

Д.М. ЧЕРНИХОВСКИЙ, А.С. АЛЕКСЕЕВ  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ ВЫСОТ И ЗАПАСОВ ДРЕВОСТОЕВ  
НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ  
ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ РАДАРНОЙ СЪЁМКИ, ЦИФРОВЫХ  
МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА И ГИС ТЕХНОЛОГИЙ**

*Черниковский Д.М., Алексеев А.С. Определение средних высот и запасов древостоев на основе обработки информации топографической радарной съёмки, цифровых моделей рельефа и ГИС технологий.*

Аннотация. Рассмотрены возможности использования глобальных моделей высот рельефа SRTM (Shuttle radar topographic mission — радарная топографическая съёмка) для оценки обобщенных характеристик лесных насаждений — средних высот и запасов. Известно, что при выполнении радарных съёмок растительный покров препятствует корректному определению высоты земной поверхности. Поверхность, фиксируемая датчиками над покрытой лесом территорией (фаза рассеяния), располагается в верхней части древесного полога. Обзор публикаций подтверждает актуальность данного направления исследований в мире. На основе обзора литературы приведены краткие теоретические основы съёмки SRTM, рассмотрены факторы, определяющие значения высот и связанные с ними ошибки, указана возможность определения высоты лесного полога на основе моделей высот.

В качестве модельной территории выбрана часть Учебно-опытного лесничества Ленинградской области. Исходными материалами для выполнения исследования служили геоинформационные базы данных лесоустройства, данные радарной съёмки SRTM и топографические карты. Модельная территория разбита регулярной сетью на ячейки с шагом 1 км. Большая часть территории относится к площади, покрытой лесной растительностью. Моделирование рельефа выполнено на основе оцифрованных топографических карт масштаба 1:25000 путем интерполяции методом TIN. Выполнено визуальное и статистическое сравнение двух моделей высот — модели поверхности (на основе данных радарной съёмки SRTM) и модели рельефа (на основе топографических карт). С помощью построения профилей выполнена оценка характера изменений высот моделей рельефа и поверхности. Отмечено, что для большей части модельной территории расхождения высот между моделями поверхности и рельефа составляют 15–20 м. Сближение графиков высот отмечается на участках, не покрытых лесной растительностью.

Получен набор линейных регрессионных зависимостей между средними высотами центра фазы рассеяния (независимая переменная) и средними высотами или запасами насаждений (зависимая переменная) в пределах границ лесотаксационных выделов, сгруппированных по преобладающим породам. Выявлено влияние на тесноту связи и значение коэффициента регрессии величины относительной полноты, коэффициента состава, преобладающей древесной породы.

Установленные закономерности могут использоваться в целях совершенствования теории и практики инвентаризации лесов, а также для решения иных задач, связанных с оценкой природных ресурсов на региональном и глобальном уровнях (национальная инвентаризация лесов, определение запасов углерода, оценка биомассы).

**Ключевые слова:** лесоустройство, цифровая модель рельефа, цифровая модель поверхности, высота центра фазы рассеяния, регрессионный анализ.

**1. Введение.** Необходимость развития дистанционных методов в лесном хозяйстве Российской Федерации определяется высоким спросом на информацию о лесах, колоссальными размерами покрытой лесом территории, слабо развитой лесной инфраструктурой и значительным

многообразием природных ландшафтов. Совершенствование характеристик материалов дистанционного зондирования и появление новых типов пространственных данных открывает новые возможности для управления природными ресурсами, в том числе для решения задач учета и управления лесами. Можно выделить несколько актуальных направлений развития и применения дистанционных методов в лесном хозяйстве: проведение фундаментальных исследований отображения характеристик лесов на материалах дистанционного зондирования [1-4]; картографирование растительности с изучением структуры и состояния растительных сообществ [5-9]; изучение процессов лесовосстановления [10]; оценка динамики природных и антропогенных ландшафтов [11, 12]; определение отдельных лесотаксационных характеристик [9, 13], оценка лесопатологического состояния [14]. Значительное количество исследований направлено на разработку методик практического применения современных материалов дистанционного зондирования для решения задач лесного хозяйства. Для решения задач инвентаризации лесов рассматриваются материалы аэрофотосъемки [3, 4, 15-17], космической съемки [1, 2, 5, 8, 9, 18], лидарной съемки [19-21]. Определенную нишу для исследований представляет изучение моделей высот лесного полога, получаемых на основе различных видов съемок [22-24].

Для изучения лесных ландшафтов на значительных по площади территориях представляется перспективным использование глобальных цифровых моделей высот (ЦМВ) свободного доступа. Преимуществами данных моделей высот являются их доступность (по сравнению с топографическими картами и высокоточными моделями высот, реализуемыми на коммерческой основе), приемлемая для решения многих задач точность, значительный (глобальный) пространственный охват и цифровая форма представления, удобная для обработки современными программными средствами. Глобальные ЦМВ строятся в основном по данным стереоскопической оптической и интерферометрической радиолокационной космической съёмок. Среди глобальных моделей высот (описывающих всю или почти всю поверхность земного шара) есть как бесплатные, находящиеся в свободном доступе в сети Интернет (GMTED 2010, ASTER GDEM2, SRTM C-band, SRTM X-band), так и распространяемые на коммерческой основе (SPOT DEM, NextMap World 30, NextMap, TanDEM-X Global DEM, World 3D Topographic Data). Глобальные модели высот представляют собой ценные пространственные данные, потенциально пригодные для решения многих задач, в том числе задач, связанных с инвентаризацией и управлением лесами.

Значительное внимание исследователей уделяется определению точностных характеристик модели SRTM, сравнению SRTM с иными

моделями высот или результатами наземных съемок, оценке возможностей использования модели для создания топографических карт [25]. Интерес к использованию глобальных цифровых моделей высот для изучения лесов связан с возможностью определения на их основе многочисленных морфометрических характеристик рельефа (направление и крутизна склонов, показатели кривизны, конвергенции и дивергенции, размеры водосборов, индексы инсоляции и влажности почв). Инструментами для определения и анализа морфометрических характеристик рельефа могут служить специальные геоинформационные системы, например SagaGIS [26, 27]. Теоретические основы математического моделирования и анализа рельефа, а также изучения взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем изучаются средствами геоморфометрии (geomorphometry). Методы геоморфометрии широко используются для решения задач геоморфологии, гидрологии, почвоведения, геоботаники, геологии, гляциологии, океанологии, климатологии и других наук о Земле [28]. Представление о предмете изучения, современном состоянии и перспективах развития геоморфометрии можно получить из ряда обзорных публикаций [28-30].

В публикациях, связанных с оценкой взаимосвязей характеристик рельефа с характеристиками лесов, упоминаются следующие морфометрические характеристики рельефа: абсолютная высота [31], среднее квадратическое отклонение и энтропия высот [32], значения уклона, экспозиции склонов и кривизны поверхности [33], абсолютной высоты, кривизны поверхности, формы и экспозиции склонов [34], набор морфометрических характеристик рельефа, определяемых на основе свободных ЦМР [35-38].

Важно отметить, что модели высот, получаемые на основе радарных съемок, относятся не к моделям рельефа (DTM), а к моделям поверхности (DSM). Это характерно для моделей высот, получаемых с помощью оптических, радарных, лидарных и аэрофотосъемок [30]. Модели рельефа (DTM) могут быть получены на основе материалов наземных съемок, GPS-позиционирования, топографических карт. Преимуществами моделей высот, получаемых на основе использования сканирующих устройств воздушного или спутникового базирования (радарные или лидарные съемки), являются очень высокая плотность получаемых данных и регулярность выборки. Поэтому модели поверхности (DSM) более точны в изображении мезо- и микрорельефа по сравнению с иными моделями [30]. Изображения SRTM демонстрируют чувствительность датчика к топографическим

особенностям местности, таким как дренажные сети и холмистый рельеф, а также к особенностям пространственного распределения растительности [39]. С другой стороны, использование материалов подобных съемок может приводить к ошибкам измерений, определяемым физическими ограничениями приборов (радаров и лидаров). С учетом того, что получаемые модели высот отражают не саму земную поверхность, а поверхность объектов, расположенных над ней, для анализа рельефа с их помощью необходимо выполнение предварительной обработки.

Отмечается, что степень покрытия территории древесно-кустарниковой растительностью оказывает негативное влияние на качество определения высот рельефа при радарных съемках [30, 40]. В целях минимизации влияния древесно-кустарниковой растительности на результаты съемок SRTM предлагаются различные алгоритмы по сглаживанию модели, снижению уровня шумов, выявлению и удалению из моделей поверхности участков, покрытых лесной растительностью. Сама растительность (главным образом лесная) при этом рассматривается как негативный фактор, препятствующий прохождению сигналов датчиков и снижающий точностные характеристики модели. Значительный интерес для лесного хозяйства представляет обратная задача — не минимизация влияния растительности на рельеф, а наоборот — выделение из модели высот «слоя растительности» и последующее его изучение [39, 41, 42].

Обзор исследований, посвященных определению высоты лесного полога с использованием данных SRTM, демонстрирует, что указанное направление актуально для разных стран и континентов: США, Китая, России, Австралии, Камбоджи [39, 40, 42-46]. В целом, алгоритмы определения высоты лесного полога с использованием материалов дистанционного зондирования подобны друг другу — высота лесного полога определяется на основе разницы моделей поверхности SRTM и рельефа. В публикациях детально исследуются отдельные вопросы — последствия некорректной регистрации моделей высот [44, 46]; влияние на высоту полога характеристик лесных насаждений — преобладающих древесных пород [41], плотности полога [46]; влияние на высоту полога характеристик рельефа [44, 46]. Во многих исследованиях выполняется сравнение высот, определяемых на основе SRTM, с результатами использования других моделей высот [41, 43, 45]. Публикаций об исследованиях зависимости запаса лесных насаждений от высоты фазы центра рассеяния не обнаружено.

Значительную методическую, познавательную и библиографическую ценность для изучения взаимосвязи высоты

лесных насаждений с результатами съемки SRTM представляет часто цитируемая специалистами статья Келлиндорфера и Уокера [39]. В ней изложены теоретические основы съемки SRTM, рассмотрены факторы, определяющие значения высот и связанные с ними ошибки, приведены результаты практических исследований в разных по характеру рельефа и лесной растительности регионах США. Также оценены расхождения между поверхностью SRTM и поверхностью рельефа, связанные с влиянием лесной растительности. Выявлено наличие линейных взаимосвязей между высотами насаждений и разницей высот моделей поверхности и рельефа. Также в данной статье приведены формулы и определения ряда понятий, связанных с изучаемой тематикой.

Высота поверхности SRTM на покрытых лесом участках оказывается больше высоты поверхности открытого рельефа, но ниже средней высоты лесного полога. Разница между поверхностями SRTM и рельефа — высота центра фазы рассеяния (scattering phase center height)  $h_{spc}$  зависит от характеристик сенсора и объекта. К характеристикам объекта съемки (лесных насаждений), способных влиять на высоту центра фазы рассеяния, относятся структура и влажность лесной растительности, шероховатость и влажность почвы. К характеристикам сенсора, влияющим на высоту центра фазы рассеяния, относятся длина волны, базовая длина и ориентация, поляризация, угол падения, фазовый шум [39].

Средняя высота центра фазы рассеяния для покрытого лесом участка  $\bar{h}_{spc}$  может быть оценена с относительно небольшими погрешностями при условии усреднения достаточного количества значений высот [39]:

$$\bar{h}_{spc} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} (h_{SRTM} - h_{ED}) + \delta_v, \quad (1)$$

где  $h_{SRTM}$  — высота пикселя модели SRTM,  $h_{ED}$  — высота пикселя модели рельефа,  $N_p$  — количество пикселей в границах насаждения,  $\delta_v$  — абсолютная ошибка, представляющая собой вертикальное смещение между поверхностью SRTM и поверхностью рельефа.

Наличие линейных связей между высотами насаждений и высотами центра фазы рассеяния (на основе данных SRTM) подтверждается в ряде исследований [39, 41, 45].

Для выполнения лесоучетных работ на значительных по площади территориях приоритетным направлением считается

использование дистанционных методов. Возможности материалов современных радарных съемок (в частности топографической съемки SRTM) представляются перспективными для определения таких ключевых характеристик лесных насаждений, как средние высоты и запасы. Оценка этих характеристик актуальна не только для выполнения лесоучетных работ (национальной инвентаризации лесов и лесоустройства), но и для решения задач устойчивого управления лесами, экологии и охраны природы, изучения углеродного цикла.

Задачами данной статьи являются:

- оценка расхождений высот между моделями поверхности (данных радарной топографической съемки SRTM) и рельефа (на основе топографических карт) на примере модельной территории — определение высоты центра фазы рассеяния  $h_{spc}$ ;

- оценка взаимосвязей средних высот полога  $\bar{h}$  и запасов древостоев  $\bar{M}$  со средними высотами центра фазы рассеяния  $\bar{h}_{spc}$ ;

- анализ влияния характеристик насаждений на высоту центра фазы рассеяния  $h_{spc}$ .

**2. Методика исследования.** Методика исследования включала сбор и подготовку исходных пространственных данных с формированием геоинформационного (ГИС) проекта модельной территории, цифровое моделирование рельефа на основе данных SRTM и топографических карт, сравнение расхождений высот между моделями и оценку взаимосвязей высот и запасов лесных насаждений с высотой центра фазы рассеяния. Порядок и краткий состав работ по основным этапам исследования отражены в таблице 1.

Таблица 1. Порядок работ по оценке возможностей использования данных радарной съемки SRTM для определения высот и запасов древостоев

Этап	Содержание	Программное обеспечение
1. Подготовка исходных пространственных данных в цифровых форматах	Формирование геоинформационного проекта модельной территории с наборами векторных и растровых слоев на основе баз данных лесоустройства. Создание векторного слоя регулярной сети с шагом 1 км с расчетом усредненных характеристик лесов внутри ячеек.	Геоинформационные системы (ГИС) QGIS, WinGIS, программа обработки лесоустроительной информации PLP-2015

Продолжение таблицы 1.

Этап	Содержание	Программное обеспечение
2. Создание моделей высот рельефа и поверхности	Поиск, перепроецирование и загрузка данных SRTM. Сканирование и трансформация в геоинформационный проект топографических карт, векторизация горизонталей и высотных отметок. Создание модели рельефа методом TIN. Сравнение моделей высот.	Картографический сервис EarthExplorer ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> ), ГИС QGIS, Saga GIS, программы MS Excel, Statgraphics
3. Определение высоты центра фазы рассеяния	Определение разницы высот моделей SRTM и рельефа (определение высоты центра фазы рассеяния). Сравнение средних высот полога лесных насаждений со средними высотами центра фазы рассеяния	ГИС QGIS, модуль QProf
4. Моделирование характеристик насаждений	Моделирование высоты и запасов древостоев на основе высоты центра фазы рассеяния (для ячеек регулярной сети и групп лесотаксационных выделов)	Программы PLP-2015, Statgraphics. MS Excel

**3. Объекты исследования.** В качестве модельной территории выбрана часть Учебно-опытного лесничества Ленинградской области, расположенная в Тосненском районе. Рельеф территории равнинный. Последнее лесоустройство было проведено в 2005 году. Площадь земель лесного фонда представлена на 93,5 % лесными землями, из которых 98,84 % составляют покрытые лесной растительностью земли. Средний состав насаждений — 3СЗЕЗБ1Ос, средний возраст — 82 года, средний класс бонитета — 2,4, средняя полнота — 0,68, средний запас на 1 га покрытых лесом земель — 214 м<sup>3</sup>/га.

Модельная территория ограничена прямоугольником с целым числом квадратных ячеек (рисунок 1а, 1б). Из анализа исключены ячейки, в которых доля земель лесного фонда составила менее 95% от общей площади, а также ячейки, в которых доля земель, покрытых лесной растительностью, составила менее 90% от общей площади (поэтому из 220 исходных ячеек выбрано 150).

Исходными данными для исследования служили материалы лесоустройства (геоинформационные базы данных, лесные карты), выполненного в 2005 году, данные съемки SRTM и топографические карты (рисунок).

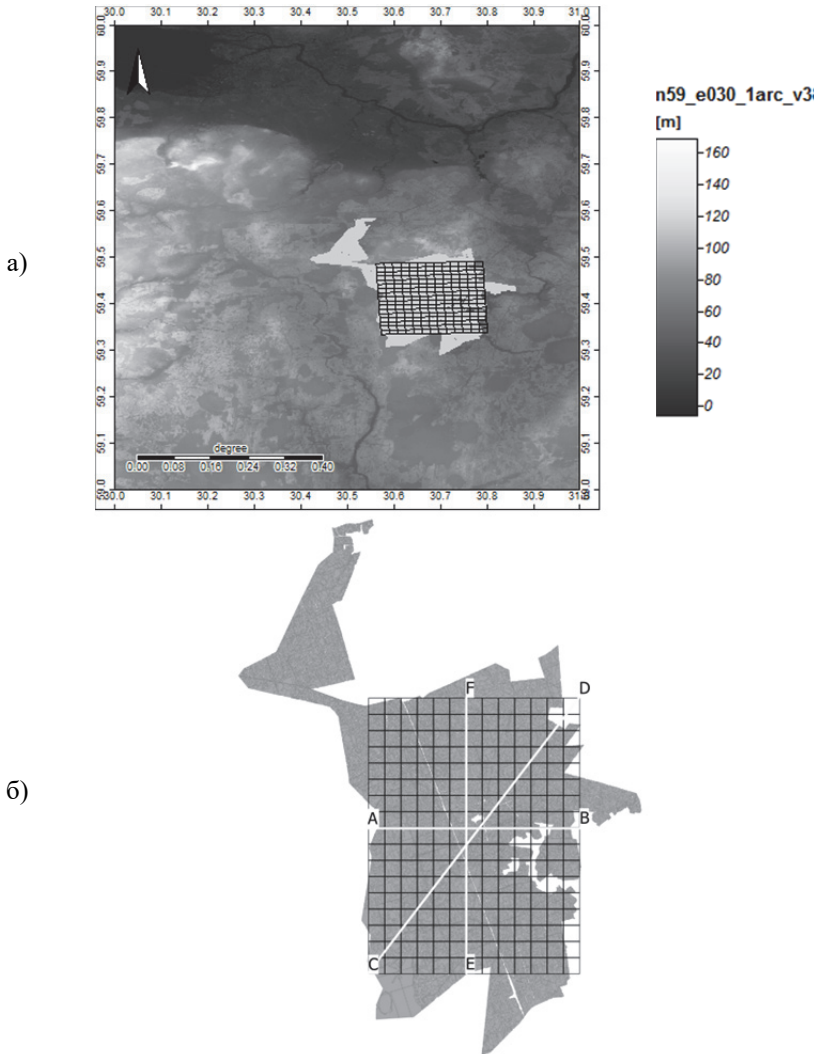


Рис. 1. Исходные пространственные данные: а) расположение модельной территории в виде регулярной сетки прямоугольной формы с шагом 1 км со схемой Учебно-опытного лесничества внутри квадрата матрицы высот SRTM со стороной 1°; б) расположение профилей для анализа высот рельефа, поверхности SRTM и лесного полога

**4. Результаты исследования.** Средствами ГИС путем вычитания значений высот моделей рельефа из модели SRTM



сформирована новая цифровая модель высот (рисунок 2). Полученная модель высот характеризует положение высоты центра фазы рассеяния. На рисунке 3 показаны профили значений высот обеих моделей, а также приведен график высоты центра фазы рассеяния ( $h_{SPC}$ ).

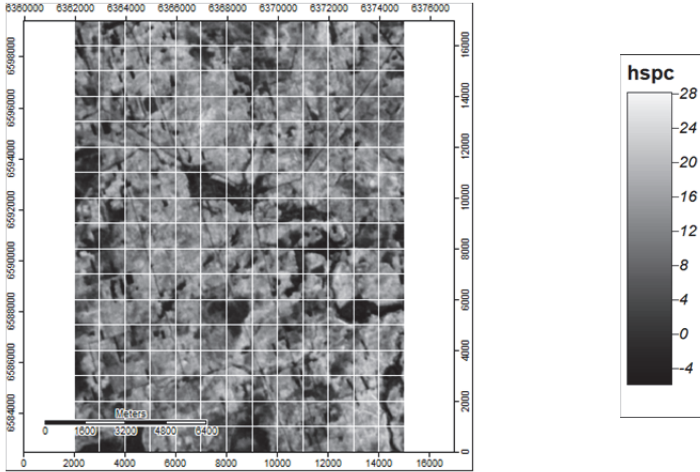
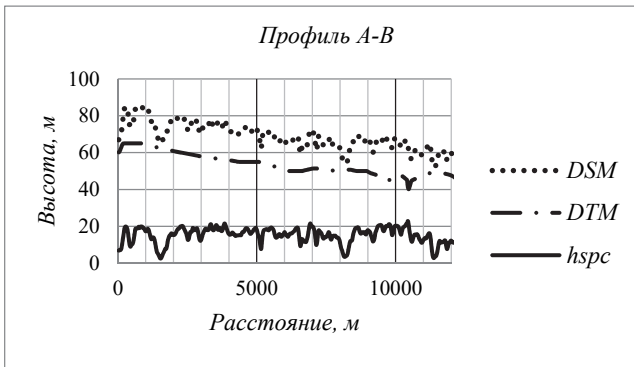


Рис. 2. Изображение модели высот центра фазы рассеяния (разницы моделей поверхности SRTM и рельефа)



а)

Рис. 3. Профили значений высот, полученных на основе моделей рельефа (DTM) и поверхности (DSM). Разница высот моделей поверхности и рельефа — высота центра фазы рассеяния  $h_{SPC}$  [38]

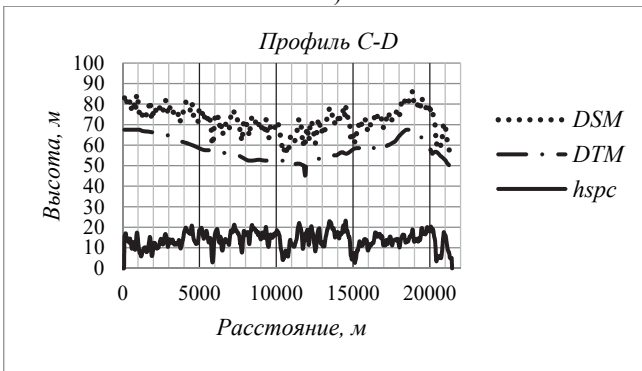
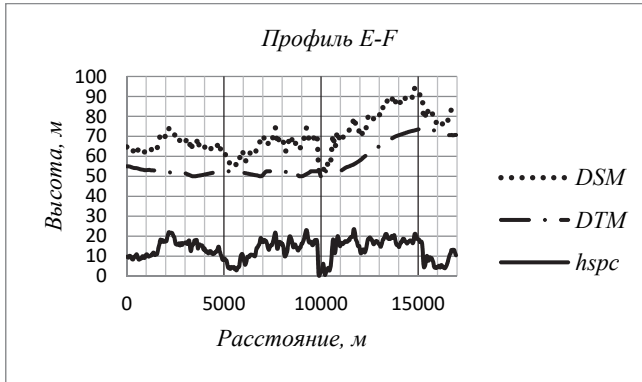


Рис. 3. Профили значений высот, полученных на основе моделей рельефа (DTM) и поверхности (DSM). Разница высот моделей поверхности и рельефа — высота центра фазы рассеяния  $h_{spc}$  [38]

Просмотр изменения высот поверхностей по профилям (рисунок 4) позволяет отметить следующие тенденции:

- характер изменения высот между моделями поверхности и рельефа в целом во всех направлениях однороден, но изменчивость высот модели поверхности заметно выше;

- изменения значений высот поверхности без изменения высот рельефа наблюдаются в местах чередования насаждений с разными средними высотами полога, чередования покрытых и непокрытых лесной растительностью участков;

- изменения значений высот поверхности с одновременным изменением высот рельефа происходят в поймах рек и ручьев.

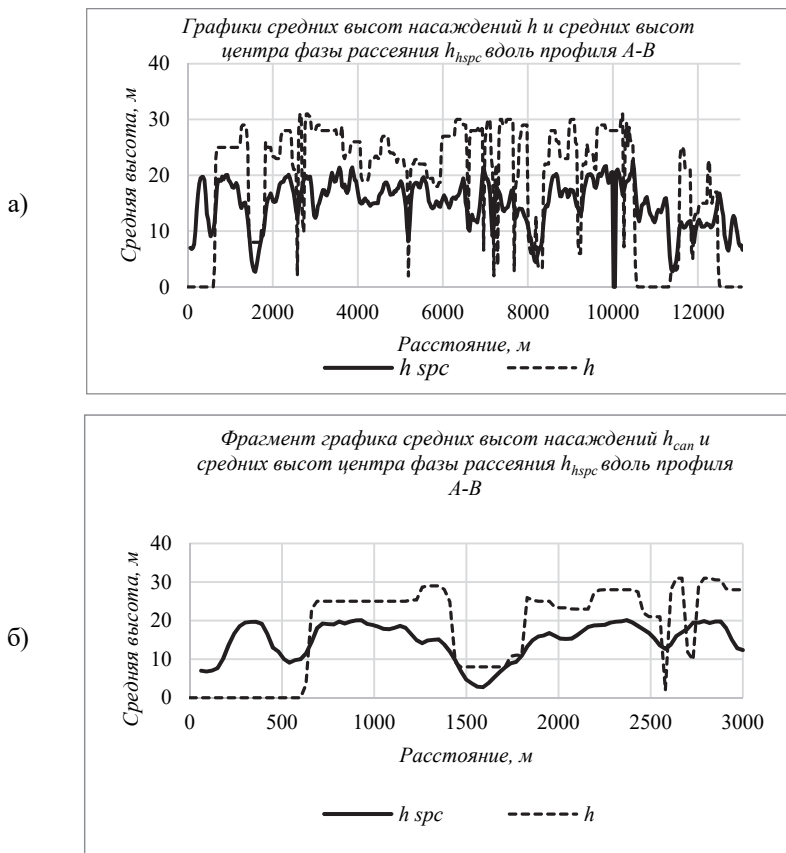


Рис. 4. Сравнение графиков средних высот лесных насаждений со средними высотами центра фазы рассеяния: а) графики средних высот лесных насаждений ( $\bar{h}$ ) и средних высот центра фазы рассеяния ( $\bar{h}_{spc}$ ) профиля A-B; б) увеличенный фрагмент профиля A-B

Графики высоты центра фазы рассеяния на профилях показывают, что для большей части модельной территории (которая относится к лесопокрытой) расхождения высот между моделями поверхности и рельефа составляют 15-20 м. Сближение графиков высот отмечается на участках, не покрытых лесной растительностью [38].

На рисунке 4б показан фрагмент профиля с высотами центра фазы рассеяния ( $\bar{h}_{spc}$ ) и средними высотами насаждений ( $\bar{h}$ ). Ступенчатый характер графика средних высот насаждений с наличием

ровных участков объясняется тем, что для каждого лесотаксационного выдела известно единственное значение высоты (средняя высота первого яруса). При соседстве выделов с разными средними высотами перепад высот получается резким. График поверхности SRTM (высоты фазы рассеяния) более плавный. Возможно, такая плавность при переходе между насаждениями с разными средними высотами в некоторых случаях будет справедливой. Иными причинами плавного характера изменения графика поверхности SRTM могут быть невысокое пространственное разрешение съемки (около 30 м) и влияние смежных объектов.

Графики на рисунке 4 подтверждают, что высота центра фазы рассеяния не соответствует реальной высоте лесных насаждений. Кривая графика средней высоты древостоев в целом проходит выше кривой средней высоты центра фазы рассеяния (рисунок 4а). В публикациях приводятся сведения о закономерностях соотношения высот модели SRTM и лесных насаждений. В частности, отмечается, что поверхность центра фазы рассеяния, фиксируемая сенсором, может составлять от 0,5 до 0,75 от высоты лесного полога [30]. Более глубокому проникновению лучей С-диапазона в лесной полог могут способствовать сухая погода, незначительная плотность полога, небольшая высота насаждений и небольшие размеры листьев и ветвей, коническая форма крон. Такие факторы, как высокая сомкнутость насаждений, преобладание лиственных пород в лесном пологе, наличие ветвей среднего и большого размера препятствуют проникновению лучей радарной съемки в лесной полог [30, 40].

Для оценки высот объектов на основе материалов SRTM (с размером пикселя 30 м) рекомендуется выбирать участки площадью не менее 1,8 га [39]. Также отмечается, что относительная вертикальная ошибка высоты, связанная с фазовым шумом, снижается с увеличением выборки за счет усреднения. В настоящем исследовании использовались следующие градации выделов по площади — все выделы, более 2,5 га, более 5 га, более 7,5 га. В таблице 2 показаны значения высот центра фазы рассеяния для групп категорий земель и отдельных категорий земель. К нелесным землям на модельной территории относятся следующие категории земель: болота, трассы ЛЭП, противопожарные разрывы, карьеры, кладбища, прочие земли и другие. К группе категорий земель «лесные земли, покрытые лесной растительностью» относятся насаждения естественного происхождения, насаждения искусственного происхождения (лесные культуры), насаждения из подроста, насаждения естественные с примесью лесных культур.

Таблица 2. Высоты центра фазы рассеяния по группам категорий земель и отдельным категориям земель. В таблице указаны средние значения высоты центра фазы рассеяния (м), стандартные ошибки (м) и количество выделов в скобках (шт)

Категории и группы категорий земель	Площади выделов				
	без ограничений	не меньше 2,5 га	не меньше 5 га	не меньше 7,5 га	не меньше 10 га
Нелесные земли	7,8±3,8 (219)	7,0±3,5 (81)	5,6±3,4 (34)	4,0±0,9 (22)	4,2±1,0 (11)
Болота	5,6±3,8 (14)	3,8±0,8 (10)	3,6±0,7 (9)	3,6±0,7 (9)	3,6±0,5 (6)
Сенокосы	6,1±2,6 (58)	5,1±2,3 (14)	4,1±1,2 (4)	-	-
Пашни, пастбище, выгоны, ландшафтная поляна	5,2±2,9 (17)	3,5±1,4 (9)	3,2±1,0 (4)	3,6±0,7 (3)	-
Непокрытые лесной растительностью лесные земли	10,9±5,2 (122)	10,6±6,0 (26)	11,7±6,5 (12)	12,3±7,9 (5)	-
Несомкнутые лесные культуры	9,3±6,4 (38)	7,2±5,5 (13)	4,0±0,5 (4)	3,9±0,2 (2)	-
Лесные земли покрытые лесной растительностью	14,4±4,0 (7361)	14,2±4,3 (2620)	13,7±4,5 (793)	13,7±4,6 (282)	13,2±4,7 (127)

К лесным землям, не покрытым лесной растительностью — погибшие насаждения, вырубки, прогалины, несомкнутые лесные культуры. Включение в данную таблицу отдельных категорий земель не имеет практического смысла – одни встречаются единично, другие могут включать древесно-кустарниковую растительность (кладбище, плантация, сад, питомник) или постройки (поселок, усадьба, кордон). Также нет смысла анализировать узкие линейные (реки, линии электропередач, противопожарные разрывы) и мелкие по площади (прогалины) объекты, поскольку на высоту модели поверхности будут влиять смежные объекты (как правило, насаждения), а размеры самих объектов могут быть сопоставимы с размером одного пиксела.

Увеличение площади выделов приводит к постепенному снижению высоты центра фазы рассеяния и среднего квадратического отклонения. Показанные значения демонстрируют, что даже для открытых территорий, теоретически лишенных строений и древесной

растительности (болот, пашен, пастбищ), расхождения значений высот поверхности и рельефа существенно отличаются от нуля. Для лесных территорий значения высот центра фазы рассеяния практически не меняются с увеличением площади выдела.

При оценке взаимосвязей между характеристиками лесных насаждений и высотами центра фазы рассеяния использовались ячейки регулярной сети с шагом 1 км (рисунок 5) и лесотаксационные выделы (таблицы 3 и 4). Для выполнения регрессионного анализа использовали линейные уравнения без константы, поскольку высота центра фазы рассеяния (разница высот моделей поверхности и рельефа) для лесопокрытых площадей всегда будет отличаться от нуля.

На рисунке 5 показаны графики двух регрессионных уравнений, отражающих зависимости между средними высотами и средними запасами насаждений от средней высоты центра фазы рассеяния для 150 ячеек регулярной сети с шагом 1 км.

Далее оценивались регрессионные зависимости между средними высотами центра фазы рассеяния (независимая переменная) и средними высотами или запасами насаждений (зависимая переменная) в пределах границ лесотаксационных выделов, сгруппированных по преобладающим породам (таблица 3). Из анализа были исключены насаждения младше 40 лет по той причине, что определение характеристик высот поверхности их полога на основе материалов лесоустройства практически невозможно.

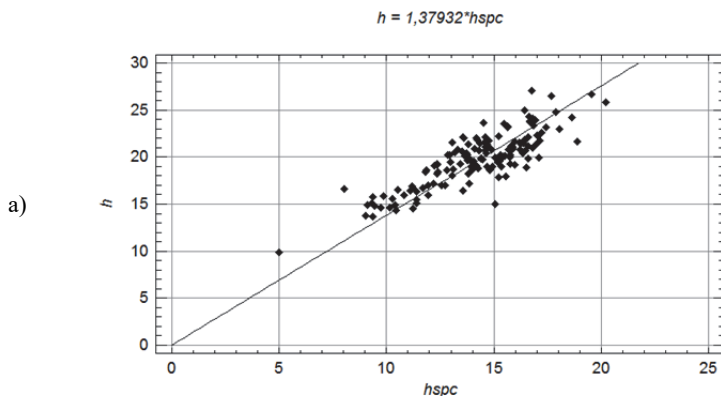


Рис. 5. Графики зависимости средних высот и запасов насаждений от средних высот центра фазы рассеяния SRTM внутри ячеек регулярной сети:

a) зависимость средней высоты насаждений  $\bar{h}$  (м), от средней высоты фазы рассеяния  $\bar{h}_{spc}$  (м), коэффициент детерминации  $R^2 = 99,18\%$

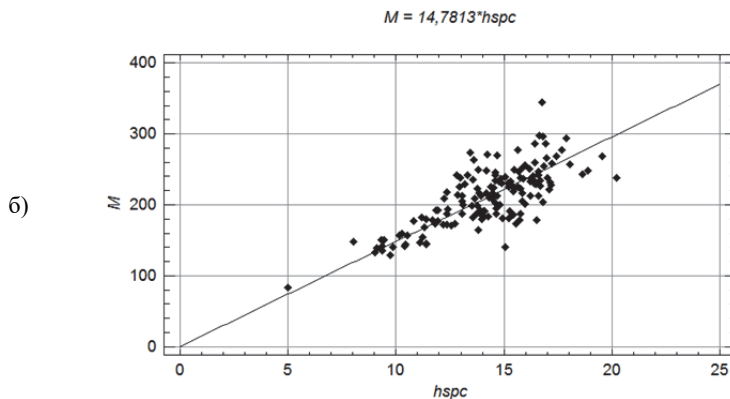


Рис. 5. Графики зависимости средних высот и запасов насаждений от средних высот центра фазы рассеяния SRTM внутри ячеек регулярной сети:  
 б) зависимость среднего запаса насаждений  $\bar{M}$  (мЗ/га) от средней высоты фазы рассеяния  $\bar{h}_{spc}$  (м), коэффициент детерминации  $R^2 = 98,35\%$

Результаты, представленные в таблице 3, демонстрируют наличие тесных регрессионных связей между анализируемыми показателями. Коэффициенты регрессии для всех выделов насаждений четырех групп основных лесобразующих пород в целом близки. Отличия регрессионных коэффициентов между группами насаждений при прочих равных условиях можно трактовать различной пропускной способностью древесного полога. Но структура лесного полога насаждений разных типов достаточно разнообразна.

Рассматриваемые в таблице 3 группы насаждений выделены только по преобладающей в их составе древесной породе в соответствии с действующей Лесоустроительной инструкцией. Выделение отдельных выделов при лесоустройстве допускает определенное варьирование лесотаксационных характеристик насаждений (коэффициентов состава древесных пород, высот, диаметров, возрастов, относительной полноты и бонитета насаждения). Также допустима определенная пространственная неоднородность лесотаксационных выделов (в том числе наличие в выделе единичных деревьев и открытых участков, наличие участков с разной полнотой и сомкнутостью полога, а также неоднородность породного состава на территории выдела). Указанные особенности исходных данных отражаются на неоднородности полога лесных

насаждений (следовательно, и на положении поверхности SRTM — высоты центра фазы рассеяния).

Таблица 3. Регрессионные уравнения зависимостей средней высоты насаждений  $\bar{h}$  (м) от средней высоты фазы рассеяния  $\bar{h}_{spc}$  (м). В скобках указано количество выделов (шт.)

Критерии оценки и их градации	Группы насаждений			
	сосновые	еловые	березовые	осиновые
Все насаждения	$\bar{h} = 1,44\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,83$ (1815)	$\bar{h} = 1,46\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,28$ (1851)	$\bar{h} = 1,49\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,56$ (1307)	$\bar{h} = 1,52\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,16$ (1026)
Площадь выдела, га				
менее 2,5 га	$\bar{h} = 1,44\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,48$ (1061)	$\bar{h} = 1,45\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,06$ (1264)	$\bar{h} = 1,49\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,13$ (854)	$\bar{h} = 1,52\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,96$ (673)
2,5-5 га	$\bar{h} = 1,43\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,41$ (521)	$\bar{h} = 1,48\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,69$ (434)	$\bar{h} = 1,48\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,13$ (302)	$\bar{h} = 1,5\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,57$ (243)
более 5 га	$\bar{h} = 1,46\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,19$ (233)	$\bar{h} = 1,51\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,08$ (153)	$\bar{h} = 1,47\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,87$ (151)	$\bar{h} = 1,53\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,53$ (110)
Относительная полнота, доля единицы				
0,5 и менее	$\bar{h} = 1,65\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,03$ (476)	$\bar{h} = 1,57\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,82$ (549)	$\bar{h} = 1,69\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,05$ (250)	$\bar{h} = 1,64\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,89$ (285)
0,6-0,7	$\bar{h} = 1,41\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,92$ (1080)	$\bar{h} = 1,44\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,74$ (910)	$\bar{h} = 1,47\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,86$ (799)	$\bar{h} = 1,49\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,44$ (554)
0,8 и выше	$\bar{h} = 1,32\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,91$ (259)	$\bar{h} = 1,35\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,57$ (392)	$\bar{h} = 1,39\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 98,25$ (258)	$\bar{h} = 1,44\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 98,11$ (187)



Продолжение таблицы 3.

Критерии оценки и их градации	Группы насаждений			
	сосновые	еловые	березовые	осиновые
Коэффициент преобладающей породы в составе, ед.				
5 и менее	$\bar{h} = 1,65\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,03$ (476)	$\bar{h} = 1,49\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,51$ (1315)	$\bar{h} = 1,48\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,77$ (686)	$\bar{h} = 1,5\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,22$ (535)
6-7	$\bar{h} = 1,41\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,62$ (1080)	$\bar{h} = 1,37\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,63$ (412)	$\bar{h} = 1,5\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,56$ (510)	$\bar{h} = 1,55\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,06$ (364)
8 и более	$\bar{h} = 1,32\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,91$ (259)	$\bar{h} = 1,39\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,02$ (124)	$\bar{h} = 1,47\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,21$ (111)	$\bar{h} = 1,47\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,41$ (127)

Для изучения взаимосвязи средней высоты насаждений со средней высотой центра фазы рассеяния помимо преобладающей породы также учитывались следующие критерии: коэффициент состава преобладающей породы, относительная полнота и площадь выдела (таблица 3).

Регрессионный анализ взаимосвязи средней высоты центра фазы рассеяния со средней высотой насаждений позволил установить ряд закономерностей. Величина площади выдела практически не влияет на значения регрессионных коэффициентов и тесноту связи для всех групп насаждений. Увеличение относительной полноты для всех пород однозначно приводит к снижению коэффициентов регрессии. Коэффициент регрессии в данном случае характеризует отличие средней высоты насаждения от средней высоты центра фазы рассеяния (чем больше отличие коэффициента регрессии от единицы, тем более глубоко проникают лучи радарной съемки в лесной полог). Максимальные значения коэффициентов регрессии отмечаются в низкополотных насаждениях.

Изменения коэффициентов регрессии в зависимости от изменения состава насаждений проявляются неодинаково для насаждений разных пород. Для хвойных насаждений максимальные значения коэффициентов регрессии (следовательно, и максимальная пропускная способность полога для лучей радарной съемки) отмечаются в смешанных насаждениях с долей преобладающей

породы в составе 5 и менее единиц. Увеличение доли преобладающей породы в составе насаждения приводит к снижению коэффициента регрессии. Для лиственных насаждений изменение доли преобладающей породы в составе практически не сказывается на значениях коэффициентов регрессии (они остаются близкими к средним по всем выделам).

Из результатов, представленных в таблице 3, видно, что регрессионные коэффициенты для всех групп насаждений в целом близки и незначительно отличаются от коэффициента 1,38, определенного для всех лесопокрытых участков регулярной сети (рисунок 5а). При этом наиболее низкие значения коэффициентов регрессии отмечаются для сосновых (1,32) и еловых (1,35) насаждений, наиболее высокие (1,44) — для осиновых.

В таблице 4 представлены результаты регрессионного анализа зависимости среднего запаса насаждений от средней высоты фазы рассеяния. Для данного анализа коэффициент регрессии может рассматриваться как «плотность» насаждений (чем выше значение коэффициента регрессии, тем больше запас лесного насаждения при одинаковых значениях высоты фазы рассеяния). Закономерного влияния площади выдела на величину регрессионных коэффициентов и тесноту связей не отмечается. Для всех групп насаждений коэффициенты регрессии увеличиваются с ростом относительной полноты.

Таблица 4. Регрессионные уравнения зависимостей среднего запаса насаждений  $\bar{M}$  ( $\text{м}^3/\text{га}$ ) от средней высоты центра фазы рассеяния  $\bar{h}_{spc}$  (м)

Критерии оценки и их градации	Группы насаждений			
	сосновые	еловые	березовые	осиновые
Все насаждения	$\bar{M} = 15,73\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,17$ (1815)	$\bar{M} = 16,83\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 93,35$ (1851)	$\bar{M} = 13,96\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,4$ (1307)	$\bar{M} = 16,19\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,67$ (1026)
Площадь выдела, га				
менее 2,5 га	$\bar{M} = 15,65\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,77$ (1061)	$\bar{M} = 16,7\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 92,77$ (1264)	$\bar{M} = 13,7\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,85$ (854)	$\bar{M} = 16,31\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,64$ (673)
2,5-5 га	$\bar{M} = 15,71\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,64$ (521)	$\bar{M} = 17,14\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,6$ (434)	$\bar{M} = 14,36\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,21$ (302)	$\bar{M} = 15,77\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,54$ (243)

Продолжение Таблицы 4.

Критерии оценки и их градации	Группы насаждений			
	сосновые	еловые	березовые	осиновые
более 5 га	$\bar{M} = 16,13\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,08$ (233)	$\bar{M} = 17\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,56$ (153)	$\bar{M} = 14,53\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,97$ (151)	$\bar{M} = 16,45\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,39$ (110)
Относительная полнота, доля единицы				
0,5 и менее	$\bar{M} = 12,7\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 93,8$ (476)	$\bar{M} = 13,04\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 93,05$ (549)	$\bar{M} = 11,46\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,3$ (250)	$\bar{M} = 12,51\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,57$ (285)
0,6 – 0,7	$\bar{M} = 15,99\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,41$ (1080)	$\bar{M} = 17,58\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,98$ (910)	$\bar{M} = 14,02\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,05$ (799)	$\bar{M} = 16,55\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,94$ (554)
0,8 и выше	$\bar{M} = 18,39\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,6$ (259)	$\bar{M} = 20,3\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 96,47$ (392)	$\bar{M} = 15,69\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,31$ (258)	$\bar{M} = 20,1\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 97,82$ (187)
Коэффициент преобладающей породы в составе, ед.				
5 и менее	$\bar{M} = 15,48\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,79$ (815)	$\bar{M} = 16,92\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,09$ (1315)	$\bar{M} = 13,84\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,69$ (686)	$\bar{M} = 15,26\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,36$ (535)
6-7	$\bar{M} = 15,58\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,68$ (454)	$\bar{M} = 16,67\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 92,53$ (412)	$\bar{M} = 14,18\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,22$ (510)	$\bar{M} = 16,87\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,61$ (364)
8 и более	$\bar{M} = 16,33\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,55$ (209)	$\bar{M} = 16,24\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 87,04$ (124)	$\bar{M} = 13,73\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 94,49$ (111)	$\bar{M} = 18,1\bar{h}_{spc}$ $R^2 = 95,31$ (127)

Для сосновых и осиновых насаждений отмечается также рост коэффициентов регрессии с увеличением в составе доли преобладающей породы (то есть переходом от смешанных к чистым насаждениям).

Для еловых насаждений наоборот — с увеличением доли ели в составе коэффициент регрессии несколько уменьшается. Среди

насаждений основных групп древесных пород наиболее высокие коэффициенты регрессии отмечаются у ельников. Максимальные значения коэффициентов регрессии — у высокополнотных еловых и осиновых насаждений.

Наличие расхождений между результатами регрессионного анализа для разных насаждений в целом закономерно — средняя высота центра фазы рассеяния зависит от плотности и структуры полога, которые, в свою очередь, зависят от составляющих полог древесных пород, сомкнутости полога, его однородности. Объяснение причин установленных в результате регрессионного анализа закономерностей требует проведения более детальных исследований (в частности с учетом всех составляющих первый ярус древесных пород; учетом наличия и характеристик других ярусов). Одной из наиболее очевидных причин различия регрессионных коэффициентов является различие структуры лесного полога преобладающих типов насаждений основных древесных пород.

Сосновые насаждения (особенно чистые, с коэффициентом состава 7-10 единиц) в условиях Учебно-опытного лесничества, как правило, относительно однородны по высоте и сомкнутости. Полог сосновых насаждений относительно ровный и плотный. Еловые насаждения обычно представлены деревьями разного возраста и высоты, с разными размерами крон и промежутков между кронами. Остроконечные кроны ельников разной высоты формируют неровную поверхность полога, что не может не сказываться на положении высоты центра фазы рассеяния. Важно отметить, что съемка SRTM выполнялась зимой (февраль 2000 г.), когда березовые и осиновые насаждения находились в безлистном состоянии, следовательно, глубина проникновения лучей внутрь полога для лиственных насаждений должна быть заведомо больше, чем для хвойных. При выполнении радарной съемки в период вегетации высота центра фазы рассеяния для лиственных насаждений будет отличаться от использованных результатов съемки SRTM.

Для детального исследования поверхности, формируемой при обработке материалов радарных съемок лесных насаждений, целесообразно использовать дополнительные источники информации, позволяющие оценивать варьирование высот лесного полога. Например, стереоизображения, полученные на основе материалов аэрофотосъемки, космической съемки или съемки, выполненной беспилотными летательными аппаратами, а также материалы наземных обследований.

**5. Заключение.** В результате проведенного исследования предложен новый методический подход к определению важнейших

характеристик лесных насаждений — высот и запасов. Оценка расхождений высот между моделью SRTM и моделью рельефа (на основе топографических карт) на примере Учебно-опытного лесничества Ленинградской области позволила выявить ряд закономерностей.

1. Высота поверхности SRTM отличается от высоты рельефа (определяемой на основе топографических карт). При этом средняя высота центра фазы рассеяния SRTM (разница высот модели SRTM и модели рельефа) для нелесных земель составила  $7,0 \pm 3,5$  м; для лесных земель, покрытых лесной растительностью, —  $14,2 \pm 4,3$  м; для лесных земель, не покрытых лесной растительностью, —  $10,6 \pm 6,0$  м. Увеличение площади выделов приводит к уменьшению значений полученных оценок средней высоты центра фазы рассеяния и среднего квадратического отклонения.

2. Графики высот моделей SRTM и рельефа вдоль профилей отражают синхронный характер изменений. Средняя высота центра фазы рассеяния SRTM располагается ниже средней высоты лесного полога, что подтверждает сведения, приводимые в публикациях [39–41].

3. В результате исследований установлено влияние на зависимости между средней высотой центра фазы рассеяния и средними высотами и запасами лесных насаждений таких показателей, как вид преобладающей древесной породы, относительная полнота насаждения, коэффициент состава преобладающей породы.

С учетом глобального характера данных SRTM выявленные закономерности могут оказаться полезными для проведения лесочетных работ регионального и глобального уровней, (например, решения задач государственной инвентаризации лесов), а также решения глобальных экологических задач (определения запасов углерода, оценки наземной биомассы).

Целесообразно продолжить исследование в нескольких направлениях: дальнейшее изучение взаимосвязей расхождений моделей высот SRTM и рельефа с характеристиками лесов, оценка возможностей применения для аналогичных целей материалов других радарных съемок, оценка влияния на характеристики лесов моделей высот рельефа и поверхности.

## Литература

1. *Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках LANDSAT // Лесоведение. 2014. № 5. С. 3–12.
2. *Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Оценка влияния морфологии древесного полога и рельефа на спектральные характеристики лесов по данным Landsat // Исследование земли из космоса. 2016. № 5. С. 10–20.

3. *Толкач И.В., Саевич Ф.К.* Спектральные и яркостные характеристики основных лесообразующих пород на снимках сканера LEICA ADS100 // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2016. № 1(183). С. 24–27.
4. *Толкач И.В. и др.* Закономерности изменчивости спектральных яркостей полога основных лесообразующих пород Беларуси на снимках сканера ADS 100 // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 2(198). С. 43–49.
5. *Солдатенков А.А.* Дешифрирование состава лесной растительности в условиях среднегорного рельефа // Вестник Адыгейского государственного университета. 2014. Вып. 1(133). С. 127–130.
6. *Сидоренков В.М. и др.* Зонирование территории Удмуртской Республики по категориям среды обитания охотничьих ресурсов на основе данных спутниковой съемки Landsat 8 OLI-TIRS // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5. № 3(19). С. 84–93.
7. *Шарикалов А.Г., Якутин М.В.* Анализ состояния таежных экосистем с использованием методики автоматизированного дешифрирования // Известия Алтайского государственного университета. 2014. Вып. 3-1(83). С. 123–127.
8. *Перепечина Ю.И., Глушников О.И., Корсинов Р.С.* Учет и оценка лесов, возникших на сельскохозяйственных землях, с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 4(352). С. 71–80.
9. *Перепечина Ю.И., Глушников О.И., Корсинов Р.С.* Определение лесистости и количественных характеристик лесов по космическим снимкам Sentinel-2 (на примере Шебекинского муниципального района Белгородской обл.) // Лесохозяйственная информация. 2017. № 4(4). С. 85–93.
10. *Белова Е.И., Ершов Д.В.* Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.
11. *Черных Д.В., Бирюков Р.Ю., Золотов Д.В., Вагнер А.А.* Антропогенные модификации и трансформации ландшафтов в бассейне р. Касмала: классификация и динамика на основе данных дистанционного зондирования // Вестник Алтайской науки. 2014. № 1(19). С. 233–240.
12. *Соромотин А.В., Бродт Л.В.* Мониторинг растительного покрова при освоении нефтегазовых месторождений по данным многозональной съемки LANDSAT // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 1. С. 37–49.
13. *Терехов А.Г., Макаренко Н.Г., Пак И.Т.* Автоматический алгоритм классификации снимков Quickbird в задаче оценки полноты леса // Компьютерная оптика. 2014. Т. 38. № 3. С. 580–583.
14. *Савченко А.А., Выводцев Н.В.* Оценка возможностей применения данных дистанционного зондирования при мониторинге санитарного и лесопатологического состояния лесов // Ученые заметки ТОГУ. 2015. Т. 6. № 4. С. 658–661.
15. *Balenović I., Seletković A., Pernar R., Jazbec A.* Estimation of the mean tree height of forest stands by photogrammetric measurement using digital aerial images of high spatial resolution // Annals of Forest Research. 2015. vol. 58. no. 1. pp. 125–143.
16. *Архитов В.И., Черниковский Д.М., Березин В.И., Белов В.А.* Современная технология таксации лесов дешифровочным способом «От съемки – к проекту» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. Вып. 208. С. 22–42.
17. *Алексеев А.С., Михайлова А.А., Черниковский Д.М., Березин В.И.* Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2017. № 2. С. 67–77.

18. *Faganan M., De Fries R.* Measurement and monitoring of the world's forests. A review and summary of remote sensing technical capability, 2009-2015 // Resources for the Future. 2009. 131 p.
19. *Balenović I., Alberti G., Marjanović H.* Airborne laser scanning – the status and perspectives for the application in the south-east European forestry // South-east European forestry. 2013. vol. 4. no. 2. pp. 59–79.
20. *Kauranne T. et al.* Airborne Laser Scanning Based Forest Inventory: Comparison of Experimental Results for the Perm Region, Russia and Prior Results from Finland // Forests. 2017. vol. 8. no. 3. pp. 72.
21. *Peuhkurinen J. et al.* Predicting Tree Diameter Distributions from Airborne Laser Scanning, SPOT 5 Satellite, and Field Sample Data in the Perm Region, Russia // Forests. 2018. vol. 9. no. 10. pp. 639.
22. *Gašparović M., Milas A., Seletković A., Balenović I.* A novel automated method for the improvement of photogrammetric DTM accuracy in forests // Šumarski list. 2018. vol. 142. no. 11-12. pp. 567–576.
23. *Balenović I., Milas A., Marjanović H.* A comparison of stand-level volume estimates from image-based canopy height models of different spatial resolutions // Remote Sensing. 2017. vol. 9. no. 3. pp. 205.
24. *Balenović I. et al.* Quality assessment of high density digital surface model over different land cover classes // Periodicum biologorum. 2016. vol. 117. no. 4. pp. 459–470.
25. *Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R.* The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2003. vol. 57. no. 4. pp. 241–262.
26. *Köthe R., Bock M.* Development and use in practice of Saga modules for high quality analysis of geodata // FREE AND OPEN GIS-SAGA-GIS. 2006. vol. 115. pp. 85–96.
27. *Conrad O. et al.* System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 // Geoscientific Model Development. 2015. vol. 8. no. 7. pp. 1991–2007.
28. *Флоринский И.В.* Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Электронное научное издание Альманах Пространство и Время. 2016. Т. 11. Вып. 1. URL: 2227-9490e-aprovgt\_e-ast11-1.2016.71 (дата обращения: 05.12.2018).
29. *Шарый П.А.* Геоморфометрия в науках о Земле и экологии, обзор методов и приложений // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2006. Т. 8. № 2. С. 458–473.
30. *Hengl T., Reuter H.I.* Geomorphometry: Concepts, Software, Applications // Newnes. 2008. vol. 33. 772 p.
31. *Алексеев А.С., Никифоров А.А.* Влияние рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов с применением 3D-моделирования на примере Лисинского учебно-опытного лесхоза // Лесоведение. 2014. № 5. С. 42–53.
32. *Черниковский Д.М., Алексеев А.С.* Влияние формы поверхности рельефа на структуру и продуктивность лесных ландшафтов на примере заповедника «Верхне-Газовский» Ямало-Ненецкого АО // Лесоведение. 2003. № 5. С. 10–17.
33. *Фарбер С.К.* Структуризация лесных сообществ // Сибирский лесной журнал. 2014. № 1. С. 35–49.
34. *Рахматуллина И.Р., Рахматуллин З.З., Мустафин Р.Ф.* Распространение и продуктивность сосновых насаждений в зависимости от морфометрических показателей рельефа (на примере Бугульминско-Белебеевской возвышенности в пределах Республики Башкортостан) // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 1(50). С. 42–52.
35. *Черниковский Д.М.* Оценка взаимосвязей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. Вып. 216. С. 69–90.

36. *Черниковский Д.М.* Оценка связей морфометрических характеристик рельефа с количественными и качественными характеристиками лесов на основе цифровых моделей рельефа ASTER и SRTM // Сибирский лесной журнал. 2017. № 3. С. 28–39.
37. *Черниковский Д.М.* Автоматическая классификация поверхности рельефа для изучения количественных и качественных характеристик лесов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 219. С. 74–95.
38. *Черниковский Д.М.* Использование автоматической классификации рельефа Ивахаша и Пайка для оценки количественных и качественных характеристик лесов на основе моделей высот рельефа и поверхности // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018. Вып. 223. С. 100–126.
39. *Kellndorfer J. et al.* Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets // Remote Sensing of Environment. 2004. vol. 93. pp. 339–358.
40. *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.
41. *Sexton J. et al.* 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.
42. *Avatar 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.
43. *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. pp. 401–411.
44. *Ni W. et al.* Co-Registration of Two DEMs: Impacts on Forest Height Estimation from SRTM and NED at Mountainous Areas // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. vol. 11. no. 1. pp. 273–277.
45. *Zhang Z. et al.* Estimation of forest structural parameters from Lidar and SAR data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. vol. 37. pp. 1121–1126.
46. *Miliareisis G., Delikaraoglou D.* Effects of Percent Tree Canopy Density and DEM Misregistration on SRTM/NED Vegetation Height Estimates // Remote Sensing. 2009. vol. 1. pp. 36–49.

**Черниковский Дмитрий Михайлович** — канд. с.-х. наук, доцент, кафедра лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова (СПбГЛТУ); директор, Центр по развитию дистанционных методов в лесном хозяйстве ООО «Леспроект». Область научных интересов: лесоустройство, дистанционные методы в лесном хозяйстве, геоинформатика, геоморфометрия. Число научных публикаций — 65. [cherndm2006@yandex.ru](mailto:cherndm2006@yandex.ru); 5, Институтский пер., 194021, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +7 (812)550-08-34; факс: +7(812)550-08-15.

**Алексеев Александр Сергеевич** — д-р геогр. наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова (СПбГЛТУ). Область научных интересов: лесоустройство, лесная экология, мониторинг лесов, ГИС-технологии для учета и управления лесами, математическое моделирование динамики лесных ресурсов. Число научных публикаций — 284. [a\\_s\\_alekseev@mail.ru](mailto:a_s_alekseev@mail.ru); 5, Институтский пер., 194021, Санкт-Петербург, Российская Федерация; р.т.: +7 (812)550-08-34; факс: +7(812)550-08-15.



D.M. CHERNIKHOVSKY, A.S. ALEKSEEV

**DETERMINATION OF AVERAGE HEIGHTS AND WOOD STOCKS OF FOREST STANDS BASED ON INFORMATION PROCESSING OF TOPOGRAPHIC RADAR SURVEY, DIGITAL ELEVATION MODELS AND GIS TECHNOLOGIES**

*Chernikhovsky D.M., Alekseev A.S. Determination of Average Heights and Wood Stocks of Forest Stands Based on Information Processing of Topographic Radar Survey, Digital Elevation Models and GIS Technologies.*

**Abstract.** The paper studies the possibilities of using global elevation models SRTM (Shuttle radar topographic mission) to assess the characteristics of forest stands – average heights and wood stocks. It is known that in process of radar shooting vegetation is considered as a barrier to correctly determining the height of the earth's surface. The surface, fixed by the sensors above the forest covered territory (scattering phase center height), is located in the upper part of the forest canopy. The review of publications confirms the relevance of this area of investigation in the world. A brief theoretical basis of the SRTM survey, factors determining the values of the heights and the errors associated with them are presented based on literature reviews. The possibility of determining the height of forest canopy based on evaluation models is shown.

The part of Uchebno-Opytnoe Forest District of the Leningrad region was chosen as the model territory. The geographic information databases, data of radar survey SRTM and topographic maps were the origin data for the study. The model territory is divided by a regular network into cells with 1 km step. Most of the territory is covered with forest vegetation. Relief modeling was performed on the basis of digitized topographic maps of 1:25000 scale by interpolation using TIN method. A visual and statistical comparison of both evaluation models – a surface model (based on SRTM radar survey data) and a relief model (based on topographic maps) was done. With help of the profiles construction an assessment of the nature of changes in the heights of the relief and surface models was performed. It is noted that for most of the model territory, the differences in height between the surface and relief models are 15-20 m. The convergence of graphs for heights is observed in areas, which are not covered with forest vegetation.

The set of linear regression dependencies between the scattering phase center heights (independent variable) and average heights or wood stocks (dependent variable) within the borders of forest compartments, grouped by the predominated tree species, was obtained. The influence on the closeness of the relationship and the value of the regression coefficient of such factors as the value of basal area and the share of predominant tree species in composition was found.

The established regularities can be used to improve the theory and practice of forest inventory, as well as to solve other problems related to the assessment of natural resources at the regional and global level (national forest inventory, carbon stock determination, assessment of biomass).

**Keywords:** Forest Management, Digital Elevation Model, Digital Surface Model, Scattering Phase Center Height, Regression Analysis.

**Chernikhovsky Dmitry Mikhailovich** — Ph.D., Associate Professor, Department of Forest Inventory, Management and GIS, St. Petersburg State Forest Technical University (SPbFTU); director, Center for the development remote sensing methods in forestry, Lesproekt LLC. Research interests: forest inventory and management, remote sensing in forestry, geoinformatics, geomorphometry. The number of publications — 65. cherndm2006@yandex.ru; 5, Institute per., 194021, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: +7 (812)550-08-34; fax: +7(812)550-08-15.

**Alekseev Alexander Sergeyevich** —Ph.D., Dr.Sci., Professor, Head of Department, Department of Forest Inventory, Management and GIS, St. Petersburg State Forest Technical University (SPbFTU). Research interests: forest inventory and management, forest ecology and monitoring,

GIS technology for forest inventory and management, mathematical modeling of forest resource dynamics. The number of publications — 284. a\_s\_alekseev@mail.ru; 5, Institute per., 194021, St. Petersburg, Russian Federation; office phone: +7 (812)550-08-34; fax: +7(812)550-08-15.

## References

1. Zhirin V.M., Knjazeva S.V., Eidlina S.P. [Dynamics of the spectral brightness of the age-specific structure of forest type groups on LANDSAT satellite images]. *Lesovedenie – Russian Journal of Forest Science*. 2014. vol. 5. pp. 3–12. (In Russ.).
2. Zhirin V.M., Knjazeva S.V., Eidlina S.P. [Estimation of the influence of tree canopy morphology and relief on the spectral characteristics of forests according to Landsat data]. *Issledovanie zemli iz kosmosa – Study of Earth from Space*. 2016. vol. 5. pp. 10–20. (In Russ.).
3. Tolkach I.V., Saevich F.K. [Spectral and brightness characteristics of the main forest-forming species in the images of the LEICA ADS100 scanner]. *Trudy BGTU. Lesnoe hozjajstvo – Proceedings of BSTU. Forestry*. 2016. vol. 1(183). pp. 24–27. (In Russ.).
4. Tolkach I.V. et al. [Patterns of variability of the spectral brightness of the canopy of the main forest-forming species of Belarus in the ADS 100 scanner images]. *Trudy BGTU. Serija 1: Lesnoe hozjajstvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovljaemyh resursov – Proceedings of BSTU. Forestry, nature management and processing of renewable resources*. 2017. vol. 2(198). pp. 43–49. (In Russ.).
5. Soldatenkov A.A. [Interpretation of the composition of forest vegetation in the mid-mountain relief]. *Vestnik Adygejskogo gosudarstvennogo universiteta – The Bulletin of Adyge State University*. 2014. vol. 1(133). pp. 127–130. (In Russ.).
6. Sidorenkov V.M. et al. [Zoning of the territory of the Udmurt Republic by categories of habitat for hunting resources based on Landsat 8 OLI-TIRS satellite survey data]. *Lesotekhnicheskij zhurnal – Forest engineering journal*. 2015. Issue 5. vol. 3(19). pp. 84–93. (In Russ.).
7. Sharikalov A.G., Yakutin M.V. [Analysis of the state of taiga ecosystems using automated interpretation techniques]. *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle – Izvestiya of Altai State University Journal*. 2014. vol. 3-1(83). pp. 123–127. (In Russ.).
8. Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Korsikov R.S. [Accounting and assessment of forests originating on agricultural land using remote sensing data]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal – The bulletin of higher educational institutions. Forestry Journal*. 2016. vol. 4(352). pp. 71–80. (In Russ.).
9. Perepechina Yu.I., Glushenkov O.I., Korsikov R.S. [Determination of forest cover and quantitative characteristics of forests using Sentinel-2 satellite images (on the example of the Shebekinsky municipal district of the Belgorod region)]. *Lesohozjajstvennaja informacija – Forestry information*. 2017. vol. 4(4). pp. 85–93. (In Russ.).
10. Belova E.I., Ershov D.V. [Experience in estimating natural reforestation on clear-cuts by time series] *Lesovedenie – Russian Journal of Forest Science*. 2015. vol. 5. pp. 339–345. (In Russ.).
11. Chernyh D.V., Birjukov R.Yu., Zolotov D.V., Vagner A.A. [Anthropogenic modifications and transformations of landscapes in the r. Kasmala: classification and dynamics based on remote sensing data]. *Vestnik Altajskoj nauki – Vestnik Altayskoy nauki*. 2014. vol. 1(19). pp. 233–240. (In Russ.).
12. Soromotin A.V., Brodt L.V. [Vegetation monitoring during the development of oil and gas fields according to LANDSAT multizone survey]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ehkologiya i prirodopol'zovanie – UT Research Journal. Natural Resource Use and Ecology*. 2018. Issue 4. vol. 1. pp. 37–49. (In Russ.).
13. Terehov A.G., Makarenko N.G., Pak I.T. [Automatic algorithm for the classification of Quickbird images in the task of assessing the completeness of the forest]. *Komp'yuternaja optika – Computer Optics*. 2014. Issue 38. vol. 3. pp. 580–583. (In Russ.).
14. Savchenko A.A., Vyvodcev N.V. [Assessment of the possibilities of using remote sensing data in monitoring the sanitary and forest-pathological state of forests].

- Uchenye zametki TOGU – Electronic scientific journal "Scientists notes PNU"*. 2015. Issue 6. vol. 4. pp. 658–661. (In Russ.).
15. Balenović I., Seletković A., Pernar R., Jazbec A. Estimation of the mean tree height of forest stands by photogrammetric measurement using digital aerial images of high spatial resolution. *Annals of Forest Research*. 2015. vol. 58. no. 1. pp. 125–143.
  16. Arhipov V.I., Chernihovskij D.M., Berezin V.I., Belov V.A. [Modern technology of forest mensuration by interpretation method «From survey – to the project»] *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii – News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*. 2014. vol. 208. pp. 22–42. (In Russ.).
  17. Alekseev A.S., Mihajlova A.A., Chernihovskij D.M., Berezin V.I. [Method for determining the taxation characteristics of plantations from ultra-high-resolution aerial photographs]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozjajstva – Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2017. vol. 2. pp. 67–77. (In Russ.).
  18. Faganan M., De Fries R. Measurement and monitoring of the world's forests. A review and summary of remote sensing technical capability, 2009-2015. *Resources for the Future*. 2009. 131 p.
  19. Balenović I., Alberti G., Marjanović H. Airborne laser scanning – the status and perspectives for the application in the south-east European forestry. *South-east European forestry*. 2013. vol. 4. no. 2. pp. 59–79.
  20. Kauranne T. et al. Airborne Laser Scanning Based Forest Inventory: Comparison of Experimental Results for the Perm Region, Russia and Prior Results from Finland. *Forests*. 2017. vol. 8. no. 3. pp. 72.
  21. Peuhkurinen J. et al. Predicting Tree Diameter Distributions from Airborne Laser Scanning, SPOT 5 Satellite, and Field Sample Data in the Perm Region, Russia. *Forests*. 2018. vol. 9. no. 10. pp. 639.
  22. Gašparović M., Milas A., Seletković A., Balenović I. A novel automated method for the improvement of photogrammetric DTM accuracy in forests. *Šumarski list*. 2018. vol. 142. no. 11-12. pp. 567–576.
  23. Balenović I., Milas A., Marjanović H. A comparison of stand-level volume estimates from image-based canopy height models of different spatial resolutions. *Remote Sensing*. 2017. vol. 9. no. 3. pp. 205.
  24. Balenović I. et al. Quality assessment of high density digital surface model over different land cover classes. *Periodicum biologorum*. 2016. vol. 117. no. 4. pp. 459–470.
  25. Rabus B., Eineder M., Roth A., Bamler R. The shuttle radar topography mission – a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2003. vol. 57. no. 4. pp. 241–262.
  26. Köthe R., Bock M. Development and use in practice of Saga modules for high quality analysis of geodata. *FREE AND OPEN GIS-SAGA-GIS*. 2006. vol. 115. pp. 85–96.
  27. Conrad O. et al. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*. 2015. vol. 8. no. 7. pp. 1991–2007.
  28. Florinskij I.V. [An illustrated introduction to geomorphometry]. *Ehlektronnoe nauchnoe izdanie Al'manah Prostranstvo i Vremja – Electronic Scientific Edition Almanac Space and Time*. 2016. Issue 11. vol. 1. Available at: 2227-9490e-aprov\_ east11-1.2016.71 (accessed: 05.12.2018). (In Russ.).
  29. Sharyi P.A. [Geomorphometry in Earth and Ecology Sciences, a review of methods and applications]. *Izvestija Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj akademii nauk – Izvestia of RAS Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2006. Issue 8. vol. 2. pp. 458–473. (In Russ.).
  30. Hengl T., Reuter H.I. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Newnes. 2008. vol. 33. 772 p.
  31. Alekseev A.S., Nikiforov A.A. [The influence of relief on the structure and productivity of forest landscapes using 3D-modeling on the example of Lisinsky training and experimental forestry]. *Lesovedenie – Russian Journal of Forest Science*. 2014. vol. 5. pp. 42–53. (In Russ.).

32. Chernihovskij D.M., Alekseev A.S. [The influence of the relief surface shape on the structure and productivity of forest landscapes on the example of the reserve «Verkhne-Tazovsky» Yamalo-Nenets Autonomous area]. *Lesovedenie – Russian Journal of Forest Science*. 2003. vol. 5. pp. 10–17. (In Russ.).
33. Farber S.K. [Structuring of forest communities]. *Sibirskij Lesnoj Zurnal – Siberian Journal of Forest Science*. 2014. vol. 1. pp. 35–49. (In Russ.).
34. Rahmatullina I.R., Rahmatullina Z.Z., Mustafin R.F. [The distribution and productivity of pine stands depending on the morphometric parameters of the relief (on the example of Bugulminsko-Belebeevsky upland within the Republic of Bashkortostan)]. *Vestnik Izhevskoj gosudarstvennoj sel'skohozjajstvennoj akademii – The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2017. vol. 1(50). pp. 42–52. (In Russ.).
35. Chernihovskij D.M. [Assessment of interrelations of morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests]. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii – News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*. 2016. vol. 216. pp. 69–90. (In Russ.).
36. Chernihovskij D.M. [Assessment of the relationships between morphometric characteristics of relief with quantitative and qualitative characteristics of forests using ASTER and SRTM digital terrain models]. *Sibirskij Lesnoj Zurnal – Siberian Journal of Forest Science*. 2017. vol. 3. pp. 28–39. (In Russ.).
37. Chernihovskij D.M. [Automatic classification of surface topography to the quantitative and qualitative characteristics of forests]. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii – News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*. 2017. vol. 219. pp. 74–95. (In Russ.).
38. Chernihovskij D.M. [Using the automatic classification of relief by Ivahashi and Pike to assess the quantitative and qualitative characteristics of forests on the basis of elevation models of terrain and surface]. *Izvestija Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii – News of the Saint Petersburg State Forest Technical Academy*. 2018. vol. 223. pp. 100–126. (In Russ.).
39. Kellndorfer J. et al. Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets. *Remote Sensing of Environment*. 2004. vol. 93. pp. 339–358.
40. 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.
41. Sexton J. et al. 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.
42. 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.
43. 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. pp. 401–411.
44. Ni W. et al. Co-Registration of Two DEMs: Impacts on Forest Height Estimation from SRTM and NED at Mountainous Areas. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. vol. 11. no. 1. pp. 273–277.
45. Zhang Z. et al. Estimation of forest structural parameters from Lidar and SAR data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. vol. 37. pp. 1121–1126.
46. Miliareisis G., Delikaraoglou D. Effects of Percent Tree Canopy Density and DEM Misregistration on SRTM/NED Vegetation Height Estimates. *Remote Sensing*. 2009. vol. 1. pp. 36–49.