ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI: 10.21178/2079-6080.2026.2.78
УДК 528.94:630*5:528.9

Возможности применения глобальных цифровых моделей высот FABDEM и Copernicus DEM для оценки характеристик лесных насаждений (на примере отдельных территорий Ленинградской области)

© Д.М. Черниховский, М.С. Дзениш

The possibilities of using global digital elevation models FABDEM and Copernicus DEM to assess the characteristics of forest stands (on the example of individual territories of the Leningrad region)

D.M. Chernikhovsky, M.S. Dzenish (Saint Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov)

The study is devoted to assessing the possibilities of using global digital elevation models FabDEM and Copernicus DEM to determine the heights and reserves of forest stands. The objectives of the study included comparing heights determined on the basis of FabDEM and topographic maps, estimating the height of the forest canopy based on the difference between Copernicus DEM and FabDEM models, as well as searching for statistical relationships between the height of the forest canopy and the characteristics of forest stands. The objects of the study are three model territories belonging to different landscapes of the Leningrad region – the Borodinskoe forest district of the North-Western forestry, the Lisinsky part of the Educational and Experimental Forestry and the Svirsky forest district of the Lodeynopolsky forestry. Using the example of the Lisinsky part of the Educational and Experimental Forestry, the differences between the heights of the FabDEM and the elevation marks indicated on topographic maps are estimated. The average absolute tower (MAE) with all sample points was 1.79 m, the average square tower (RMSE) = 2.33 m^2. The height of the forest canopy is determined for all model territories based on the difference between Copernicus and FabDEM. The average values of the forest canopy heights of certain land categories are estimated. Using the example of marshes, the tendency to decrease the height

difference with an increase in the average area is shown. The statistical relationships between the height of the forest canopy and the heights and stocks of forest stands of the main forest-forming species are estimated. For pine stands, the ratio of the height of the forest canopy to the height of the stands according to the taxation data varies from 1:1 at the age of young trees to 1:2 in overgrown stands. Variance analysis was used to estimate the differences in the average heights of the forest canopy of pine and spruce stands in different model territories, taking into account age groups. The results obtained can be used to assess the characteristics of forests in large areas using simplified methods. The use of the global digital elevation model FabDEM for terrain characterization is promising both for practical forest accounting and logging planning, as well as for forestry science.

Key words: digital elevation model, forest canopy height, digital relief model, scattering phase center height, FabDEM, Copernicus DEM, regression analysis

Возможности применения глобальных цифровых моделей высот FABDEM и Copernicus DEM для оценки характеристик лесных насаждений (на примере отдельных территорий Ленинградской области)

Д.М. Черниховский, М.С. Дзениш

Исследование посвящено оценке возможностей применения глобальных цифровых моделей высот FabDEM и Copernicus DEM для определения высот и запасов лесных насаждений. В задачи исследования входили сравнение высот, определяемых на основе FabDEM и топографических карт, оценка высоты лесного полога на основе разницы моделей Copernicus DEM и FabDEM, а также поиск статистических связей высоты лесного полога с характеристиками насаждений. Объектами исследования выбраны три модельные территории, относящиеся к разным ландшафтам Ленинградской области – Бородинское участковое лесничество Северо-Западного лесничества, Лисинская часть Учебно-опытного лесничества и Свирское участковое лесничество Лодейнопольского лесничества. На примере Лисинской части Учебно-опытного лесничества оценены расхождения высот ЦМР FabDEM с отметками высот, обозначенными на топографических картах. Средняя абсолютная ошибка (MAE) по всем выбранным точкам составила 1,79 м, средняя квадратическая ошибка (RMSE) – 2,33 м^2. Для всех модельных территорий на основе разницы ЦМВ Copernicus и FabDEM определена высота лесного полога. Оценены средние значения высот лесного полога отдельных категорий земель. На примере болот показана тенденция снижения разницы высот с увеличением средней площади. Оценены статистические связи высоты лесного полога с высотами и запасами лесных насаждений основных лесообразующих пород. Для сосновых насаждений соотношение высоты лесного полога с высотой насаждений по данным таксации меняется от 1:1 в возрасте молодняков до 1:2 в перестойных насаждениях. С помощью дисперсионного анализа определены расхождения средних высот лесного полога сосновых и еловых насаждений разных модельных территорий с учетом групп возраста.

Полученные результаты могут использоваться при оценке характеристик лесов на значительных территориях по упрощенным методикам. Применение глобальной ЦМР FabDEM для характеристики рельефа перспективно как для практической лесоучетной деятельности и планирования лесозаготовок, так и для лесной науки.

Ключевые слова: цифровая модель высот, высота лесного полога, цифровая модель рельефа, высота центра фазы рассеяния, FabDEM, Copernicus DEM, регрессионный анализ

Черниховский Дмитрий Михайлович – профессор кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, д-р с.-х. наук, доцент

E-mail: cherndm2006@yandex.ru; ORCID: 0000–0002–6375–3080; SPIN-код: 2189–1988

Дзениш Маргарита Сергеевна – аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем

E-mail: margo_makeeva@bk.ru

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова»

194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литера У

Телефон: +7 (812) 217–92–46

Введение

Цифровые модели высот (ЦМВ) являются разновидностями «больших данных» и представляют собой трехмерные модели земной поверхности в виде пиксельной сетки (растра), каждая ячейка которой хранит среднее значение высоты [2]. Выделяют две основных формы ЦМВ: *модели поверхности* (ЦМП), в которых каждое значение пикселя является средней высотой всех объектов поверхности, включая здания и растительный покров, а также *модели рельефа* (ЦМР), значения пикселей которой представляют собой высоту земной поверхности. Характеристики и особенности ряда современных глобальных ЦМВ рассматриваются в публикациях [2, 7].

Модель высот, получаемая вычитанием ЦМР из ЦМП для участков, покрытых древесно-кустарниковой растительностью, называется *моделью высот лесного полога* (МВЛП) или Canopy Height Model (CHM). Такие модели характеризует высоту и форму поверхности лесного полога. Они могут применяться при оценке ряда характеристик лесов, а также при учете изменений. В публикациях рассматриваются перспективы и возможности оценки запасов и высот насаждений на основе ЦМВ, формируемых по материалам лидарных и радарных съемок, а также в результате фотограмметрической обработки материалов стереоскопических съёмок [6, 9, 17]. При использовании данных радарных съемок высоты, определяемые на основе МВЛП, называются *высотами центра фазы рассеяния* (scattering phase center heights) [17].

Отдельным направлением исследований является оценка качества и изучение возможностей применения глобальных МВЛП. Формирование глобальных МВЛП в настоящее время выполняется путем обработки ЦМВ и материалов дистанционного зондирования Земли с помощью методов машинного обучения [18, 21].

Определению характеристик лесов на основе глобальных ЦМВ и оценке влияния древесно-кустарниковой растительности на точность определения высот посвящено значительное количество исследований во всем мире [12, 14, 17, 20, 24, 25, 32]. Возможности цифрового моделирования высот лесного полога на основе материалов радарных съемок отражены в ряде статей [10, 11, 31].

Наиболее точные результаты оценки высот лесного полога могут быть получены на основе лазерных съемок [4, 19]. В качестве близкой альтернативы моделированию высот лесного полога на основе лазерных съемок рассматривается фотограмметрическая обработка материалов стереоскопических съёмок [6, 28, 29]. Также изучаются возможности сочетания фотограмметрических облаков точек с материалами лазерных съемок [16, 26, 27, 33, 34].

Несмотря на многообразие доступных глобальных ЦМВ большинство из них относится к моделям поверхности и не отражает реальную высоту земной поверхности при наличии построек и древесно-кустарниковой растительности. Поэтому для получения реальной высоты земной поверхности необходимо использовать топографические карты, либо проводить специальную обработку ЦМП, направленную на «удаление» (фильтрацию) лесной растительности и строений.

Одной из перспективных общедоступных глобальных ЦМР является FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) [30]. Модель сформирована на основе данных Copernicus DEM, из которых с помощью алгоритмов машинного обучения удалены высоты деревьев и зданий, а также минимизированы артефакты. При удалении лесной растительности использовались данные глобальных лидарных съемок GEDI (между 51.6° южной и 51.6° северной широты) и ICESat-2. Проверка результатов моделирования осуществлялась на основе высотных данных для территорий 12 стран, расположенных в разных климатических условиях и отличающихся степенью хозяйственного освоения [15].

В настоящем исследовании оцениваются возможности применения для оценки высот и

запасов лесных насаждений современных общедоступных моделей высот FabDEM и Copernicus DEM. В задачи исследования входили выбор и получение глобальных ЦМВ для оценки высот земной поверхности и лесного полога, формирование геоинформационных баз данных, оценка расхождений высот моделей для насаждений основных преобладающих древесных пород, оценка высот и запасов лесных насаждений, сравнение результатов для модельных территорий, относящихся к разным ландшафтам.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являлись три модельные территории, относящиеся к разным ландшафтам Ленинградской области. Выбранные участки сопоставимы по площади и количеству лесотаксационных выделов, но различаются по физико-географическим (ландшафтным) условиям и интенсивности лесохозяйственной деятельности [1, 3].

Бородинское участковое лесничество Северо-Западного лесничества относится к ландшафтному району Северо-Западное Приладожье (высоты 40–70 м, грядово-ложбинный тип рельефа, дочетвертичные породы – архейские и нижнепротерозойские гнейсы и граниты, преобладают сосновые типы лесов на подбурах, дерново-подбурах, дерново-глеевых почвах и буроземах). Лесоустройство проведено в 2024 г. (27509 га, 8501 выдел). Леса относятся к защитным, проводятся добровольно-выборочные и постепенные рубки. Значительные площади лесничества занимают молодняки и лесные культуры младших возрастов на местах массовых ветровалов 2010 г.

Лисинская часть Учебно-опытного лесничества (Лисинская часть УОЛ) расположена на стыке двух ландшафтных районов – Лужско-Оредежского (высоты 50–80 м, грядово-ложбинный тип рельефа, дочетвертичные породы – среднедевонские пески, доминируют березовые, осиновые и еловые типы лесов на подзолистых, дерново-подзолистых и болотных почвах) и Мгинского (высоты 40–60 м, камовый волнистый и озерно-ледниковый тип рельефа, дочетвертичные породы – верхнедевонские пески и ордовикские известняки, преобладают сосновые и березовые типы лесов на дерново-подзолистых и торфяно-подзолистых почвах). Большая часть лесов относится к ценным (леса, имеющие научное или историко-культурное значение). Лесоустройство проведено в 2022 г. (28855 га, 11873 выдела). Рубки спелых и перестойных насаждений в последние 15–20 лет практически не проводились.

Свирское участковое лесничество Лодейнопольского лесничества относится к Нижнесвирскому ландшафтному району (преобладающие высоты 10–20 м, озерно-ледниковый и древнеозерный тип рельефа, дочетвертичные породы – Верхнепротерозойские глины, верхнедевонские глины, мергели, доломиты, преобладают сосновые типы лесов на торфяно-подзолисто-глеевых, подзолистых и болотных почвах). Лесоустройство выполнено в 2017 г. (27415 га, 9786 выделов). Леса относятся к защитным, проводятся добровольно-выборочные и постепенные рубки.

Исходными пространственными данными для проведения исследования служили материалы лесоустройства (геоинформационные базы данных, лесные карты), фрагменты глобальных ЦМВ Copernicus DEM и FabDEM на изучаемые участки [22, 30], карта ландшафтного районирования Ленинградской области [1], материалы космической съемки открытого доступа.

Методика исследования включала следующие этапы:

– сбор и подготовка исходных пространственных данных с формированием геоинформационного (ГИС) проекта модельных территорий;

– формирование фрагментов ЦМВ на модельные территории, определение разницы высот между ЦМП и ЦМР (построение МВЛП),

– статистический анализ связи высоты лесного полога, определяемой на основе МВЛП, с характеристиками лесов.

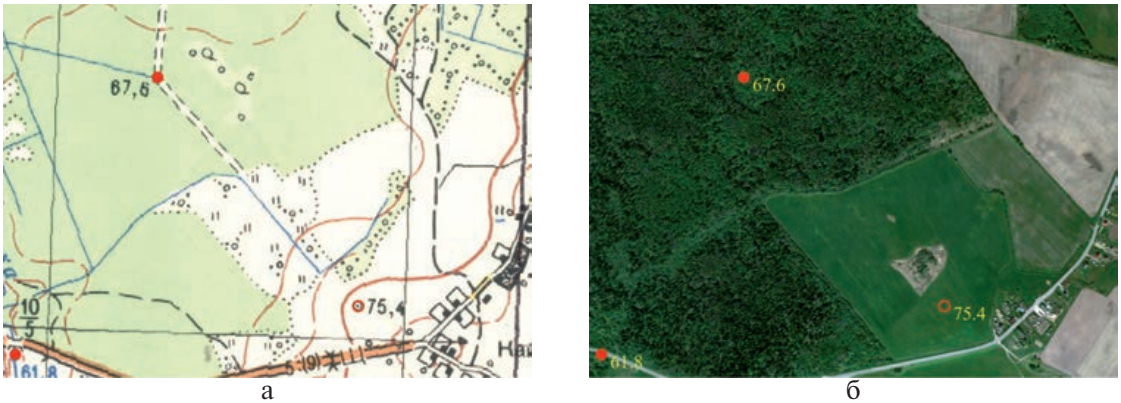
Сбор и обработка пространственных данных проводились средствами ГИС QGIS. Исходные повыдельные базы данных лесоустройства были экспортированы из ГИС WinGIS и системы обработки лесоустроительной информации WinPLP в формат *.shp. Статистическая обработка проводилась с помощью программ Statgraphics и MS Excel. Сравнение матриц высот моделей рельефа выполнялось средствами фотограмметрической цифровой станции Photomod [5].

Результаты и их обсуждение

Для Лисинской части УОЛ выполнена оценка расхождений высот ЦМР FabDEM с данными топографических карт масштаба 1:25000 [8]. Оценивались расхождения высот FabDEM с отметками высот, обозначенными на топографических картах, а также с высотами ЦМР, сформированными на основе топографических карт. На точечный векторный слой в ГИС были нанесены отметки высот, обозначенные на топографических картах (всего 461 шт.). Часть точек располагалась на открытой местности (110 шт.), часть – на участках, покрытых лесной растительностью (351 шт.). Для уточнения наличия древесно-кустарниковой растительности в отдельных точках использовались космические снимки открытого доступа (рис. 1).

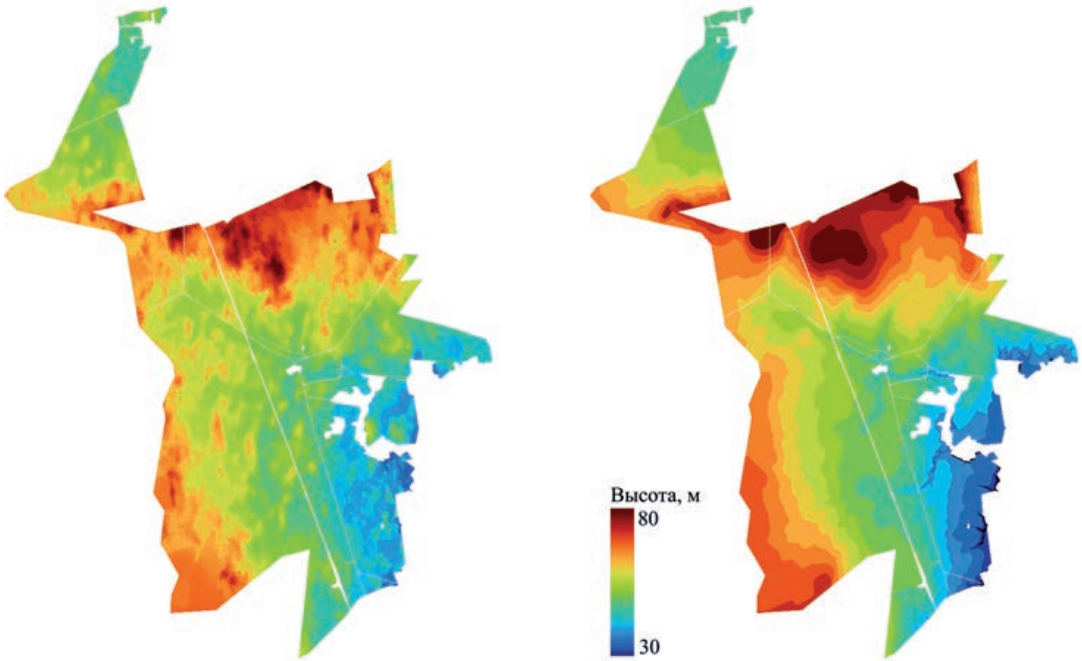
Вокруг векторных точек были сформированы буферные зоны диаметром 30 м и определены средние высоты по ЦМР FabDEM. Оценены расхождения высот между топографическими картами и ЦМР FabDEM. Средняя абсолютная ошибка (MAE) составила 1,79 м, средняя квадратическая ошибка (RMSE) – 2,33 м^2. Расхождения высот точек, расположенных на открытой местности, составили: (MAE) = 1,41 м (RMSE) = 2,03 м^2. Для точек, расположенных на участках, покрытых лесной растительностью, MAE = 1,91 м, RMSE = 2,42 м^2.

Также матрица высот ЦМР FabDEM (рис. 2а) была сопоставлена с матрицами высот трех ЦМР, построенных на основе топографических карт с помощью ГИС Saga [13] и ГИС QGIS с модулем Smart-Map [23]. При формировании ЦМР использовались методы ближайшего соседа – NN (Nearest Neighbor) (рис. 2б), взвешенного углового расстояния – ADW (Angular Distance Weighted) и одинарного кригинга – OK (Ordinary Kriging).



а б

Рис. 1. Выбор отметок высот для оценки качества ЦМР: а – выбор точек с отметками высот на топографической карте, б – определение наличия древесно-кустарниковой растительности по космической съемке (круг со сплошной заливкой – точка с древесно-кустарниковой растительностью, круг без заливки – точка на открытом участке местности)



а б

Рис. 2. Фрагменты ЦМР на территорию Лисинской части УОЛ: а – FabDEM, б – ЦМР методом ближайшего соседа (NN)

В таблице 1 показаны расхождения между матрицами высот ЦМР FabDEM и другими, построенными на основе топографических карт. Сравнение демонстрирует близость матрицы FabDEM ко всем вариантам с небольшим преимуществом ЦМР ADW.

Таблица 1

Результаты сравнения матриц высот ЦМР FabDEM с матрицами моделей рельефа на основе топографических карт

Показатели	Метод построения модели рельефа		
	ближайшего соседа (NN)	взвешенного углового расстояния (ADW)	одинарного кригинга (OK)
Среднее квадратическое отклонение (RMSE), м^2	2,58	2,58	2,63
Средняя погрешность (MAE), м	1,98	1,95	2,03
Среднее отклонение (MAD), м	–0,33	–0,18	0,24

Для трех модельных территорий на основе разницы ЦМВ Copernicus и FabDEM сформированы МВЛП. Для каждого векторного полигона (границ отдельного лесотаксационного выдела) определены средние значения высот. Теоретически для открытых участков (нелесных и не покрытых лесной растительностью лесных земель) высоты лесного полога должны стремиться к нулю, для участков, покрытых лесной растительностью, – к средней высоте насаждений. В таблице 2 показаны средние значения разницы высот основных категорий земель, определенные на основе МВЛП.

Таблица 2

Средние значения и средние квадратические отклонения разницы высот ЦМВ Copernicus и FabDEM для отдельных категорий земель

Категория земель (группа категорий земель)	Средние значения и средние квадратические отклонения высот на объектах, м		
	Бородинское участковое лесничество	Лисинская часть УОЛ	Свирское участковое лесничество
Озеро	–0,25 ± 2,2 (156)	0,47 ± 0,55 (2)	1,59 ± 1,27 (31)
Болото	1,56 ± 2,72 (311)	3,17 ± 1,86 (84)	2,91 ± 2,2 (398)
Сенокос	2,68 ± 2,58 (15)	1,40 ± 1,18 (32)	2,52 ± 2,48 (48)
Покрытые лесом	7,61 ± 3,75 (7205)	10,46 ± 3,04 (10620)	8,29 ± 2,91 (8047)

Примечание. В скобках указано количество выделов.

Результаты, приведенные в таблице 2, в целом достаточно близко характеризуют высоты рассматриваемых категорий земель всех модельных территорий. Средние значения разницы высот не покрытых лесной растительностью категорий отличаются от нуля из-за наличия древесно-кустарниковой растительности, возможных перепадов высот, а также погрешностей используемых глобальных моделей. Наиболее высокие значения разницы высот отмечаются на небольших по площади выделах нелесных земель. Эффект снижения средней разницы высот ЦМВ Copernicus и FabDEM с увеличением средней площади проиллюстрирован на рисунке 3. Средние значения разницы высот были определены для следующих категорий площадей (га): 0,1–2,5; 2,6–5; 5,1–7,5; 7,6–10,0; 10,1–12,5; 12,6–15; 15,1–17,5; 17,6–20,0 и более 20 га.

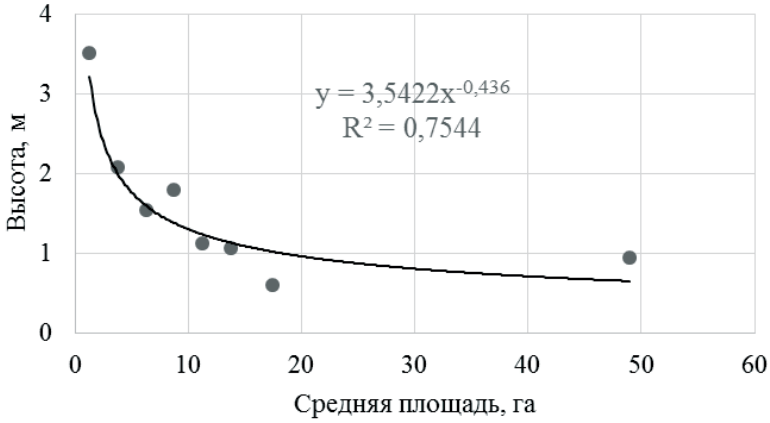
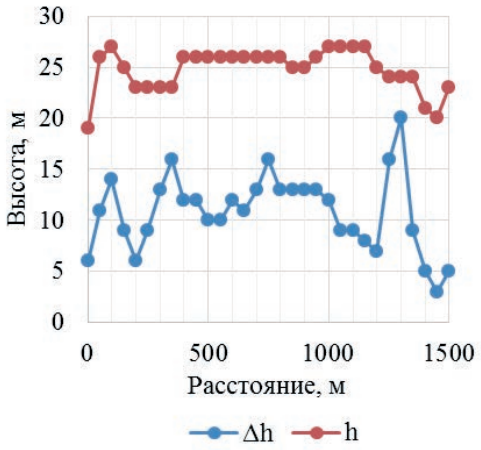


Рис. 3. Изменение средней разницы высот ЦМВ Copernicus и FabDEM в зависимости от средней площади выдела на примере болот Свирского участкового лесничества

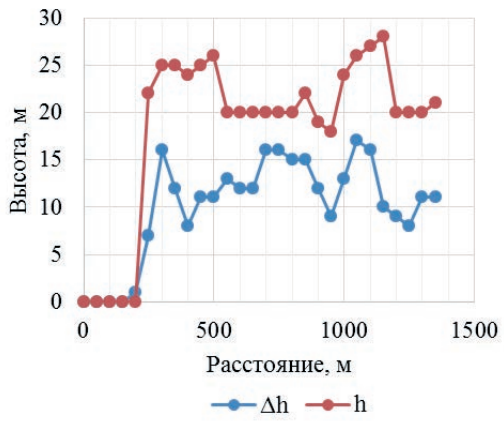
На рисунке 4 показаны профили высот двух фрагментов модельных территорий, на которых видны достаточно существенные расхождения высот лесного полога (разницы высот ЦМВ Copernicus и FabDEM) с высотами насаждений на покрытых лесом участках.

В публикациях, связанных с оценкой высоты лесного полога на основе ЦМВ SRTM [9, 17, 24], отмечается, что средняя высота центра фазы рассеяния располагается ниже средней высоты лесного полога и зависит от вида преобладающей древесной породы, состава и относительной полноты насаждения.

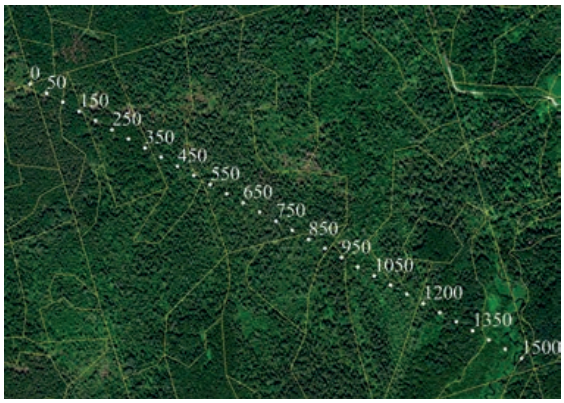
Оценены статистические связи между высотами лесного полога и таксационными характеристиками модельных территорий. В таблице 3 приведены регрессионные уравнения связи высот и запасов лесных насаждений с разницей высот МВЛП. Коэффициенты уравнений отражают соотношение значений зависимой и независимой переменных. Так для четырех основных лесообразующих пород всех модельных участков средняя высота МВЛП составляет 1,7–2,1 высоты насаждений



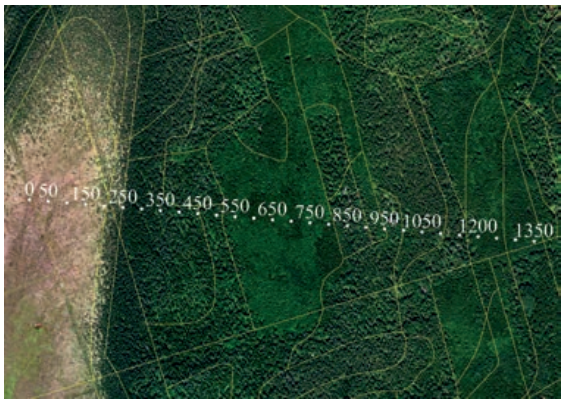
а



б



в



г

Рис. 4. Сравнение высот, полученных на основе разницы глобальных ЦМР Copernicus и FabDEM, с высотами лесных насаждений по материалам лесоустройства: а и в – профиль в кв. 100 Лисинского участкового лесничества, б и г – профиль в кв. 156 Кастенского участкового лесничества (Лисинская часть УОЛ)

Таблица 3

Регрессионные уравнения зависимостей средней высоты $\bar{h}$ (м) и среднего запаса $\bar{M}$ (м³/га) насаждений основных лесообразующих пород от средней высоты центра фазы рассеяния $\bar{h}_S$ (м). В скобках указано количество выделов (шт.)

Земли, покрытые лесной растительностью	Преобладающая древесная порода			
	Сосна	Ель	Береза	Осина
Бородинское участковое лесничество				
$h = 1{,}85h_s$ $R^2 = 74{,}95\%$ (7203)	$h = 1{,}81h_s$ $R^2 = 78{,}19\%$ (3598)	$h = 1{,}88h_s$ $R^2 = 76{,}25\%$ (1486)	$h = 1{,}95h_s$ $R^2 = 65{,}69\%$ (1920)	$h = 2{,}06h_s$ $R^2 = 73{,}34\%$ (90)
$\bar{M} = 18{,}16h_s$ $R^2 = 76{,}12\%$ (7203)	$\bar{M} = 20{,}85h_s$ $R^2 = 75{,}74\%$ (3598)	$\bar{M} = 21{,}93h_s$ $R^2 = 77{,}59\%$ (1486)	$\bar{M} = 15{,}19h_s$ $R^2 = 62{,}89\%$ (1920)	$\bar{M} = 19{,}08h_s$ $R^2 = 73{,}3\%$ (90)
Лисинская часть УОЛ				
$h = 1{,}86h_s$ $R^2 = 89{,}74\%$ (10608)	$h = 1{,}90h_s$ $R^2 = 90{,}25\%$ (2797)	$h = 1{,}79h_s$ $R^2 = 89{,}88\%$ (3898)	$h = 1{,}81h_s$ $R^2 = 90{,}42\%$ (2494)	$h = 2{,}07h_s$ $R^2 = 90{,}14\%$ (1233)
$\bar{M} = 20{,}51h_s$ $R^2 = 89{,}39\%$ (10608)	$\bar{M} = 20{,}86h_s$ $R^2 = 91{,}48\%$ (2797)	$\bar{M} = 21{,}45h_s$ $R^2 = 89{,}65\%$ (3898)	$\bar{M} = 17{,}33h_s$ $R^2 = 89{,}77\%$ (2494)	$\bar{M} = 22{,}74h_s$ $R^2 = 90{,}18\%$ (1233)
Свирское участковое лесничество				
$h = 1{,}82h_s$ $R^2 = 86{,}54\%$ (8046)	$h = 1{,}84h_s$ $R^2 = 85{,}69\%$ (4251)	$h = 1{,}85h_s$ $R^2 = 88{,}21\%$ (1335)	$h = 1{,}72h_s$ $R^2 = 85{,}80\%$ (2029)	$h = 1{,}89h_s$ $R^2 = 90{,}51\%$ (397)
$\bar{M} = 19{,}12h_s$ $R^2 = 85{,}0\%$ (8046)	$\bar{M} = 19{,}80h_s$ $R^2 = 85{,}57\%$ (4251)	$\bar{M} = 22{,}20h_s$ $R^2 = 87{,}58\%$ (1335)	$\bar{M} = 15{,}60h_s$ $R^2 = 84{,}09\%$ (2029)	$\bar{M} = 19{,}80h_s$ $R^2 = 91{,}07\%$ (397)

Также построены регрессионные уравнения связи высот сосновых насаждений с разницей высот лесного полога (высоты центра фазы рассеяния) в зависимости от групп возраста (табл. 4).

Сосновые насаждения преобладают по площади в Свирском и Бородинском участковых лесничествах, в Лисинской части УОЛ они занимают второе место после еловых. В целом для всех модельных территорий отмечается общая тенденция – с увеличением группы возраста соотношение высоты лесного полога и высоты насаждения по материалам лесоустройства изменяется от 1:1 в возрасте молодняков до 1:2 в перестойных насаждениях.

С помощью дисперсионного анализа оценены расхождения высот лесного полога хвойных насаждений 2-го и 3-го классов бонитета (как доминирующих по площади на всех модельных территориях) по группам возраста (табл. 5). Рассматривались насаждения с долей преобладающей породы в составе от 8 единиц и выше.

Таблица 4

Регрессионные уравнения зависимостей средней высоты $\bar{h}$ (м) сосновых насаждений от средней высоты центра фазы рассеяния $\bar{h}_S$ (м)

Группа возраста насаждений				
Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые	Перестойные
Бородинское участковое лесничество				
$h = 0.70h_s$ $R^2 = 62.24\%$ (239)	$h = 1.43h_s$ $R^2 = 64.13\%$ (299)	$h = 1.75h_s$ $R^2 = 71.62\%$ (900)	$h = 1.90h_s$ $R^2 = 82.90\%$ (2147)	$h = 1.84h_s$ $R^2 = 88.12\%$ (11)
Лисинская часть УОЛ				
$h = 1.15h_s$ $R^2 = 60.16\%$ (129)	$h = 1.66h_s$ $R^2 = 91.33\%$ (421)	$h = 1.75h_s$ $R^2 = 93.34\%$ (555)	$h = 1.92h_s$ $R^2 = 91.23\%$ (918)	$h = 2.14h_s$ $R^2 = 89.86\%$ (774)
Свирское участковое лесничество				
$h = 1.07h_s$ $R^2 = 70.11\%$ (510)	$h = 1.75h_s$ $R^2 = 83.90\%$ (1698)	$h = 1.95h_s$ $R^2 = 88.67\%$ (1308)	$h = 1.97h_s$ $R^2 = 88.15\%$ (737)	$h = 2.19h_s$ $R^2 = 86.35\%$ (12)

Примечание. В скобках указано количество выделов, шт.

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа средних значений высот лесного полога по модельным территориям

Преобладающая порода и класс бонитета	Группа возраста насаждений			
	Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые
Сосна, 2-й класс	-	-	1–2 – 3 (30,45)	1, 3–2 (7,11)
Сосна, 3-й класс	-	1, 3–2 (4,11)	1, 3–2 (10,37)	1, 3–2 (24,75)
Ель, 2-й класс	-	-	-	-
Ель, 3-й класс	1, 2–3 (5,55)	-	-	1–2, 3 (8,41)

Примечания. В ячейках таблицы указаны результаты множественного рангового теста отличий средних значений высоты лесного полога. Номера модельных территорий: 1 – Бородинское участковое лесничество, 2 – Лисинская часть УОЛ, 3 – Свирское участковое лесничество. Знак «–» между номерами обозначает значимое отличие средних. Знак «,» означает отсутствие значимого отличия. В скобках приведены значения критерия Фишера (F-value). Уровень значимости дисперсионного анализа (p-value) для всех указанных комбинаций менее 0,05

Статистически значимые отличия высоты лесного полога для всех модельных территорий отмечены только в одном случае (приспевающие сосновые насаждения 2-го класса бонитета). Для еловых насаждений 2-го класса бонитета различий высот между модельными территориями не обнаружено. Установлены случаи отличия средних высот отдельных групп насаждений отдельных территорий. Возможными причинами таких локальных отличий могут быть особенности условий местопроизрастания, отражающиеся на характере поверхности лесного полога, вариациях его плотности, высоты и состава.

Заключение

На примере Лисинской части УОЛ выполнена оценка расхождений высот ЦМР FabDEM с отметками высот, обозначенными на топографических картах. Средняя абсолютная ошибка (MAE) по всем выбранным точкам составила 1,79 м, средняя квадратическая ошибка (RMSE) = 2,33 м^2. Также фрагмент ЦМР FabDEM был сопоставлен с тремя ЦМР, построенными на основе топографических карт. Минимальные значения ошибок были получены для ЦМР, построенной методом взвешенного углового расстояния. Полученные значения оценок качества модели FABDEM указывают на перспективы ее использования для решения широкого круга задач – изучения структуры и продуктивности лесов и лесных ландшафтов, планирования лесозаготовок, строительства лесных дорог, анализа водосборных бассейнов, расчёта стока поверхностных вод, доступности участков, моделирования распространения лесных пожаров и других.

Получены регрессионные уравнения связи высоты лесного полога с высотами и запасами лесных насаждений основных лесообразующих пород. Важно отметить, что если отметки высот ЦМР FabDEM незначительно отличаются от отметок высот на топографических картах, то поверхность ЦМВ Copernicus значительно отстоит от поверхности лесного полога. Следовательно, высота лесного полога, определяемая разницей моделей Copernicus и FabDEM, не соответствует истинной. Для сосновых насаждений соотношение высоты лесного полога с высотой насаждений по данным таксации меняется от 1:1 в возрасте молодняков до 1:2 в перестойных насаждениях.

В результате дисперсионного анализа установлены только единичные случаи значимых различий высот лесного полога между модельными территориями. Можно предположить, что причиной данных различий являются локальные ландшафтные свойства модельных территорий, а не особенности используемых глобальных моделей высот.

Продемонстрированные возможности применения ЦМР FabDEM подтверждают пригодность данной модели для оценки высот и запасов лесных насаждений в разных ландшафтных районах Ленинградской области. Продемонстрированный в исследовании подход может использоваться при упрощенных оценках характеристик лесов на значительных территориях. Применение глобальной ЦМР FabDEM для характеристики рельефа лесных ландшафтов перспективно для практической деятельности и лесной науки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атлас Ленинградской области / гл. ред. Д.А. Субетто. – СПб. : Издательство РГПУ им. А.И. Герцена, 2022. – 112 с.

2. Колбовский, Е.Ю. Пространственный анализ в геоэкологии / Е.Ю. Колбовский. – М. : МГУ, 2022. – 820 с.

3. Лесохозяйственные регламенты [Электронный ресурс]. – URL: https://kpr.lenobl.ru/ru/deiatelnost/lesopolzovanie/informaciya-o-lesah-glavnaja/proekty-lesohozyajstvennyh-reglamentov/ (дата обращения: 22.05.2026).

4. Медведев, Е.М. Лазерная локация земли и леса : учебное пособие / Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Геолидар, Геокосмос; Красноярск : Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.

5. Ракурс. ЦФС PHOTOMOD [Электронный ресурс] // Ракурс: сайт. 2020. URL: https://racurs.ru/program-products/tsfs-photomod/ (дата обращения: 22.05.2026).

6. Толкач, И.В. Формирование цифровой модели высот древостоев с использованием цифровой фотограмметрической системы Photomod / И.В. Толкач, Л.А. Мицевич, О.В. Кравченко // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. – 2020. – № 2 (234). – С. 22–26.

7. Флоринский, И.В. Геоморфометрия сегодня / И.В. Флоринский // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 394–447. – DOI: 10.35595/2414–9179–2021–2-27–394–448.

8. Хлебникова, Т.А. Моделирование и пространственный анализ в ГИС. Цифровое моделирование рельефа в ГИС «Панорама» : учебно-методическое пособие / Т.А. Хлебникова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – 70 с.

9. Черниховский, Д.М. Определение средних высот и запасов древостоев на основе обработки информации топографической радарной съёмки, цифровых моделей рельефа и ГИС технологий / Д.М. Черниховский, А.С. Алексеев // Труды СПИИРАН. – 2019. – Т. 18, № 2. – С. 416–443. DOI: 10.15622/sp.18.2.416–443.

10. Чимитдоржиев, Т.Н. К вопросу о точности определения высоты леса по данным радиолокационной интерферометрии TanDEM-X / Т.Н. Чимитдоржиев, М.Е. Быков, Ю.И. Кантемиров [и др.] // Сибирский лесной журнал. – 2016. – № 4. – С. 128–133. – DOI: 10.15372/SJFS20160413.

11. Чимитдоржиев, Т.Н. Технология количественной оценки высоты леса по данным космических радарных тандемных интерферометрических съемок со спутников TerraSAR-X/TanDEM-X / Т.Н. Чимитдоржиев, М.Е. Быков, Ю.И. Кантемиров [и др.] // Геоматика. – 2014. – № 1. – С. 72–79.

12. Avtar, R. Use of DEM data to monitor height changes due to deforestation / R. Avtar, H. Sawada // Arabian Journal of Geosciences. – 2013. – Vol. 6, no. 12. – P. 4859–4871. – DOI: 10.1007/s12517–012–0768–2.

13. Conrad, O. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 / O. Conrad, B. Bechtel, M. Bock [et al.] // Geosci. Model Dev. – 2015. – Vol. 8. – P. 1991–2007. – DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-8–1991–2015.

14. Gallant, J.C. Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models / J.C. Gallant, A.M. Read, T.I. Dowling // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2012. – Vol. 39, no. 14. – P. 275–280. – DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4–275–2012.

15. Hawker, L. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed / L. Hawker, P. Uhe, J. Neal [et al.] // Environmental Research Letters. – 2022. – Vol. 17, no. 2. – P. 024016. – DOI: 10.1088/1748–9326/ac4d4f.

16. Kangas, A. Remote sensing and forest inventories in Nordic countries – roadmap for the future / A. Kangas, R. Astrup, J. Breidenbach [et al.] // Scandinavian Journal of Forest Research. – 2018. – Vol. 33, no. 4. – P. 397–412. – DOI: https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1416666.

17. Kellndorfer, J. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets / J. Kellndorfer, W. Walker, L. Pierce [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2004. – Vol. 93, no. 3. – P. 339–358. – DOI: 10.1016/j.rse.2004.07.017.

18. Lang, N. A high-resolution canopy height model of the Earth / N. Lang, W. Jetz, K. Schindler [et al.] // Nature Ecology and Evolution. – 2023. – Vol. 7, no. 11. – P. 1778–1789. – DOI: 10.1038/s41559–023–02206–6.

19. Maltamo, M. Forestry applications of airborne laser scanning. Concepts and case studies / M. Maltamo, E. Naesset, J. Vauhkonen. – Springer, Helsinki, 2014. – 464 p. – DOI: 10.1007/978–94–017–8663–8.

20. Miliaresis, G. Effects of percent tree canopy density and DEM misregistration on SRTM/NED vegetation height estimates / G. Miliaresis, D. Delikaraoglou // Remote Sensing. – 2009. – Vol. 1, no. 2. – P. 36–49. – DOI: 10.3390/rs1020036. – EDN PMNBZD.

21. Moudry, V. Comparison of three global canopy height maps and their applicability to biodiversity modeling: Accuracy issues revealed / V. Moudry, L. Gabor, S. Marselis [et al.] // Ecosphere. – 2024. – Vol. 15, no. 10. – DOI: 10.1002/ecs2.70026.
22. OpenTopography. Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model. [Электронный ресурс]. – URL: https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3 (дата обращения: 22.05.2026).
23. Pereira, G.W. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging / G.W. Pereira, D.S.M. Valente, D.M.De. Queiroz [et al.] // Agronomy. – 2022. – Vol. 12, no. 6. – Art. 1350. – DOI: 10.3390/agronomy12061350.
24. Sexton, J.O. A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America / J.O. Sexton, T. Bax, P. Siqueira [et al.] // Forest Ecology and Management. – 2009. – Vol. 257. – P. 1136–1147.
25. Sun, G. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter / G. Sun, K.J. Ranson, V.I. Kharuk [et al.] // Remote Sensing of Environment. – 2003. – Vol. 88, no. 4. – P. 401–411. – DOI: 10.1016/j.rse.2003.09.001.
26. Ullah, S. Comparing Airborne Laser Scanning, and Image-Based Point Clouds by Semi-Global Matching and Enhanced Automatic Terrain Extraction to Estimate Forest Timber Volume / S. Ullah, M. Dees, P. Datta [et al.] // Forests. – 2017. – Vol. 8, no. 215. – P. 1–15. – DOI: https://doi.org/10.3390/f8060215.
27. Ullah, S. Comparing imagebased point clouds and airborne laser scanning data for estimating forest heights / S. Ullah, P. Adler, M. Dees [et al.] // iForest. Biogeosciences and Forestry. – 2017. – 9 p. – DOI: https://doi.org/10.3832/ifor2077–009.
28. Ullah, S. Comparing the potential of stereo aerial photographs, stereo very high-resolution satellite images, and TanDEM-X for estimating forest height / S. Ullah, M. Dees, P. Datta [et al.] // International Journal of Remote Sensing. – 2020. – Vol. 41, no. 18. – P. 6976–6992. – DOI: 10.1080/01431161.2020.1752414.
29. Ullah, S. Potential of Modern Photogrammetry Versus Airborne Laser Scanning for Estimating Forest Variables in a Mountain Environment / S. Ullah, M. Dees, P. Datta [et al.] // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, no. 6. – Art. 0661. – DOI: https://doi.org/10.3390/rs11060661.
30. University of Bristol. FABDEM V 1–2. [Электронный ресурс]. – URL: https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn (дата обращения: 22.05.2026).
31. Ye, Z. L-Band Synthetic Aperture Radar and Its Application for Forest Parameter Estimation, 1972 to 2024: A Review / Z. Ye, J. Long, T. Zhang [et al.] // Plants. – 2024. – Vol. 13, no. 17. – P. 2511. – DOI: 10.3390/plants13172511.
32. Zhang, Z. Estimation of forest structural parameters from lidar and SAR data / Z. Zhang, W. Ni, A. Fu [et al.] // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – ISPRS Archives: 21, Beijing, July 3–11, 2008. 03–11 июля 2008 года. – Beijing, 2008. – P. 1121–1126.
33. Zielewska-Büttner, K. Automated detection of forest gaps in spruce dominated stands using canopy height models derived from stereo aerial imagery / K. Zielewska-Büttner, P. Adler, M. Ehmann [et al.] // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, no. 175. – DOI: https://doi.org/10.3390/rs8030175.
34. Zielewska-Büttner, K. Parameters influencing forest gap detection using canopy height models derived from stereo aerial imagery / K. Zielewska-Büttner, P. Adler, M. Petersen [et al.] / Conference: Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF. At Bern, Schweiz., – 2016. – Vol. 25. – P. 405–409.

REFERENCES

1. Atlas of the Leningrad Region / Editor-in-Chief D.A. Subetto. St. Petersburg, Herzen State Pedagogical University of Russia Publishing House, SPb, 2022, 112 p. (In Russian).

2. Kolbovsky E.Yu. Spatial analysis in geoecology. Moscow, MSU, 2022, 820 p. (In Russian).

3. Forestry regulations. [Electronic resource]. URL: https://kpr.lenobl.ru/ru/deiatelnost/lesopolzovanie/informaciya-o-lesah-glavnaja/proekty-lesohozyajstvennyh-reglamentov/ (accessed: 22.05.2026). (In Russian).

4. Medvedev E.M., Danilin I.M., Melnikov S.R. Laser Ranging of Land and Forests: A Textbook. 2nd ed. revised and expanded. Moscow, Geolidar, Geokosmos; Krasnoyarsk, V.N. Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 230 p. (In Russian).

5. Rakurs. TSFS PHOTOMOD [Electronic resource]. Perspective, website. URL: https://racurs.ru/program-products/tsfs-photomod/ (accessed: 22.05.2026). (In Russian).

6. Tolkach I.V., Mitsevich L.A., Kravchenko O.V. Generation of a digital tree-stand height model using the Photomod digital photogrammetric system. *Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources [Trudy BGTU. Series 1: Lesnoe khozyajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyaemykh resursov],* 2020, no. 2 (234), pp. 22–26. (In Russian).

7. Florinsky I.V. Geomorphometry Today. *InterCarto. InterGIS [InterKarto. InterGIS]*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 394–447. DOI: 10.35595/2414–9179–2021–2-27–394–448. (In Russian).

8. Khlebnikova T.A. Modeling and Spatial Analysis in GIS. Digital Terrain Modeling in "Panorama" GIS. A Teaching Aid. Novosibirsk, SSUGT, 2018, 70 p. (In Russian).

9. Chernikhovsky D.M., Alekseev A.S. Determination of average heights and growing stock of forest stands based on the processing of topographic radar survey data, digital elevation models, and GIS technologies. *Proceedings of SPIIRAS [Trudy SPIIRAN]*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 416–443. DOI: 10.15622/sp.18.2.416–443. (In Russian).

10. Chimitdorzhiev T.N., Bykov M.E., Kantemirov Yu.I., Kirbizhekova I.I., Labarov B.B., Baltukhaev A.K. On the accuracy of forest height estimation using TanDEM-X radar interferometry data. *Siberian Journal of Forest Science [Sibirskij lesnoj zhurnal]*, 2016, no. 4. pp. 128–133. DOI: 10.15372/SJFS20160413. (In Russian).

11. Chimitdorzhiev T.N., Bykov M.E., Kantemirov Yu.I., Kholets F., Barbieri M. Technology for estimating forest height using spaceborne radar tandem interferometric data from TerraSAR-X/TanDEM-X satellites. *Geomatics [Geomatika]*, 2014, no. 1, pp. 72–79. (In Russian).

12. Avtar R., Sawada H. Use of DEM data to monitor height changes due to deforestation. *Arabian Journal of Geosciences*, 2013, vol. 6, no. 12, pp. 4859–4871, DOI: 10.1007/s12517–012–0768–2.

13. Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Böhner J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development,* 2015, vol. 8, pp. 1991–2007, DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-8–1991–2015.

14. Gallant J.C., Read A.M., Dowling T.I. Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, vol. 39, no. 14, pp. 275–280. DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4–275–2012.

15. Hawker L., Uhe P., Neal J., Paulo L., Sosa J., Savage J., Sampson C. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, no. 2, p. 024016. DOI: 10.1088/1748–9326/ac4d4f.

16. Kangas A., Astrup R., Breidenbach J., Fridman J., Gobakken T., Korhonen K.T., Maltamo M., Nilsson M., Nord-Larsen T., Næsset E., Olsson H. Remote sensing and forest inventories in Nordic countries – roadmap for the future. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 397–412. DOI: https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1416666.

17. Kellndorfer J., Walker W., Pierce L., Dobson C., Fites J.A., Hunsaker C., Vona J., Clutter M. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sensing of Environment*, 2004, vol. 93, no. 3, pp. 339–358. DOI: 10.1016/j.rse.2004.07.017.

18. Lang N., Jetz W., Schindler K., Wegner Ja.D. A high-resolution canopy height model of the Earth. Nature *Ecology and Evolution*, 2023, vol. 7, no. 11, pp. 1778–1789. DOI: 10.1038/s41559–023–02206–6.

19. Maltamo M., Naesset E., Vauhkonen J. Forestry applications of airborne laser scanning. Concepts and case studies. M. Maltamo, Helsinki, 2014, 464 p. DOI: 10.1007/978–94–017–8663–8.

20. Miliaresis G., Delikaraoglou D. Effects of percent tree canopy density and DEM misregistration on SRTM/NED vegetation height estimates. *Remote Sensing*, 2009, vol. 1, no. 2, pp. 36–49. DOI: 10.3390/rs1020036.

21. Moudry V., Gabor L., Marselis S., Pracna P., Bartak V., Prosek J., Navratilova B., Novotny J., Potuckova M., Gdulova K., Crespo-Peremarch P., Komarek J., Malavasi M., Rocchini D., Ruiz L.A., Torralba J., Torresani M., Gatti R.C., Wild J. Comparison of three global canopy height maps and their applicability to biodiversity modeling: Accuracy issues revealed. *Ecosphere*, 2024, vol. 15, no. 10. DOI: 10.1002/ecs2.70026.

22. OpenTopography. Copernicus GLO-30 Digital Elevation Model. [Electronic resource]. URL: https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3 (accessed: 22.05.2026).

23. Pereira G.W., Valente D.S.M., Queiroz D.M.De.,_Freitas Coelho A.L.De, Costa M.M., Grift T. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. *Agronomy,* 2022, vol. 12, no. 6, art. 1350. DOI: 10.3390/agronomy12061350.

24. Sexton J.O., Bax T., Siqueira P., Swensona J.J., Hensley S. A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America. *Forest Ecology and Management*, 2009, vol. 257, pp. 1136–1147.

25. Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*, 2003, vol. 88, no. 4, pp. 401–411. DOI: 10.1016/j.rse.2003.09.001.

26. Ullah S., Dees M., Datta P., Adler P., Koch B. Comparing Airborne Laser Scanning, and Image-Based Point Clouds by Semi-Global Matching and Enhanced Automatic Terrain Extraction to Estimate Forest Timber Volume. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 215, pp. 1–15. DOI: https://doi.org/10.3390/f8060215.

27. Ullah S., Adler P., Dees M., Datta P., Weinacker H., Koch B. Comparing imagebased point clouds and airborne laser scanning data for estimating forest heights. *iForest. Biogeosciences and Forestry,* 2017, 9 p. DOI: https://doi.org/10.3832/ifor2077–009.

28. Ullah S., Dees M., Datta P., Adler P., Saeed T., Sadiq M., Koch B. Comparing the potential of stereo aerial photographs, stereo very high-resolution satellite images, and TanDEM-X for estimating forest height. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, vol. 41, no. 18, pp. 6976–6992. DOI: 10.1080/01431161.2020.1752414.

29. Ullah S., Dees M., Datta P., Adler P., Schardt M., Koch B. Potential of Modern Photogrammetry Versus Airborne Laser Scanning for Estimating Forest Variables in a Mountain Environment. *Remote Sensing,* 2019, vol. 11, no. 6, art. 0661. DOI: https://doi.org/10.3390/rs11060661.

30. University of Bristol. FABDEM V 1–2. [Electronic resource]. URL: https://data.bris.ac.uk/data/dataset/s5hqmjcdj8yo2ibzi9b4ew3sn (accessed: 22.05.2026).

31. Ye Z., Long J., Zhang T., Lin B., Lin H. L-Band Synthetic Aperture Radar and Its Application for Forest Parameter Estimation, 1972 to 2024: A Review. *Plants*, 2024, vol. 13, no. 17, p. 2511. DOI: 10.3390/plants13172511.

32. Zhang Z., Ni W., Fu A., Guo Z., Wang D., Sun G. Estimation of forest structural parameters from lidar and SAR data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* – ISPRS Archives: 21, Beijing, July 3–11, 2008, Beijing, pp. 1121–1126.

33. Zielewska-Büttner K., Adler P., Ehmannm M., Braunisch V. Automated detection of forest gaps in spruce dominated stands using canopy height models derived from stereo aerial imagery. *Remote Sensing*, 2016, vol. 8, no. 175. DOI: https://doi.org/10.3390/rs8030175.

34. Zielewska-Büttner K., Adler P., Petersen M., Braunisch V. Parameters influencing forest gap detection using canopy height models derived from stereo aerial imagery. *Conference: Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF*. At Bern, Schweiz., 2016, vol. 25, pp. 405–409.

Статья поступила в редакцию 01.06.2026