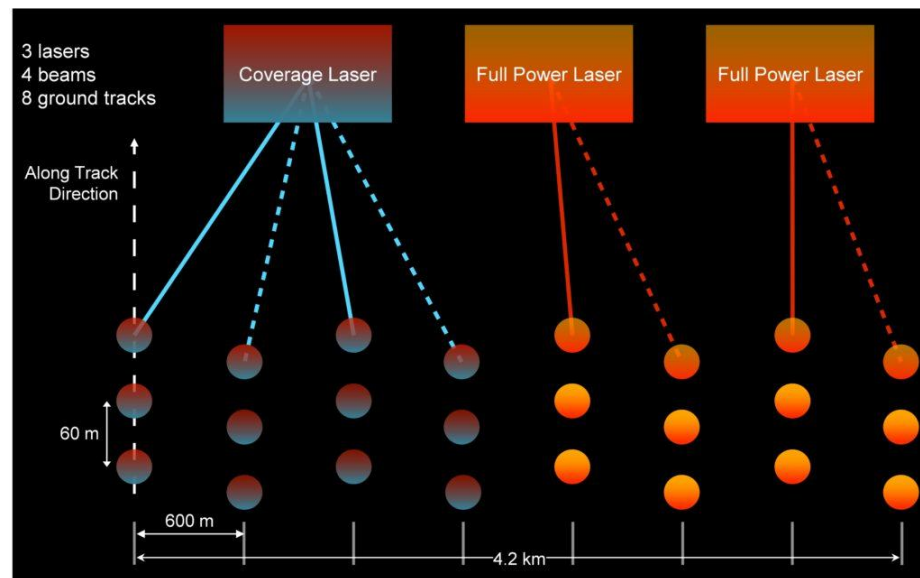
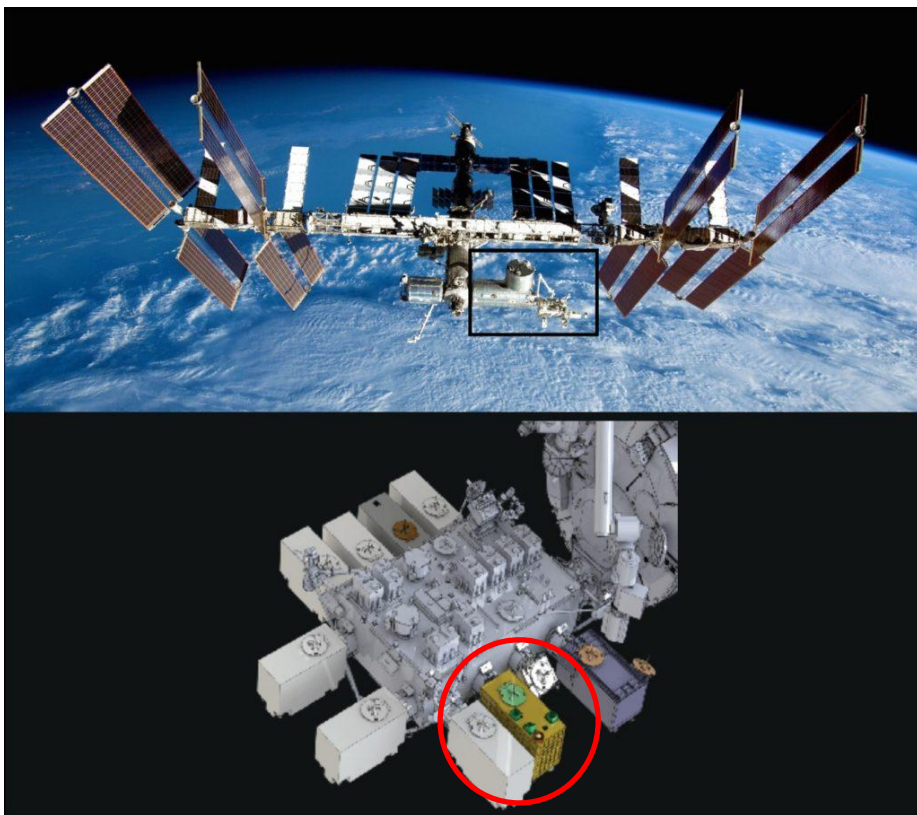
Simard et al., 2011 (разрешение 1 км)



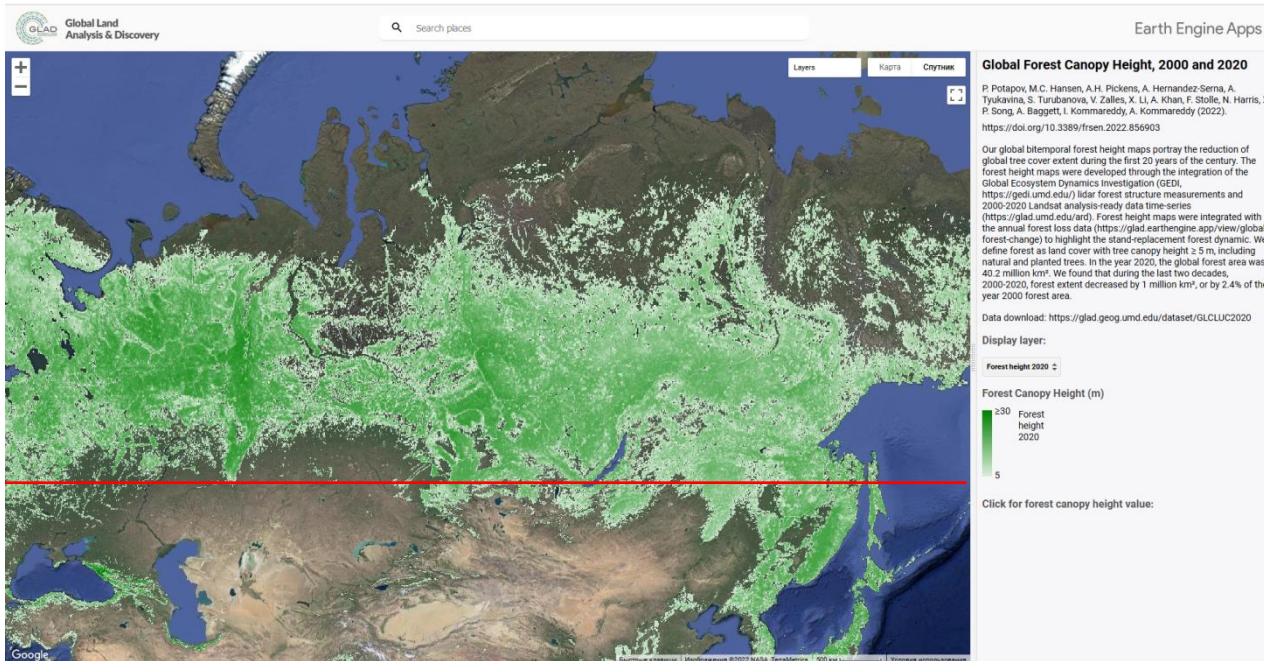
Healey et al., 2015
(~2600 измерений по России)

Lefsky, 2010 (разрешение 500 м); Los et al., 2012 (разрешение 0,5°)

MKC GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) (2019-2023?)

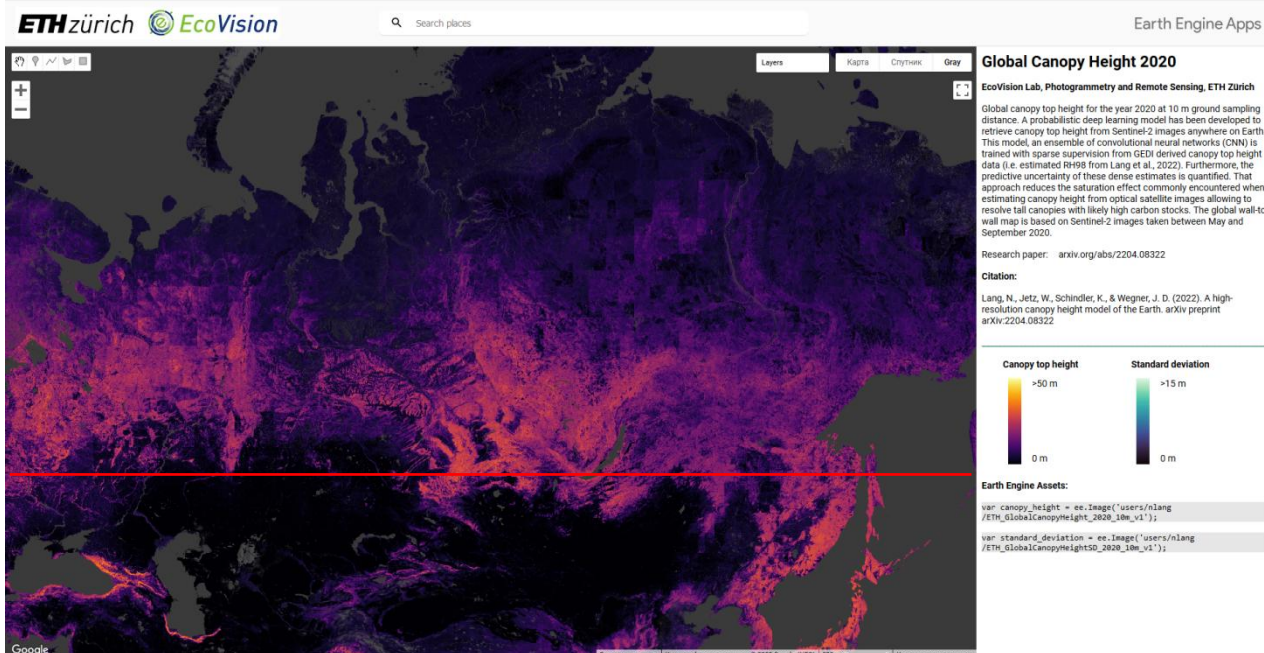


MKC GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation) (2019-2023?)



Potapov et al., 2021
(разрешение 30 м)

<https://glad.earthengine.app/view/forest-height-2000-2020>

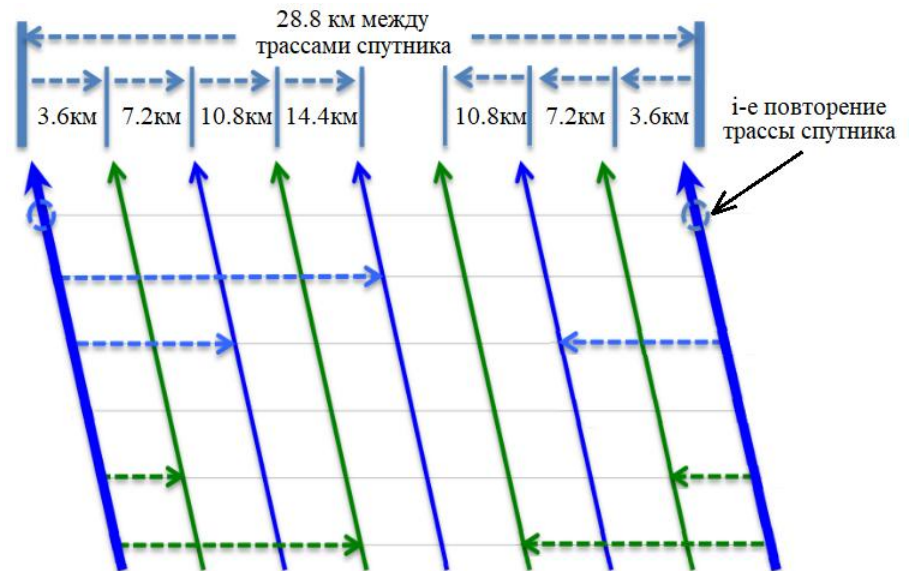
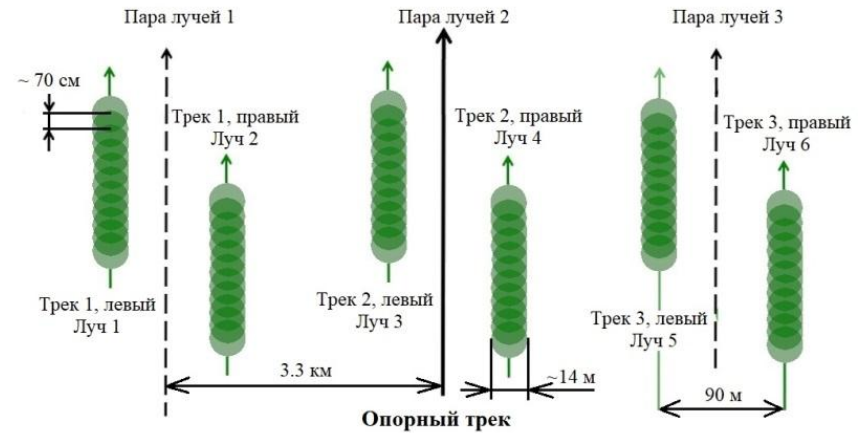


Lang et al., 2022

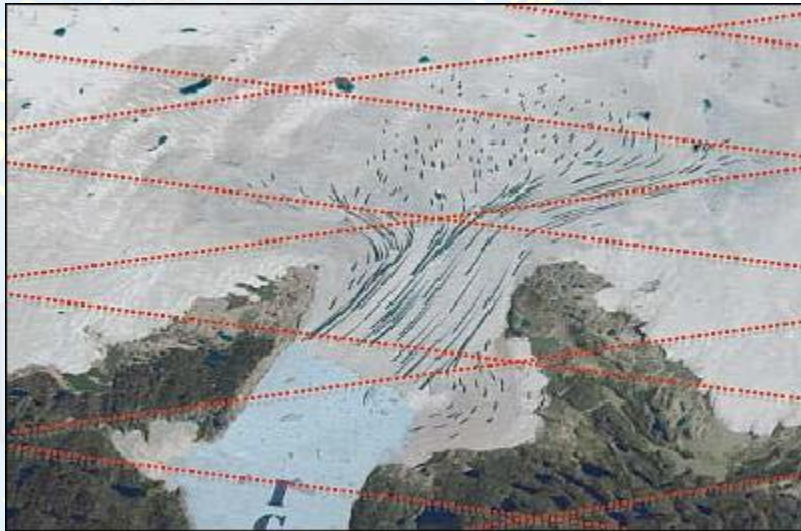
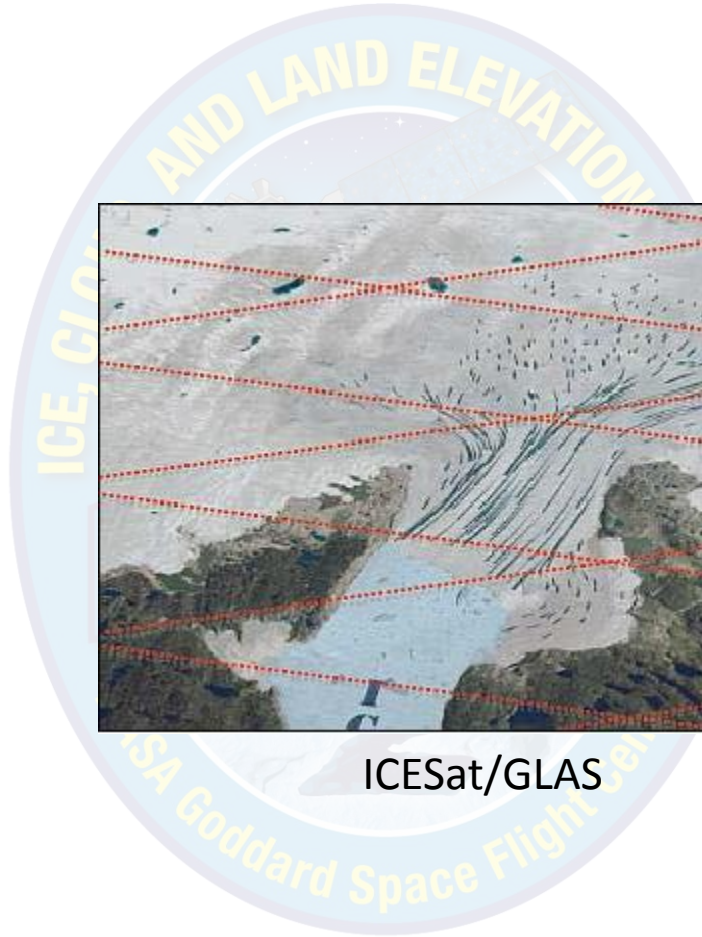
(разрешение 10 м)

<https://nlang.users.earthengine.app/view/global-canopy-height-2020>

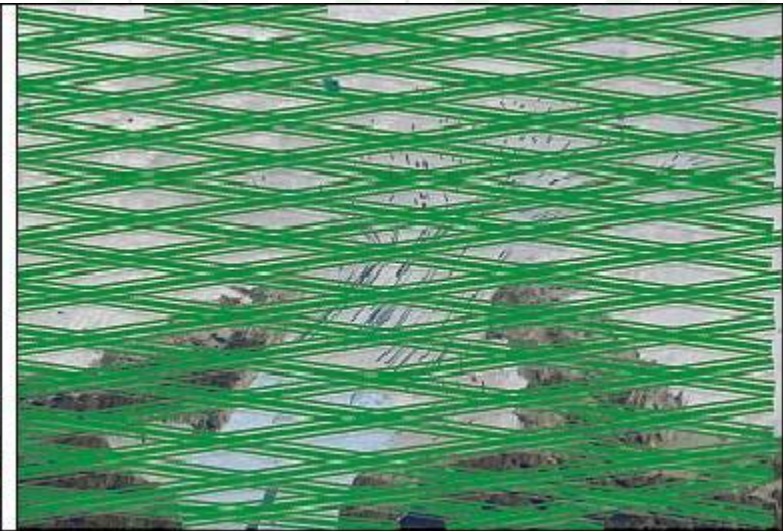
ICESat-2 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) (2018-2024?)



ICESat-2 ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System) (2018-2024?)



ICESat/GLAS



горение спутника

ICESat-2/ATLAS



Принцип работы прибора ATLAS

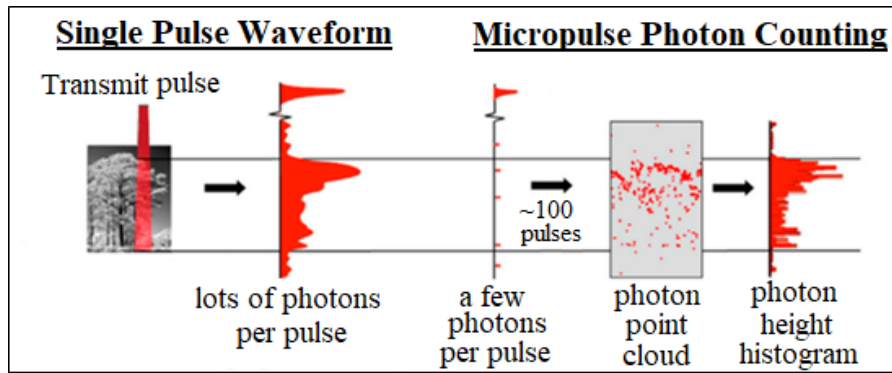
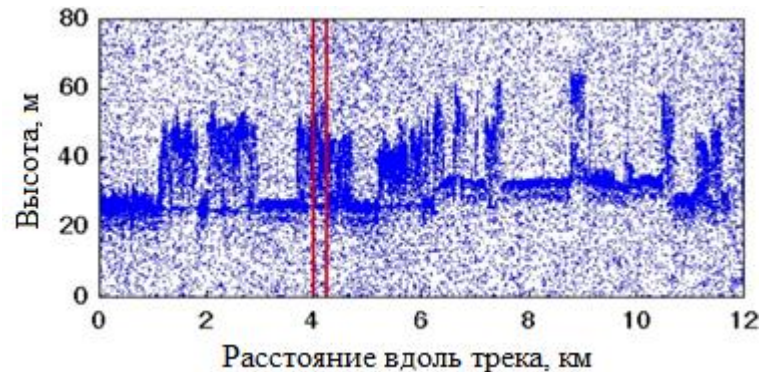


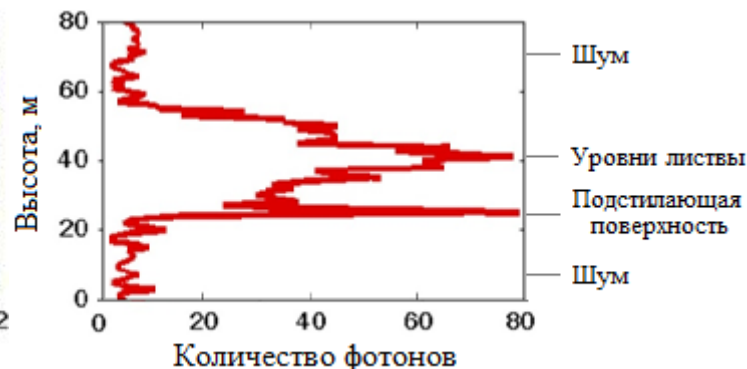
Иллюстрация принципа работы классических лидарных систем и лидаров с подсчетом фотонов (Photon Counting Lidar)

- 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;
- Совокупность фотонов, детектируемых при выполнении измерений вдоль трека, формирует **облако точек** для дальнейшего анализа.

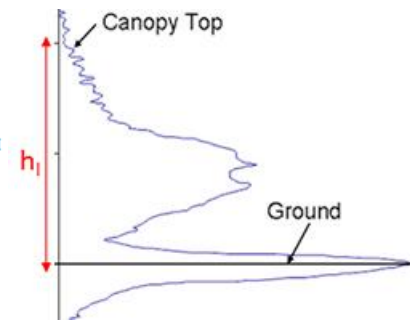
Neuenschwander, Magruder, 2016



Пример формируемого облака точек на покрытую растительностью территорию



Гистограмма распределения высот на обозначенном участке вдоль трека



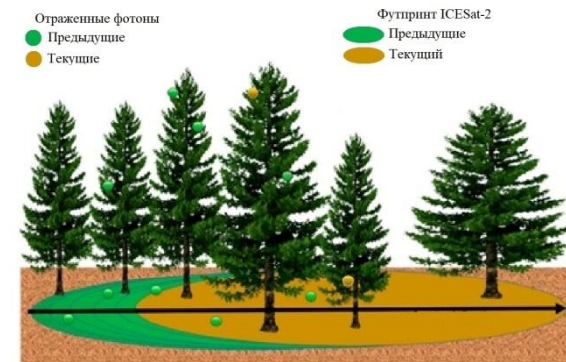
Отраженный сигнал от времени для классического лидара

Markus et al., 2017

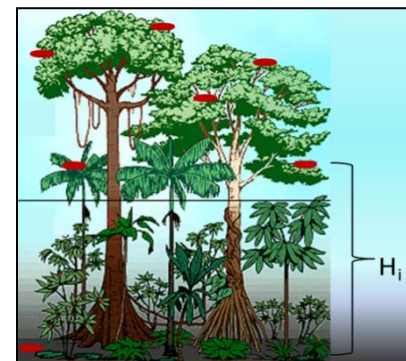
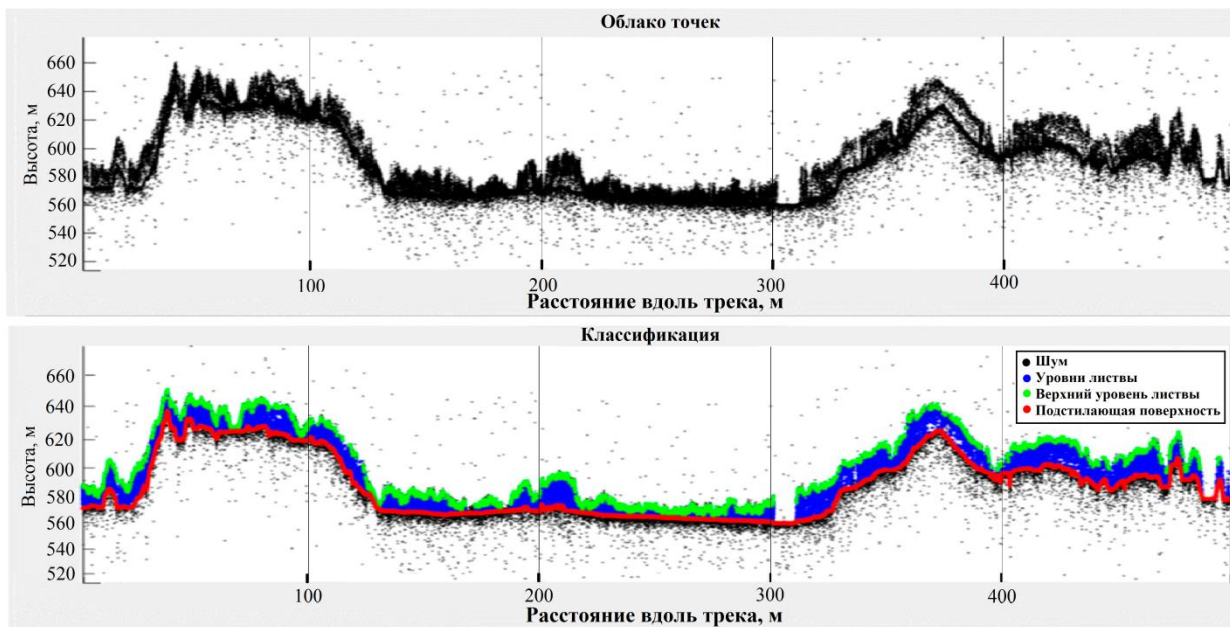
<https://gedi.umd.edu>

Стандартный продукт данных ATLAS ATLO8

- Облако точек разделяется на следующие классы: подстилающая поверхность, листва/кроны (сапору), верхний полог листвы/крон (top-of-sapору) и шум;
- Непрерывный трек шириной ~ 14 м разбивается на сегменты по 100 м;
- Высота отразивших фотоны элементов растительности (кроны/листва) оценивается относительно пространственно-интерполированных точек, отнесенных к классу подстилающей поверхности;
- каждое измерение (элемент) набора данных ATLO8 соответствует участку земной поверхности 100x14 м вдоль трека (далее сегмент) и содержит параметры, характеризующие распределение относительных высот растительности на данном участке.



Получаемое облако точек формируется фотонами, отраженными от участка земной поверхности, вдоль трека шириной ~14 м



Определение относительной высоты растительности H_i от подстилающей поверхности

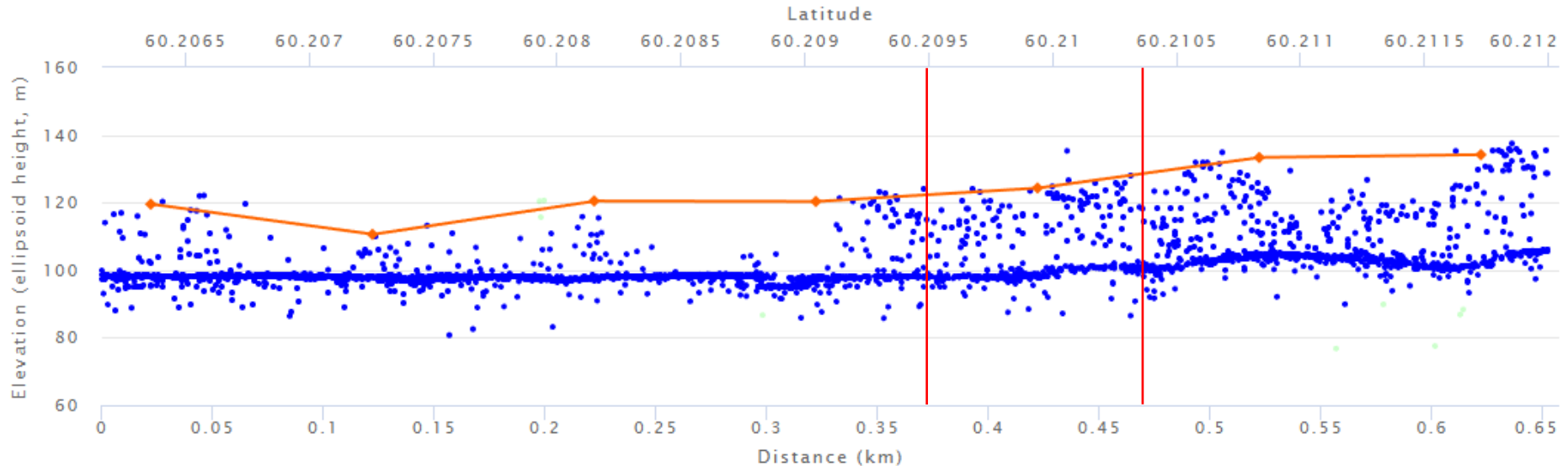
Классификация облака точек на верхний уровень листвы (зеленый), уровни листвы (синий), подстилающую поверхность (красный) и шум (черный)

Стандартный продукт данных ATLAS ATLO8

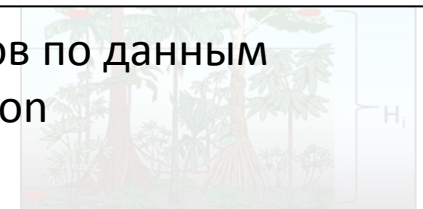
- Облако точек разделяется на следующие классы: подстилающая поверхность, листва/кроны (сапору), верхний полог листвы/крон (top-of-canopy) и шум;
- Непрерывный трек шириной ~ 14 м разбивается на сегменты по 100 м;

Отраженные фотоны Предыдущие
Футурифт ICESat-2 Предыдущие

Return Signal Photons



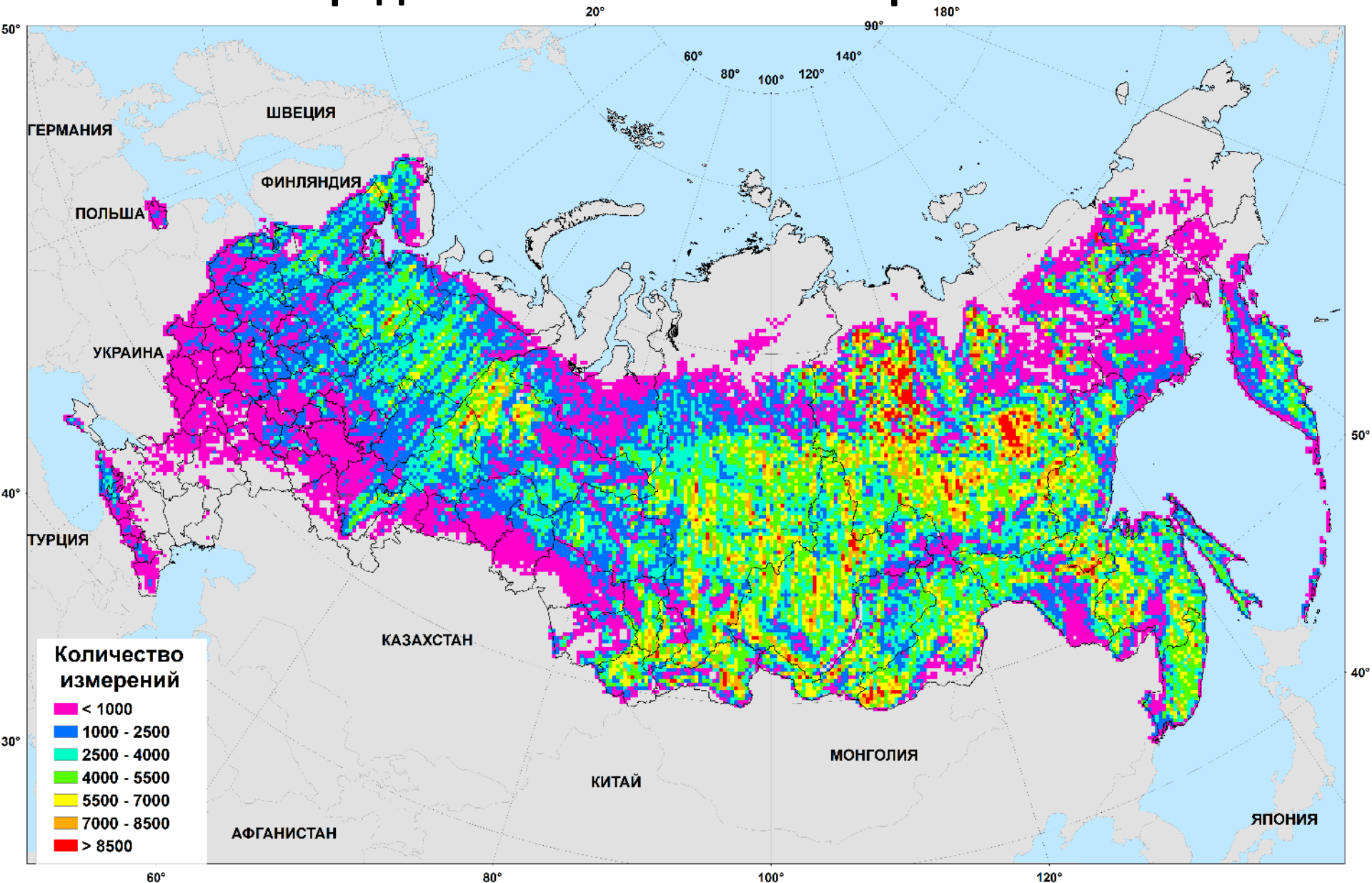
Пример распределения отдельных отраженных фотонов по данным <https://openaltimetry.org/data/icesat2/elevation>



Определение относительной высоты растительности H_r от подстилающей поверхности

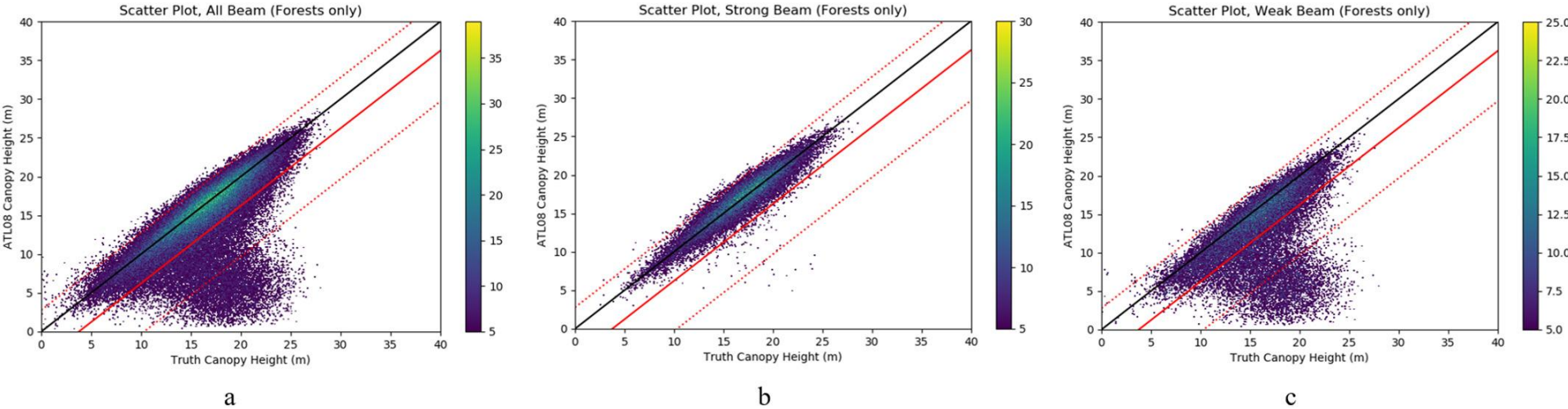
Классификация облака точек на верхний уровень листвы (зеленый), уровни листвы (синий), подстилающую поверхность (красный) и шум (черный)

Распределение количества измерений ATL08

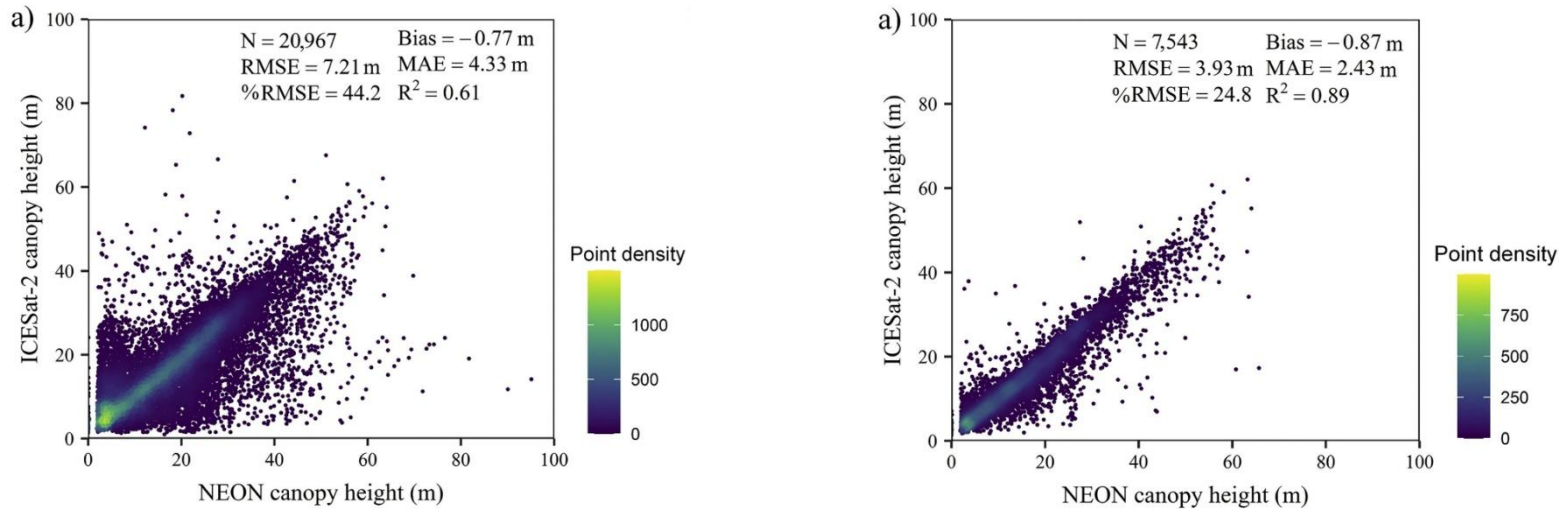


Распределение количества измерений высоты лесного покрова по данным продукта ATL08 в ячейках регулярной сетки 23x23 км по состоянию на 13.05.2020 г.

Оценка точности данных ATL08

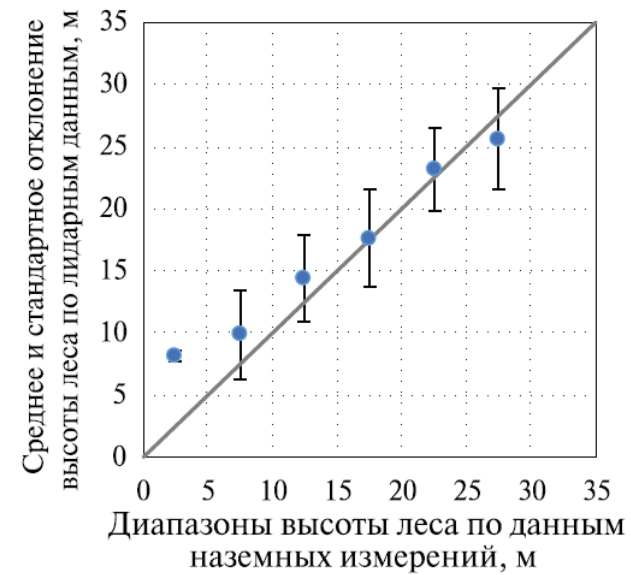
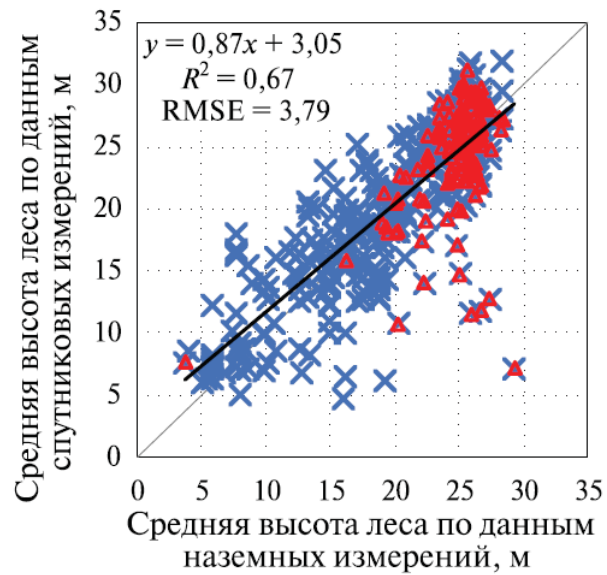
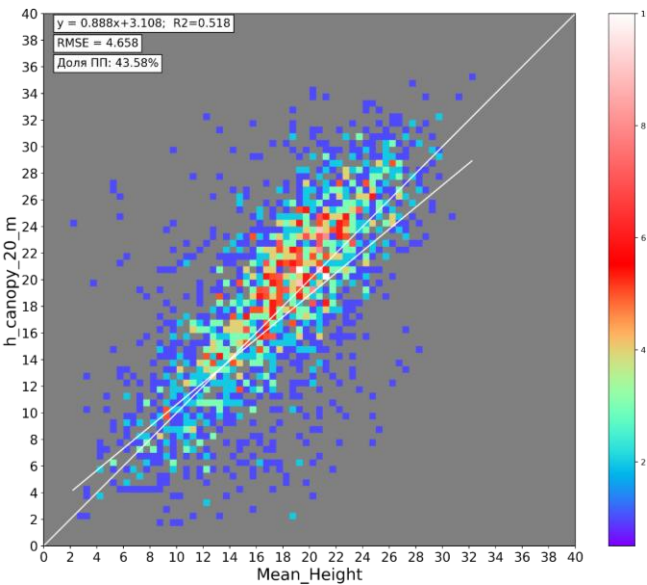


Best RMSE = 2,3 м (Neuenschwander et al., 2022)



Best RMSE = 3,9 м (Liu et al., 2021)

Оценка точности данных ATL08



Best RMSE = 4,7 м (на уровне пробных площадей)

Best RMSE = 3,8 м (на уровне таксационных выделов)

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;

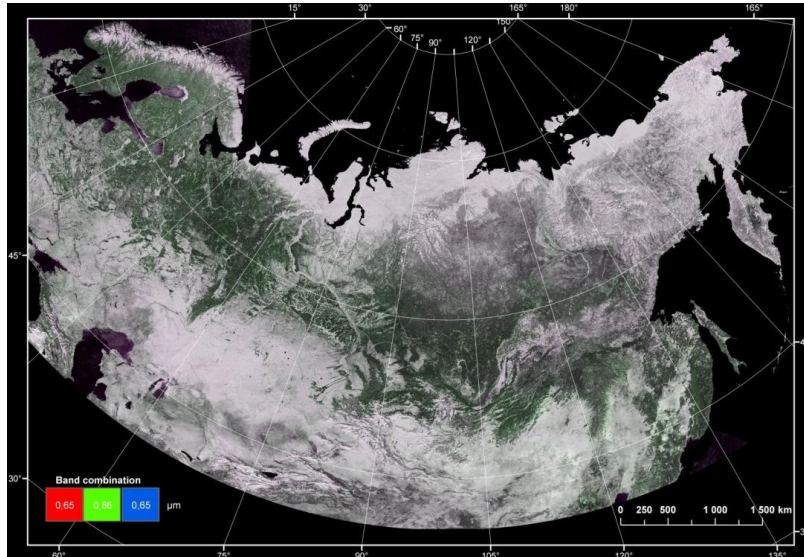
$U = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ – неопределенность высоты для пикселя MODIS, где:

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

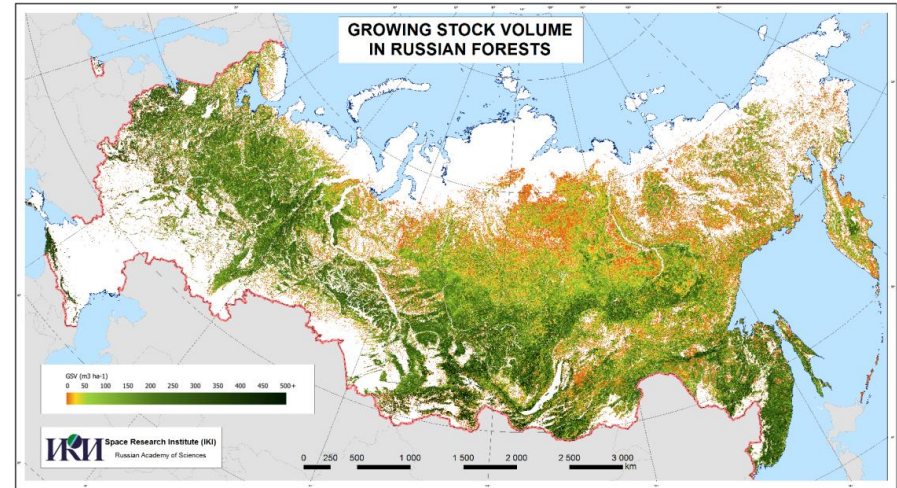
$\sigma_2 = \sqrt{(\sum w_i h_i^2 / \sum w_i - H^2) / n - 1}$ * – неоднородность пикселя.

Было обработано более 125 млн лидарных измерений на территории России за период с октября 2018 по май 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).

Используемые продукты по данным MODIS



Зимнее композитное изображение
(красный/ближний ИК каналы)



Запас стволовой древесины
[м3/га]



Карта преобладающих пород



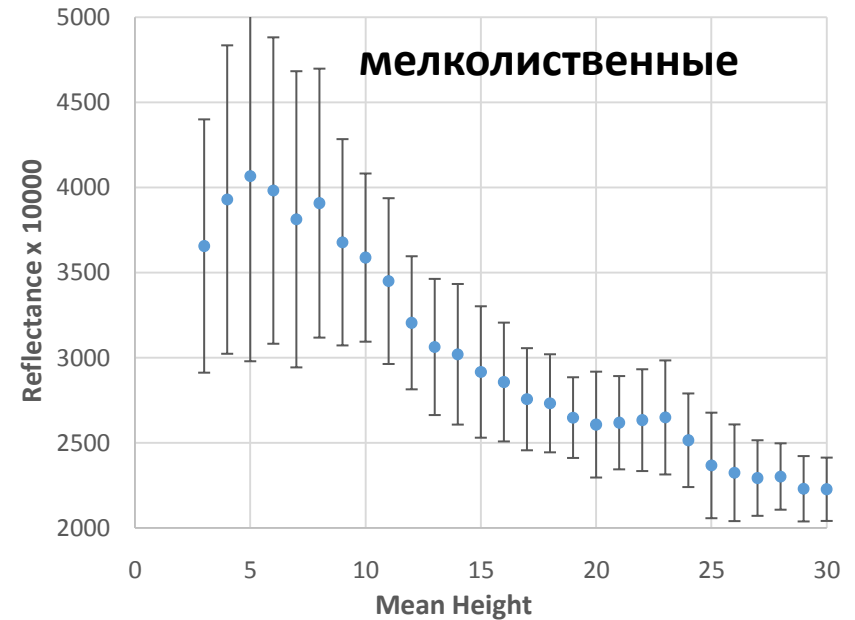
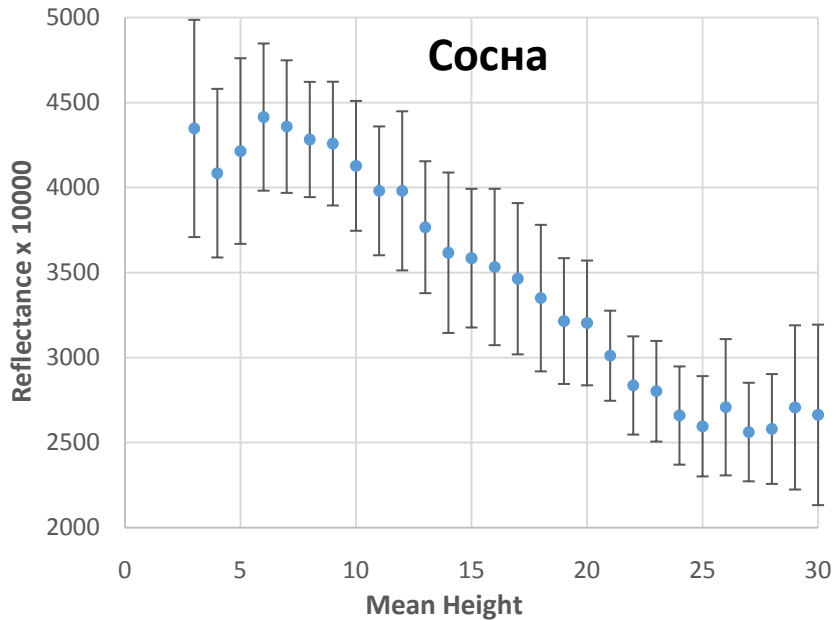
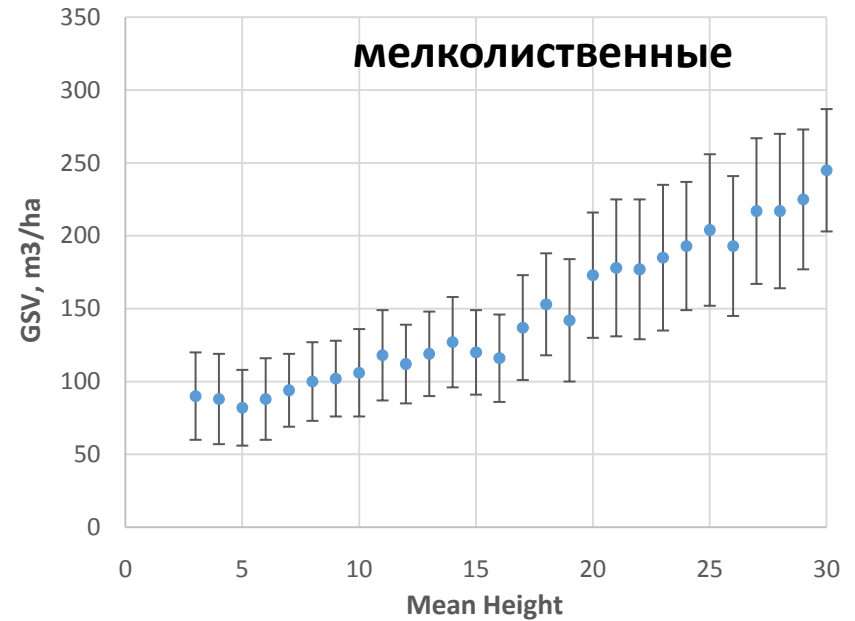
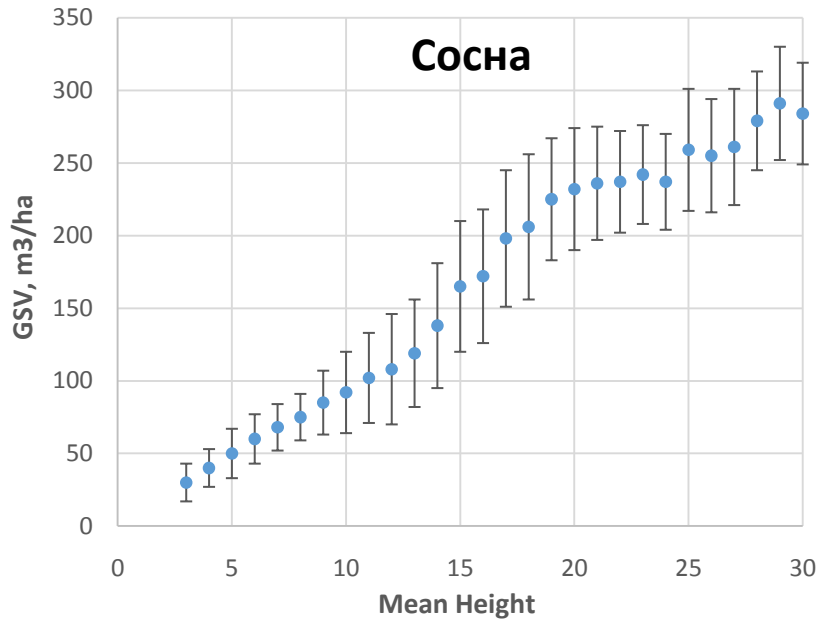
Показатели ГСЛ



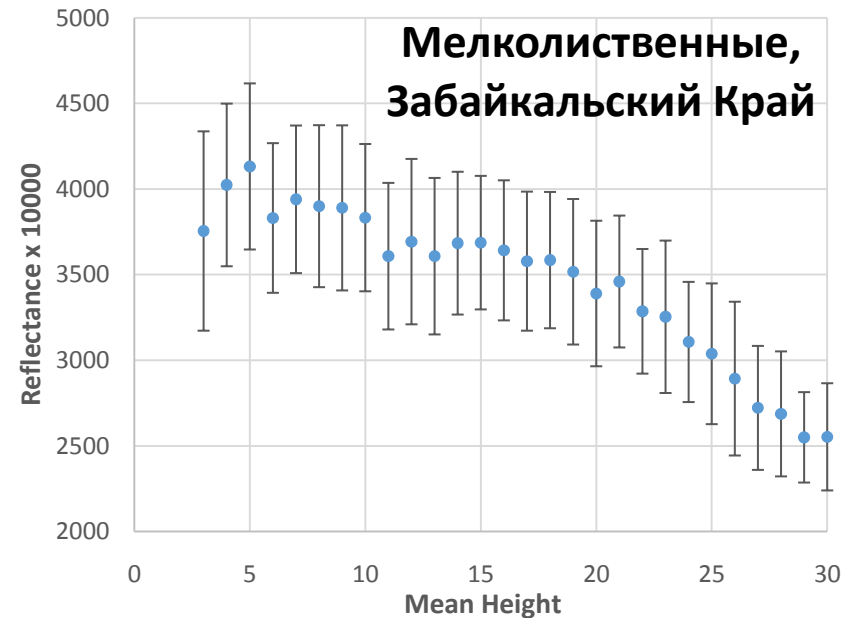
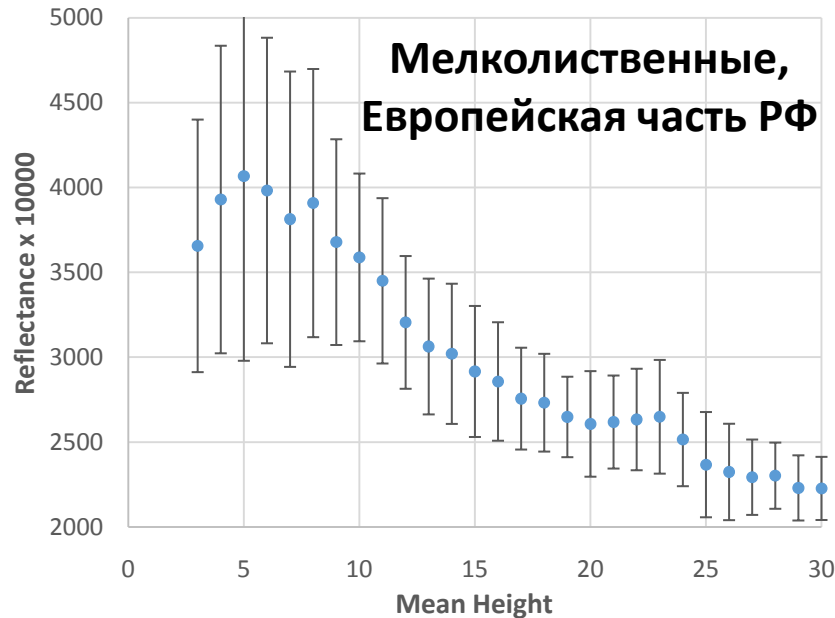
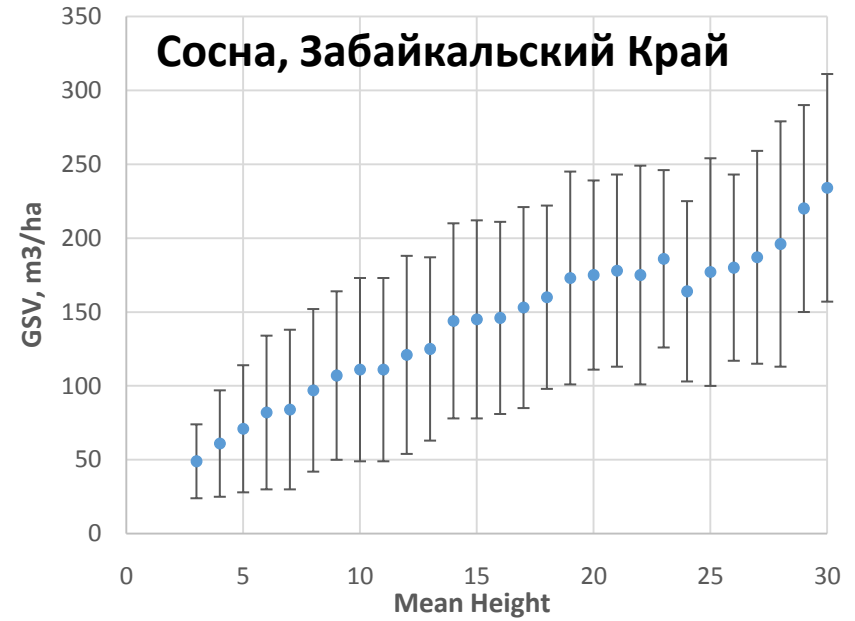
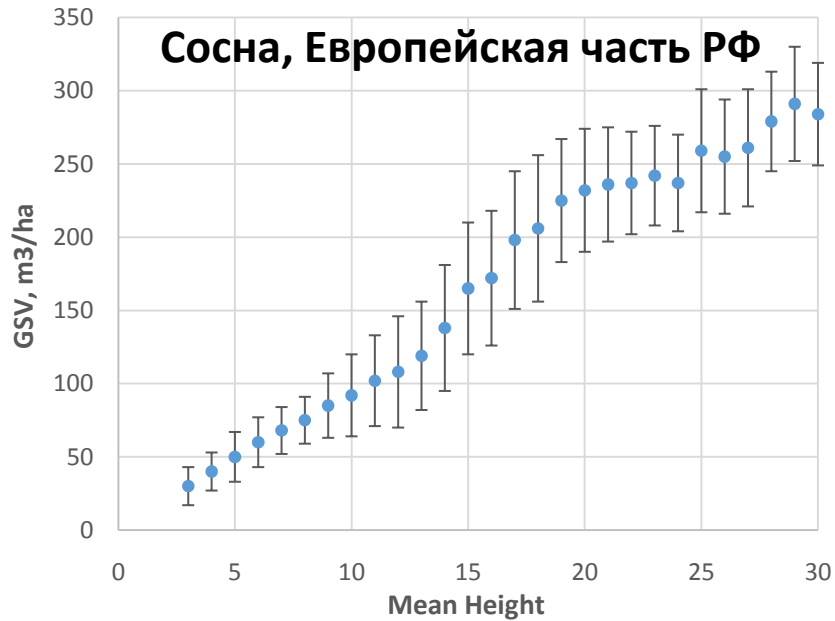
Карта земного покрова

Барталев С.А. и др. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

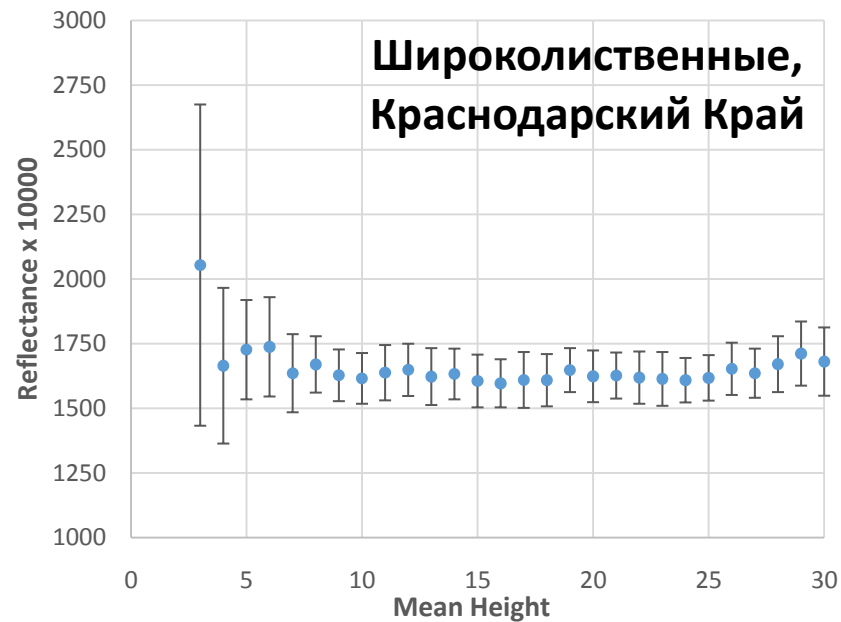
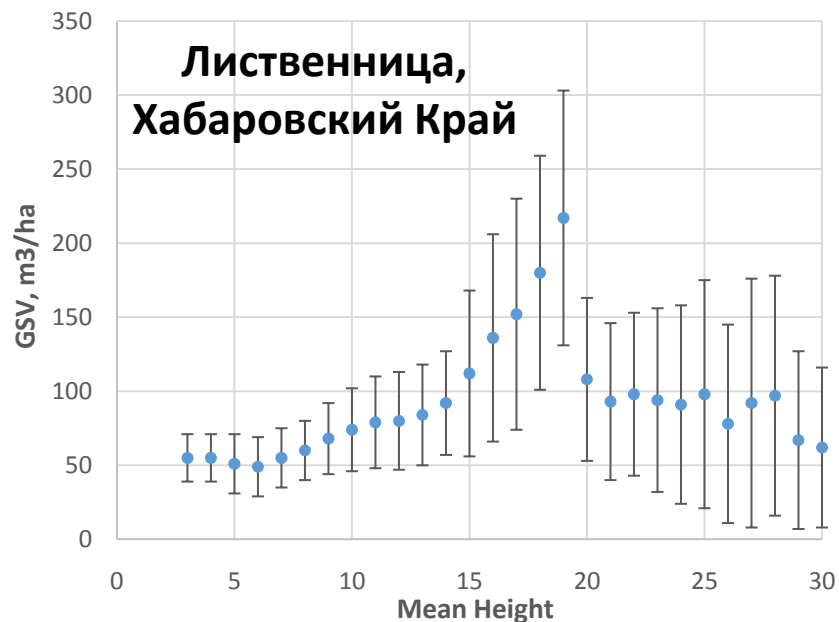
Зависимость высота-запас/КСЯ (разные типы леса)



Зависимость высота-запас/КСЯ (разные территории)



Зависимость высота-запас/КСЯ (проблемные участки)



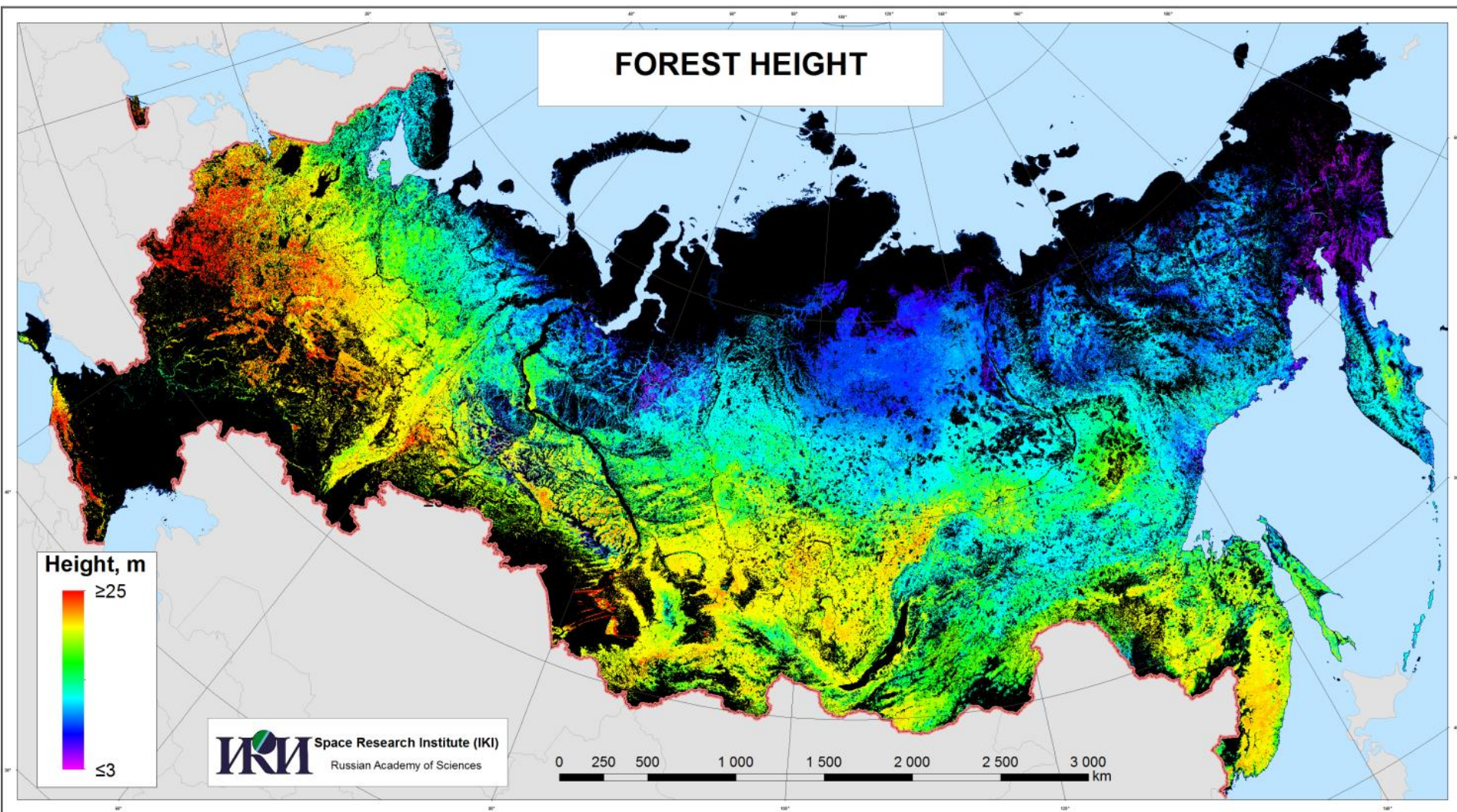
- Отсутствие обучающих данных для некоторых диапазонов высот для определенных комбинаций тип леса + территория (менее критично при локализованном моделировании – такие леса не присутствуют на данной территории);
- Отсутствие зависимости; может быть связано с изменениями признаков вследствие вариаций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

Моделирование средней высоты лесов

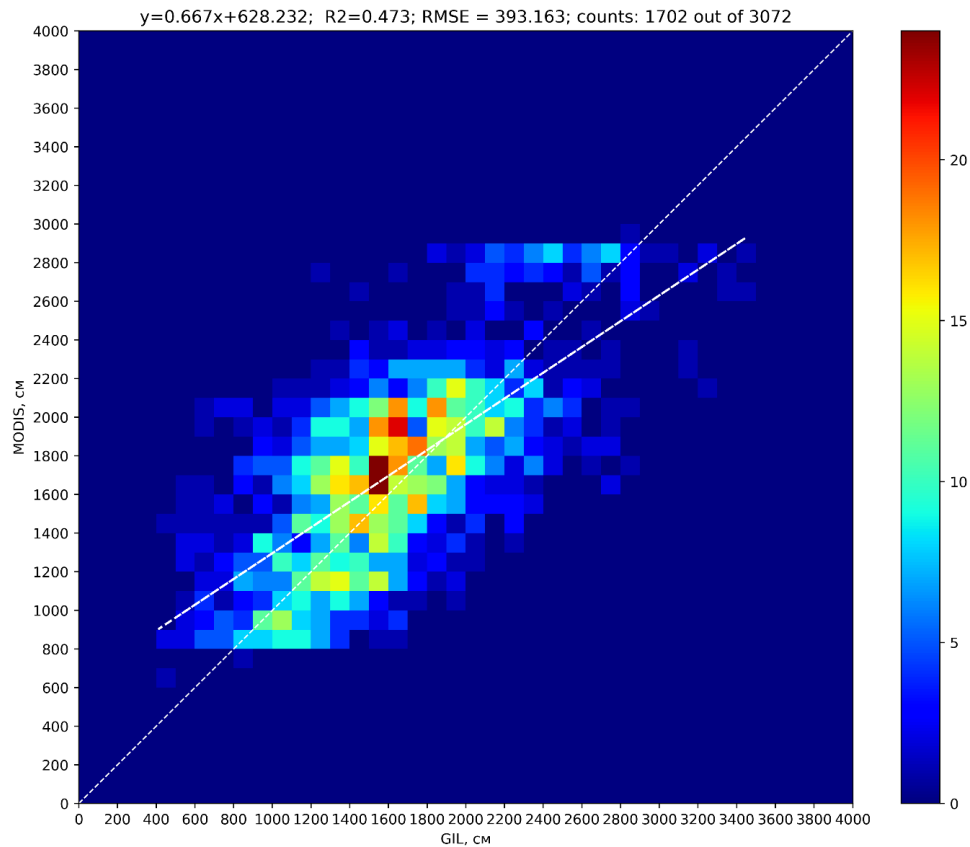
- Регрессионное моделирование на основе случайных лесов с использованием локально-адаптивного подхода LAGMA*:
Территория исследования покрывается регулярной сеткой, для каждого узла которой настройка и применение модели выполняются независимо на основе поднабора обучающих данных, локализованного вблизи 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)

Метод оценки продуктивности лесовосстановления

$$\frac{dX_i}{dt} = c_3 c_2 c_1^{1/c_3} X_i^{(1-1/c_3)} - c_3 c_2 X_i$$

$$X_i = c_1 [1 - \exp(-c_2 A)]^{c_3},$$

где X_i – высота леса;

$\frac{dX_i}{dt}$ – скорость изменения высоты лесного покрова;

A – возраст лесного насаждения, лет;

c_1 коэффициенты модели, содержащие информацию

c_2 об условиях произрастания определенной породы

c_3 леса.

Наборы коэффициентов модели c_3, c_2, c_1 аппроксимируются посредством полиномов квадратичной формы:

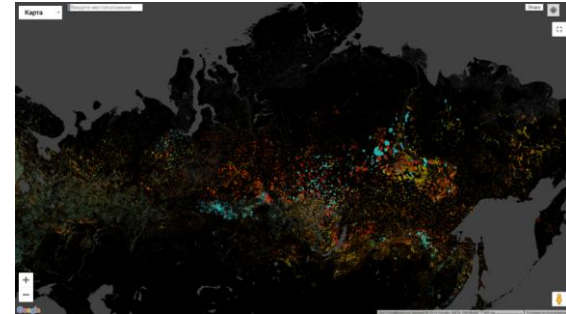
$$c_1 = c_{13}Sl^2 + c_{12}Sl + c_{11}$$

$$c_2 = c_{23}Sl^2 + c_{22}Sl + c_{11}$$

$$c_3 = c_{33}Sl^2 + c_{32}Sl + c_{11},$$

где Sl – код класса бонитета (продуктивности).

Модели динамики лесов (Швиденко и др. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесобразующих пород Северной Евразии. М., 2008. 886 с.)



Global Forest Change (Hansen et al. 2013. "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change." Science 342 (15 November): 850–53.)

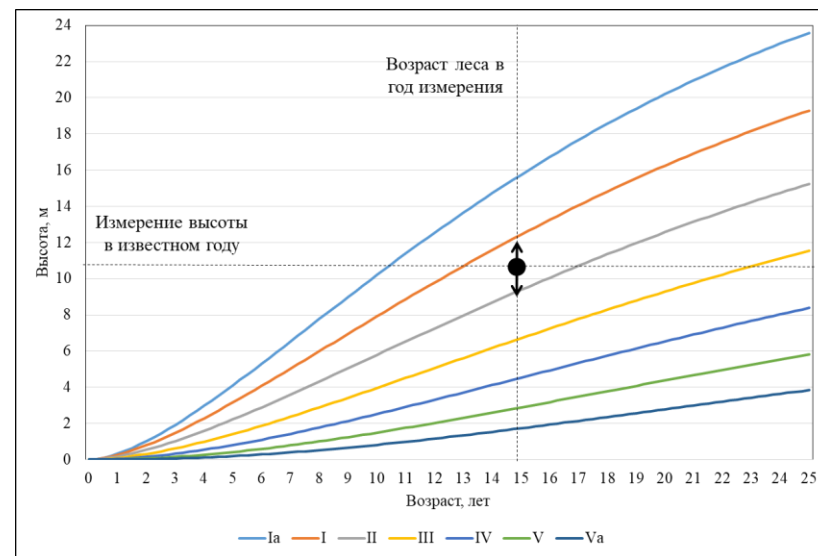


Карта растительности России (Егоров и др. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282–286.)

Территория исследования - лесной район хвойно-широколиственных лесов
Европейской части РФ

Алгоритм оценки продуктивности восстанавливающегося леса на вырубках и гарях

1. Определяется год исчезновения леса ⁽¹⁾;
2. Выявляются участки, на которых происходит восстановление лесного покрова и его тип ⁽²⁾;
3. Выбирается соответствующая модель хода роста лесных насаждений для данной территории ⁽³⁾;
4. Определяется возраст восстанавливающегося леса (интервал между годом исчезновения леса и годом проведения лидарных измерений);
5. Рассматриваемому участку лесных насаждений ставится в соответствие наилучшим образом согласующийся бонитет.



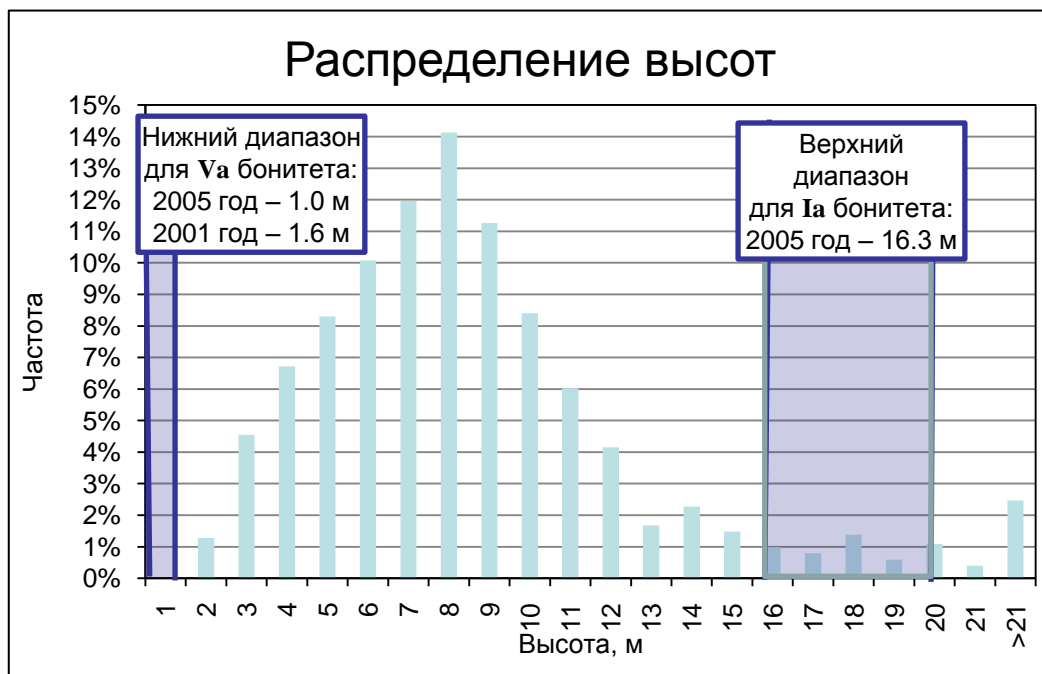
Модельная динамика классов бонитета

⁽¹⁾ Global Forest Change (Hansen et al. 2013. “High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change.” Science 342 (15 November): 850–53.)

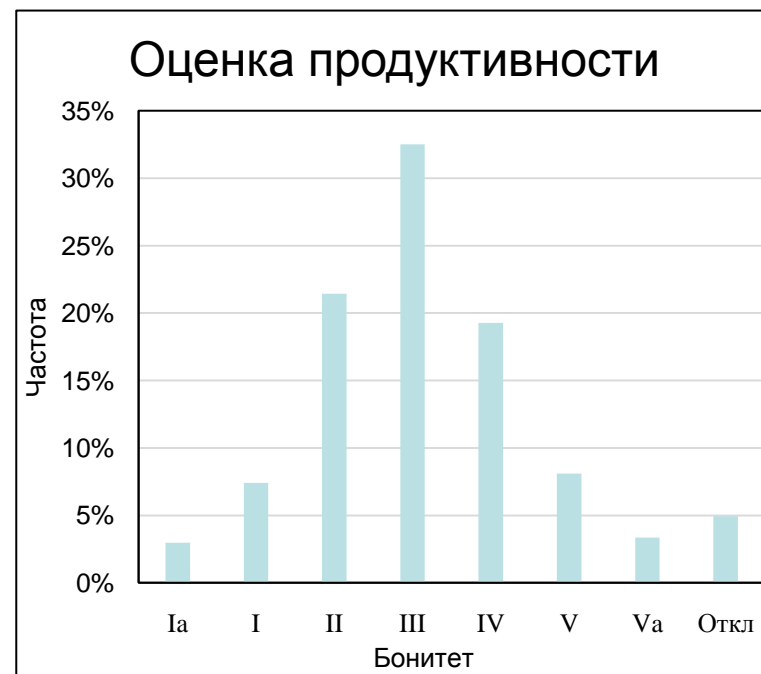
⁽²⁾ Карта растительности России (Егоров и др. Карта растительного покрова России, полученная по данным спутниковой системы Proba-V // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 282-286.)

⁽³⁾ Таблицы хода роста (Швиденко и др. Таблицы и модели хода роста и продуктивности насаждений основных лесообразующих пород Северной Евразии. М., 2008. 886 с.)

Пример результатов оценки продуктивности лиственного леса на вырубках и гарях 2001-2005 года



Распределение высот леса, восстанавливающегося на вырубках и гарях, по данным спутниковых измерений. Указаны границы диапазонов высот согласно результатам моделирования для наиболее (Ia) и наименее (Va) продуктивных лесов.



Распределение продуктивности (классов бонитета) лесовосстановления на вырубках и гарях

Анализ динамики высоты лесов по лидарным данным

- Выбран участок в Европейской части России. В пределах данной территории находятся пересекающиеся спутниковые лидарные данные, для части которых имеется информация о породе и продуктивности (бонитете) лесного покрова на уровне выделов. Для анализа использовались следующие породы: сосна, ель, береза, осина.
- Пересечения отфильтровывались по пороговой площади пересечения футпринта трека лидара ($d=14\text{ м} \rightarrow S=196\text{ м}^2$)

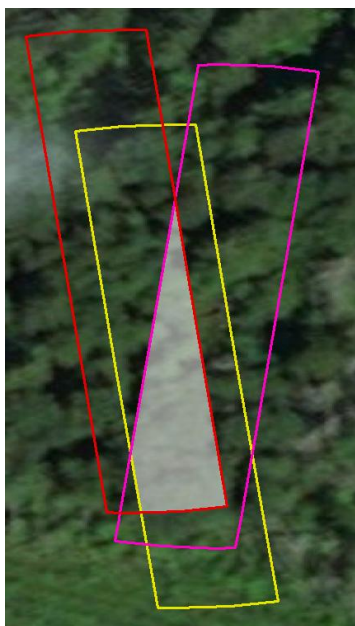
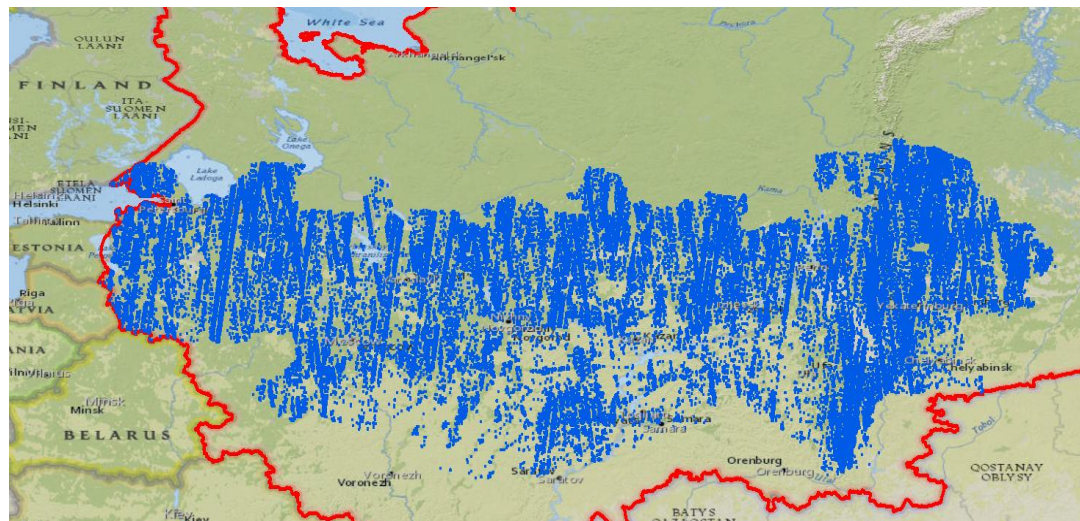


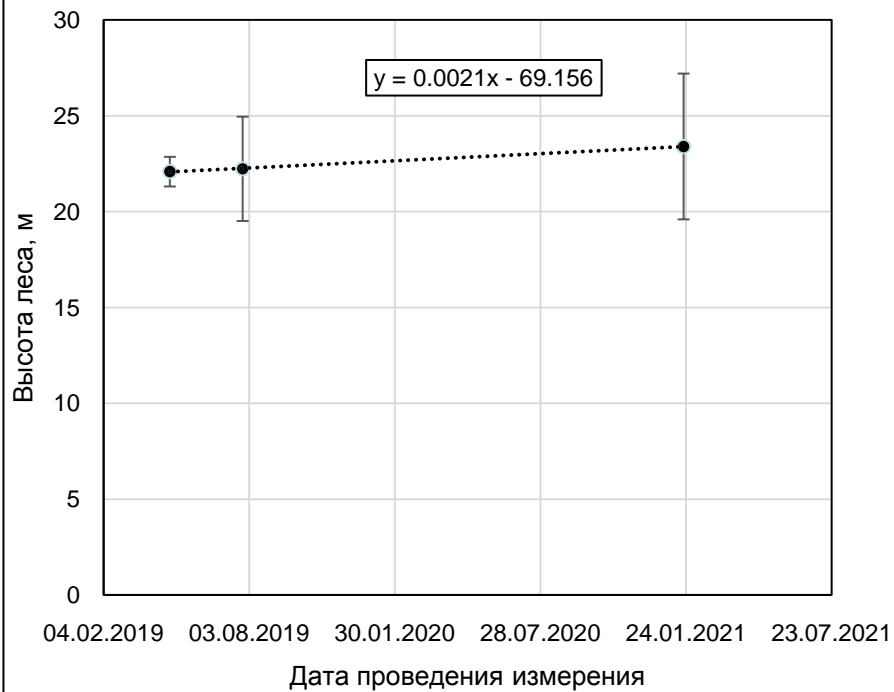
Иллюстрация пересечения 3 сегментов одновременных лидарных измерений



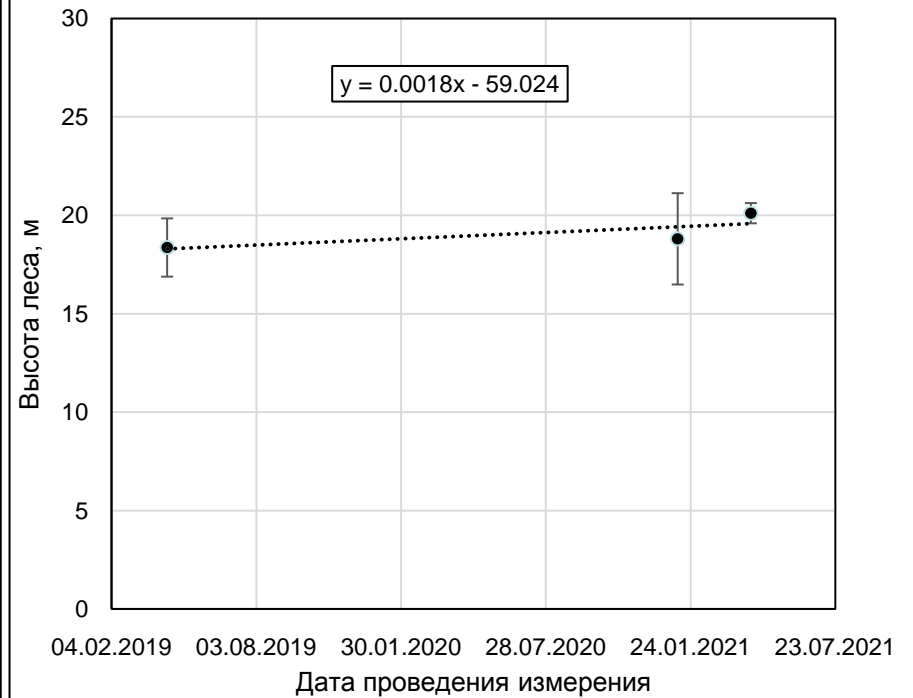
Красный: Границы территории России;
Синий: Пересекающиеся лидарные данные.

Примеры динамики высоты в пересечениях по данным ATL08

Береза, 2 бонитет

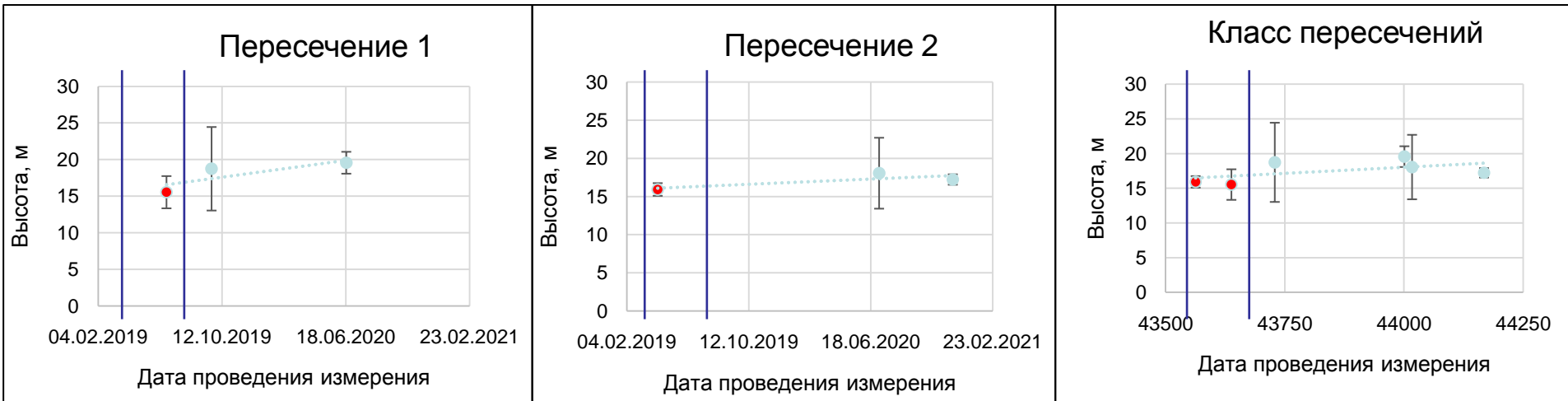


Сосна, 3 бонитет



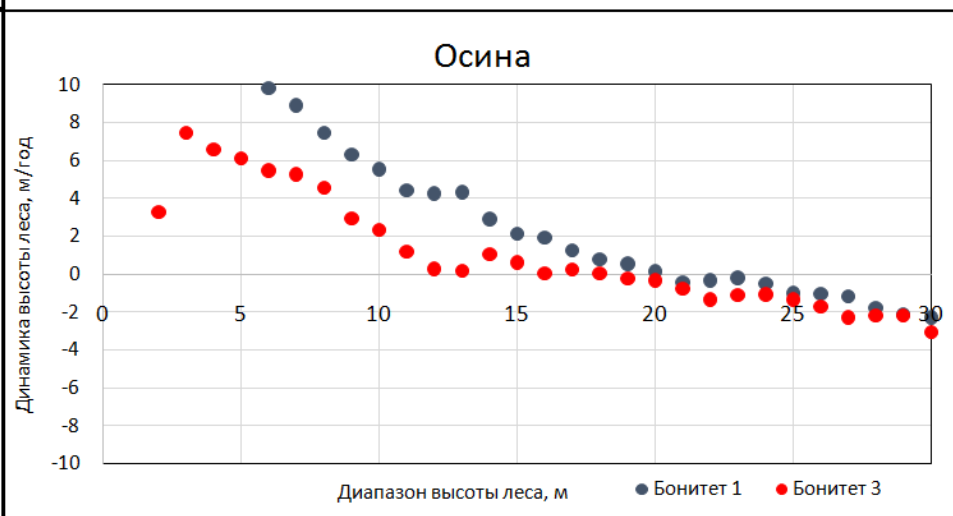
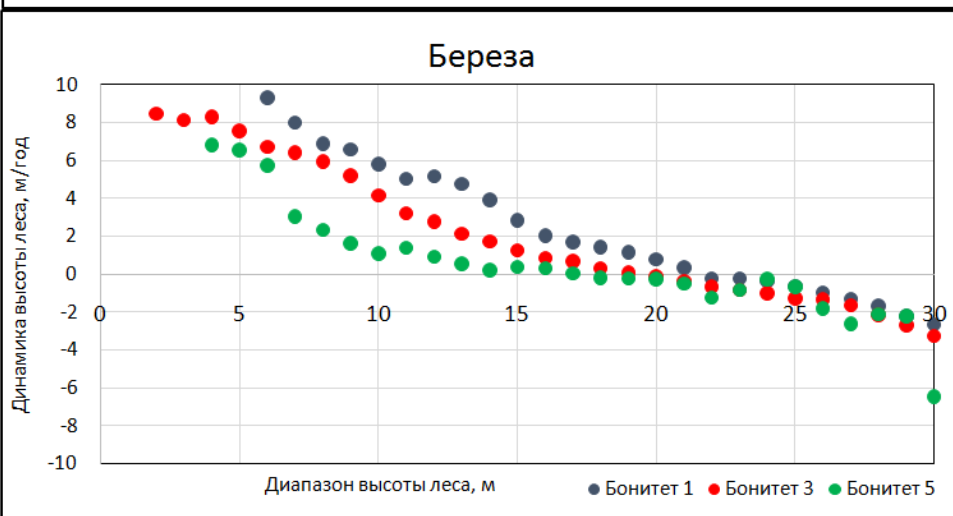
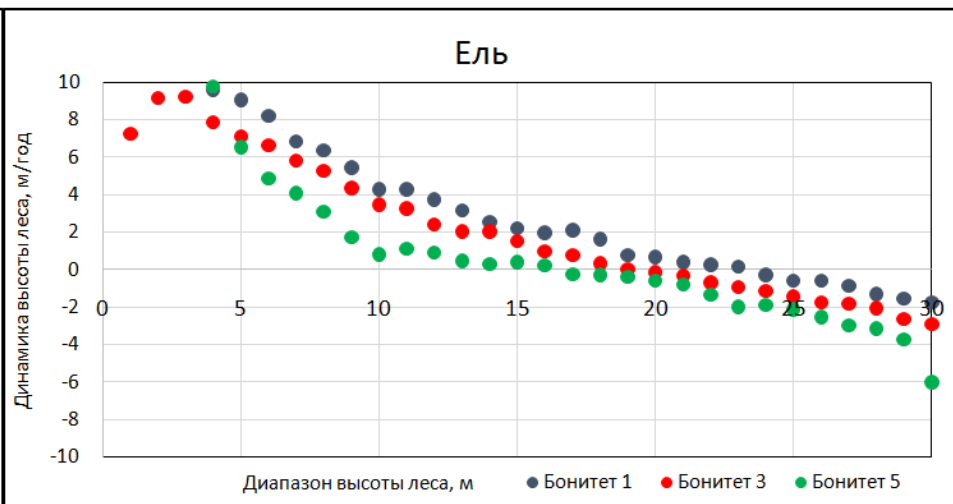
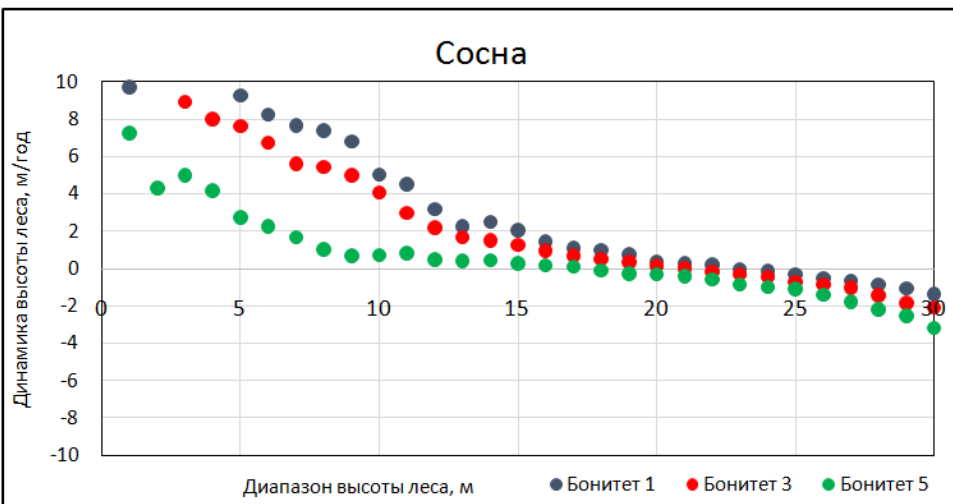
Описание метода

- Лес одной породы и бонитета в одинаковых условиях имеет одинаковую динамику высоты.
 - 1) Отбираются пересечения, у которых первые (по дате) измерения проводились в период с 01.04.2019 по 01.07.2019;
 - 2) Пересечения разбиваются на классы по совокупности признаков: бонитет, порода, диапазон высоты первого измерения (1 метр);
 - 3) Для каждого класса проводится оценка значения прироста высоты леса;
- Тренды считаются с учетом весов, обратно пропорциональных значению неопределенности набора данных ATL08.

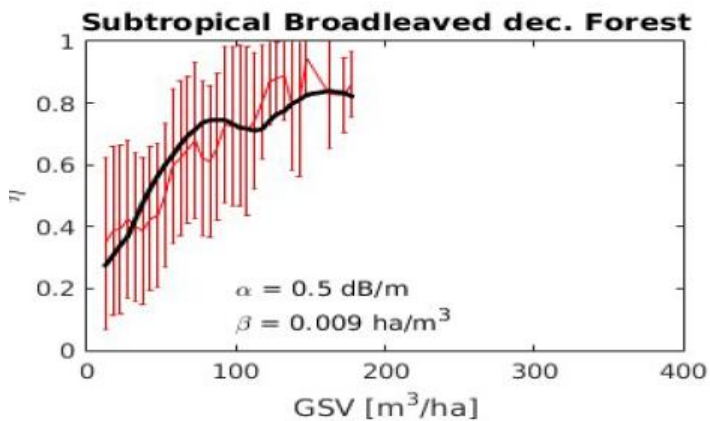
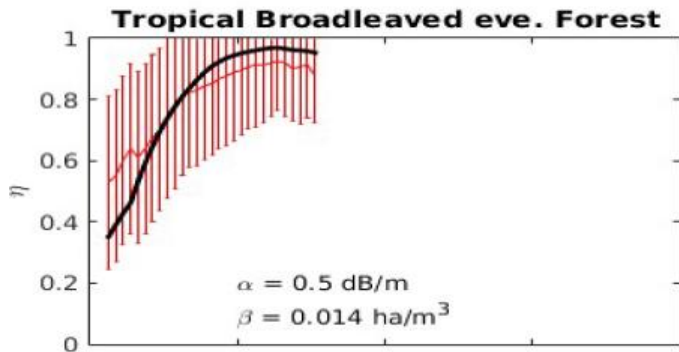
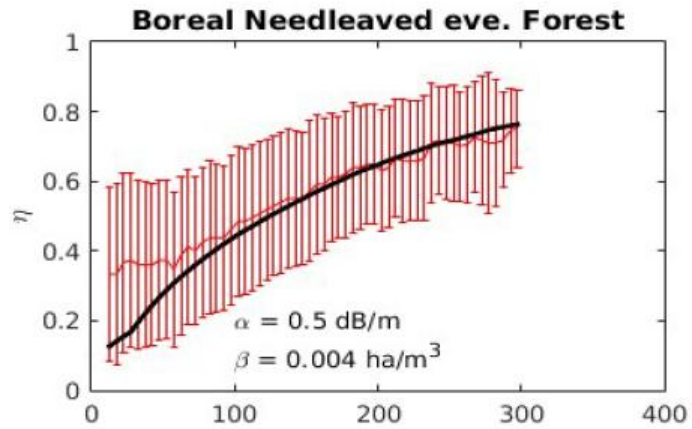


(Сосна, 2 бонитет, диапазон стартовой высоты: 15 метров)

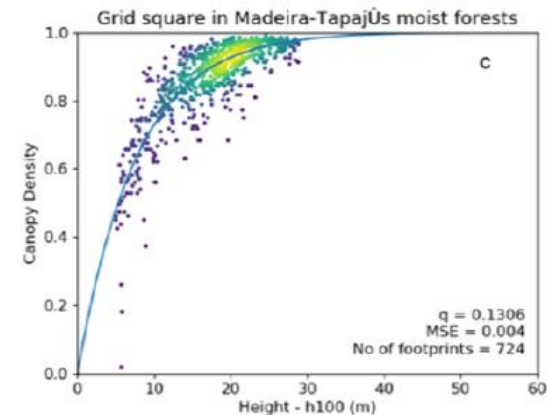
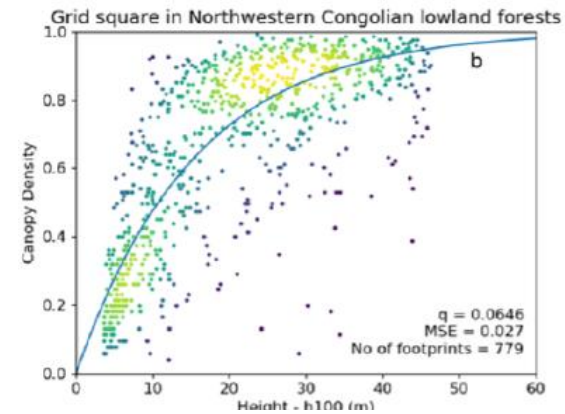
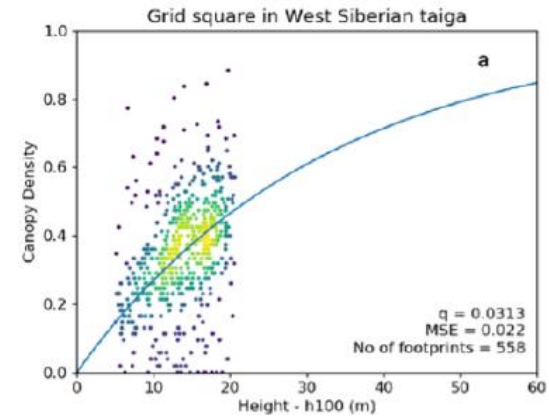
Динамика высоты леса для разных пород и бонитетов



Дальнейшие исследования

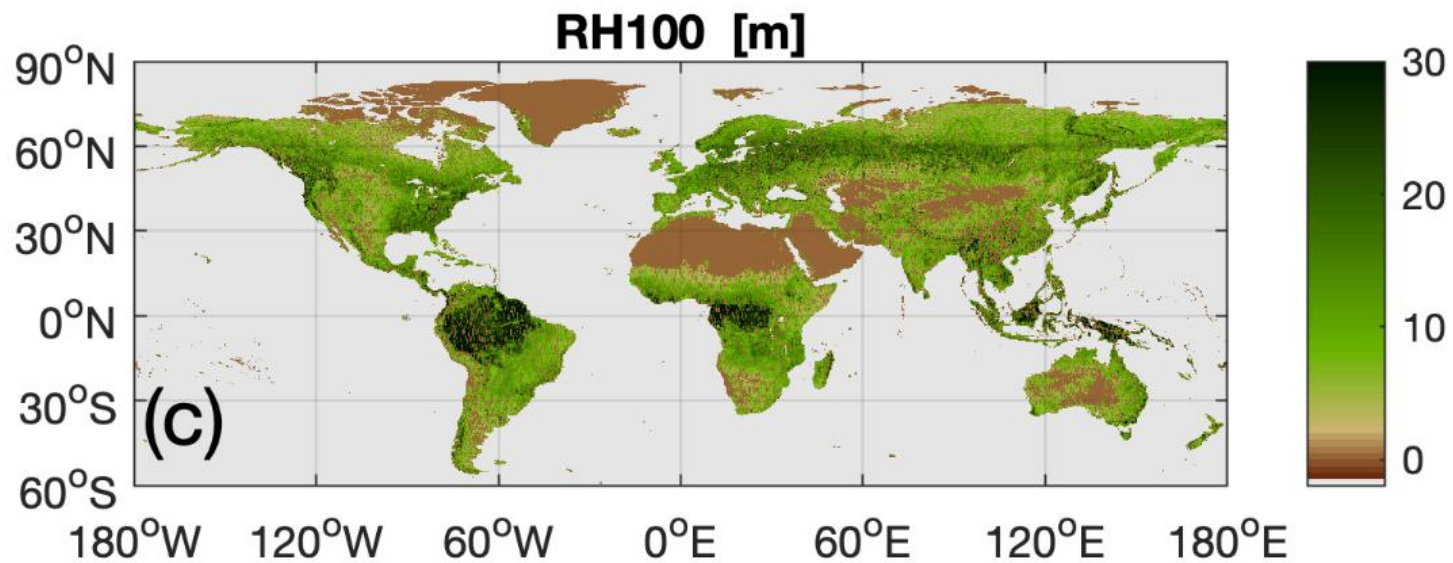
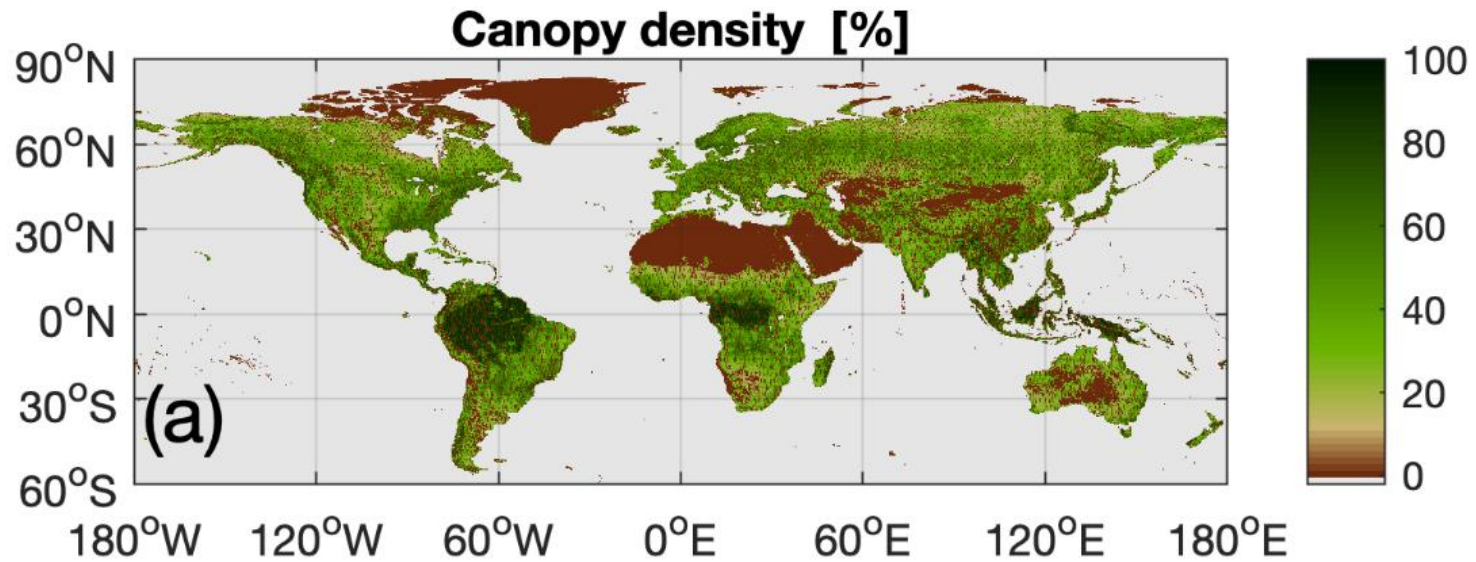


(Cartus, Santoro, 2016)



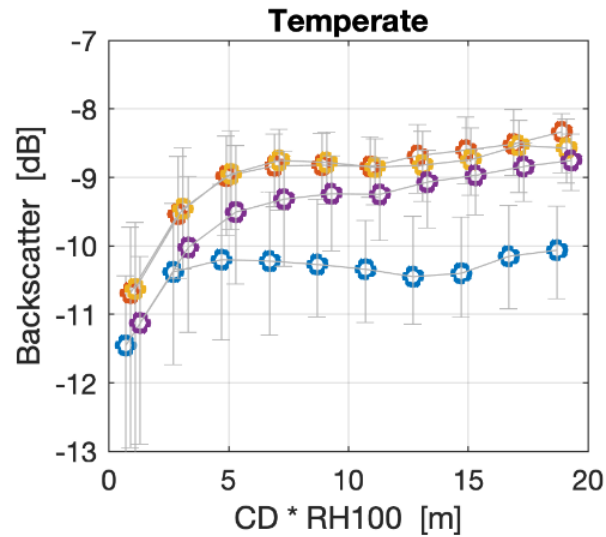
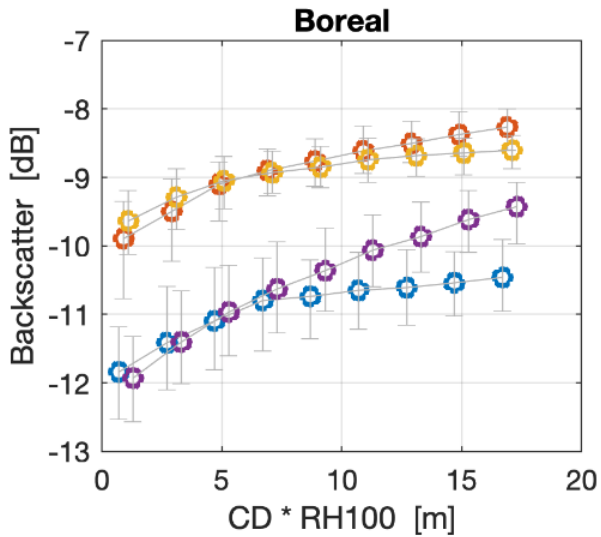
(Kay et al., 2021)

Дальнейшие исследования

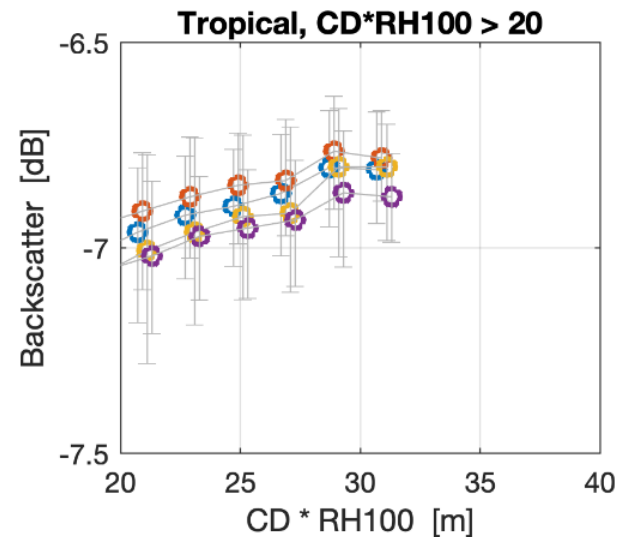
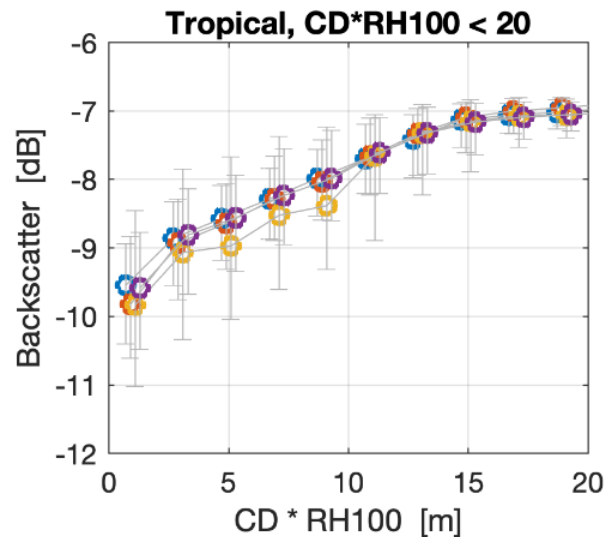
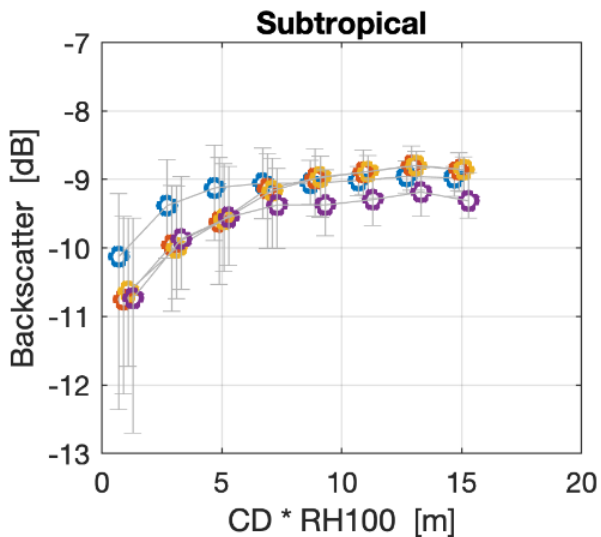


Database of canopy density (CD) and top-of-canopy height (RH100) from ICESat data
(Santoro et al., 2021)

Дальнейшие исследования

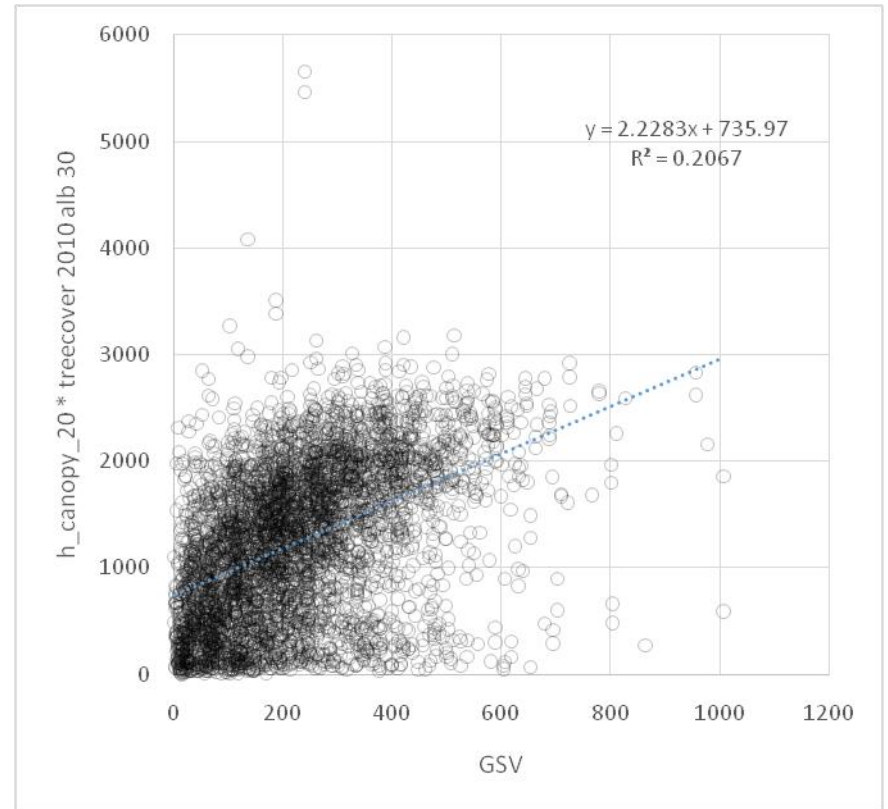
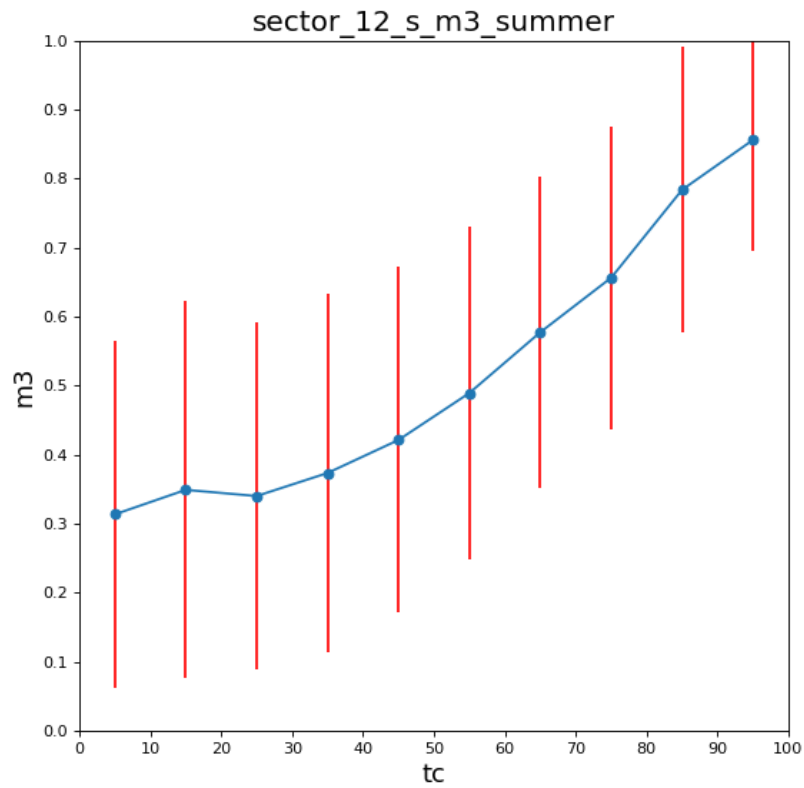


- February
- May
- August
- November



Database of canopy density (CD) and top-of-canopy height (RH100) from ICESat data (Santoro et al., 2021)

Дальнейшие исследования



Спасибо за внимание!

Обработка данных ICESat-2 проводилась с использованием ресурсов ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Lefsky, M. A. (2010). A global forest canopy height map from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer and the Geoscience Laser Altimeter System. *Geophysical Research Letters*, 37(15).
2. Simard, M., Pinto, N., Fisher, J. B., & Baccini, A. (2011). Mapping forest canopy height globally with spaceborne lidar. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(G4).
3. Los, S. O., Rosette, J. A., Kijun, N., North, P. R. J., Chasmer, L., Suárez, J. C., ... & Berni, J. A. J. (2012). Vegetation height and cover fraction between 60 S and 60 N from ICESat GLAS data. *Geoscientific Model Development*, 5(2), 413-432.
4. Healey, S.P., M.W. Hernandez, D.P. Edwards, M.A. Lefsky, E. Freeman, P.L. Patterson, E.J. Lindquist, and A.J. Lister. 2015. CMS: GLAS LiDAR-derived Global Estimates of Forest Canopy Height, 2004-2008. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1271>
5. Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., ... & Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165.
6. Lang, N., Kalischek, N., Armston, J., Schindler, K., Dubayah, R., & Wegner, J. D. (2022). Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112760.
7. Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., ... & Zwally, J. (2017). The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): science requirements, concept, and implementation. *Remote sensing of environment*, 190, 260-273.
8. Neuenschwander, A.L.; Magruder, L.A. The Potential Impact of Vertical Sampling Uncertainty on ICESat-2/ATLAS Terrain and Canopy Height Retrievals for Multiple Ecosystems. *Remote Sens.* **2016**, *8*, 1039. <https://doi.org/10.3390/rs8121039>
9. Neuenschwander, A.L.; Magruder, L.A. Canopy and Terrain Height Retrievals with ICESat-2: A First Look. *Remote Sens.* **2019**, *11*, 1721. <https://doi.org/10.3390/rs11141721>
10. A. Neuenschwander, K. Pitts, B. Jelley, J. Robbins, J. Markel, S. Popescu, R. Nelson, D. Harding, D. Pederson, B. Klotz, R. Sheridan. Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for Land - Vegetation Along-Track Products (ATL08). 5 April 2022 (This ATBD Version corresponds to release 005 of the ICESat-2 ATL08 data).
11. Cartus, Oliver, and Maurizio Santoro. "Multi-scale mapping of forest growing stock volume using ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR, Landsat, and ICESAT GLAS." ESA Living Planet Symposium. ESA Prague, 2016.
12. Kay, Heather, et al. "Exploring the relationship between forest canopy height and canopy density from Spaceborne LiDAR observations." *Remote Sensing* 13.24 (2021): 4961.
13. M. Santoro, O. Cartus, N. Carvalhais, S. Besnard, N. Fan. Three decades of above-ground biomass estimates of boreal forests from spaceborne radar observations. 2021 IBFRA conference – 18-Aug-2021.
14. Liu, A., Cheng, X., & Chen, Z. (2021). Performance evaluation of GEDI and ICESat-2 laser altimeter data for terrain and canopy height retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112571.
15. Neuenschwander, A., Guenther, E., White, J. C., Duncanson, L., & Montesano, P. (2020). Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112110.
16. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.