

УДК 630

Научная специальность: 4.1.6 Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация (биологические науки)

ОЦЕНКА ТАКСАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В РОССИИ

Смирнов Максим Викторович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: max_smirnov_14906@mail.ru

Аннотация

В статье рассмотрены возможности совместного использования наземной лесной таксации и материалов дистанционного зондирования Земли для оценки количественных характеристик лесных насаждений в Российской Федерации. Анализ выполнен на основе действующих положений лесного законодательства, Лесоустроительной инструкции и рецензируемых исследований, посвященных определению запаса древостоев по данным Sentinel-2 и радиолокационных систем. Сопоставлены информационные возможности наземного, дистанционного и комбинированного способов таксации. Показано, что наземные измерения остаются необходимой основой для калибровки и контроля моделей, тогда как спутниковые данные позволяют повысить пространственную полноту оценки и оперативность обновления сведений на больших территориях. Для российского бореального леса опубликованы примеры оценки запаса с использованием Sentinel-2 со среднеквадратической относительной неопределенностью порядка 35–55%, а применение многовременных радиолокационных данных обеспечивает устойчивое картографирование запаса на региональном уровне. Обоснована целесообразность рационального сочетания полевых измерений и дистанционного зондирования при обновлении лесоустроительной информации.

Ключевые слова: лесная таксация, лесоустройство, запас древостоя, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, лесотаксационный выдел, наземные измерения, лесные ресурсы.

ASSESSMENT OF FOREST INVENTORY PARAMETERS USING GROUND MEASUREMENTS AND REMOTE SENSING DATA IN RUSSIA

Smirnov Maxim Viktorovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University» St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: max_smirnov_14906@mail.ru

Abstract

The paper examines the combined use of ground forest mensuration and Earth observation data for assessing quantitative characteristics of forest stands in the Russian Federation. The analysis is based on current forest legislation, the Russian Forest Management Instruction and peer-reviewed studies on growing stock volume estimation from Sentinel-2 and radar data. Ground-based, remote and combined inventory approaches are compared. Field measurements remain essential for model calibration and validation, while satellite observations improve spatial completeness and enable more frequent updates over large and inaccessible territories. Published studies for Russian boreal forests report growing stock volume estimates from Sentinel-2 with relative RMS uncertainty of approximately 35–55%, while multi-temporal radar observations provide stable regional-scale

mapping. The results support a rational combination of field surveys and remote sensing for updating forest management information.

Keywords: *forest inventory, forest mensuration, growing stock volume, remote sensing, Sentinel-2, forest stand, ground measurements, forest resources.*

Введение

Таксация лесов является базовым источником количественной информации о лесных насаждениях. В соответствии со статьей 69.1 Лесного кодекса Российской Федерации ее проводят для получения актуальных и достоверных сведений о состоянии лесов, их количественных и качественных характеристиках, необходимых для лесного планирования, ведения государственного лесного реестра, оценки лесов и организации устойчивого лесопользования [1]. Результатом таксации является пространственно привязанная система характеристик, включающая породный состав, возраст, средние диаметр и высоту, полноту, класс бонитета, запас древесины и другие показатели.

Специфика России состоит в исключительной протяженности лесных территорий, значительной доле труднодоступных районов и высокой стоимости повторных наземных обследований. Поэтому традиционная глазомерно-измерительная и измерительная таксация постепенно дополняется материалами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Действующая Лесоустроительная инструкция прямо предусматривает наземный, дистанционный способы и способ рационального сочетания, а при подготовительных работах требует использования материалов ДЗЗ, ортофотопланов и их дешифрирования [2].

Современные спутниковые системы дают возможность регулярно получать спектральные и радиолокационные признаки, связанные с сомкнутостью крон, породным составом, продуктивностью и запасом древостоев. Однако переход от яркости пикселя к таксационному показателю требует калибровки по надежным наземным данным. Особенно это важно в бореальных лесах, где одинаковый спектральный отклик может формироваться насаждениями различного возраста и запаса, а влияние подлеска и напочвенного покрова возрастает при разреженном древостое [4].

Цель работы – оценить возможности совместного применения наземных измерений и дистанционного зондирования для определения основных таксационных показателей лесных насаждений в условиях России. Задачи исследования включали анализ нормативных требований, систематизацию измеряемых показателей, сопоставление опубликованных точностных характеристик дистанционных методов и формулирование условий, при которых комбинированная схема дает наиболее надежный результат.

Материалы и методы

Работа выполнена как обзорно-аналитическое исследование. В нормативную часть выборки включены Лесной кодекс Российской Федерации в редакции, актуальной на 2026 г., и Лесоустроительная инструкция, утвержденная приказом Минприроды России от 5 августа 2022 г. №510 [1; 2]. Для анализа дистанционных методов отобраны рецензируемые публикации, содержащие количественную валидацию оценки запаса древостоев в российских бореальных лесах по оптическим и радиолокационным данным [4–8]. Дополнительно использованы официальные материалы Рослесинфорга о современном объеме лесоустроительных работ [3].

В качестве основных таксационных переменных рассматривались средний диаметр D , средняя высота H , сумма площадей сечений G и запас древостоя M . Для пробной площади площадью S площадь поперечного сечения отдельного ствола определяют через диаметр на высоте 1,3 м. При диаметре d , выраженном в метрах, суммарная площадь сечений рассчитывается по выражению:

$$G = \frac{\sum \left(\pi \cdot \frac{d_i^2}{4} \right)}{S}, \text{ м}^2 \cdot \text{га}^{-1} \quad (1)$$

где d_i – диаметр i -го дерева на высоте груди, м; S – площадь пробной площади, га. Запас на единице площади может быть получен суммированием индивидуальных объемов стволов с последующим приведением к 1 га:

$$M = \frac{\sum v_i}{S}, \text{ м}^3 \cdot \text{га}^{-1} \quad (2)$$

где v_i – объем ствола отдельного дерева, определенный по соответствующей объемной модели, таблице или функции. При дистанционной оценке запас трактуется как зависимая переменная, а спектральные, текстурные, радиолокационные и ландшафтные признаки выступают предикторами. Сопоставление моделей выполняли по опубликованным значениям соответствующих ошибок. Для такого сравнения использовали два показателя: среднеквадратическую и относительную ошибку, причем сами опубликованные значения – как основа сопоставления – сохранялись без изменения.

$$RMSE = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{n}\right) \cdot \sum (\hat{M}_i - M_i)^2\right]}, \quad rRMSE = \frac{RMSE}{M} \cdot 100\% \quad (3)$$

В оптических данных существенное значение имеют спектральные индексы. Для иллюстрации выбран нормализованный разностный вегетационный индекс, который рассчитывается по отражательной способности в ближнем инфракрасном и красном диапазонах; именно эти два канала образуют его основу. Такой показатель – в данном случае иллюстративный – используется для демонстрации связи спектральных характеристик с состоянием растительности.

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (4)$$

Сопоставление проводили по четырем критериям: пространственному охвату, возможности прямого измерения древостоя, зависимости от полевой калибровки и характеру опубликованной точности оценки запаса. Эти параметры задавали единую рамку сравнения, поскольку позволяли соотнести методы не только по масштабу охвата, но и по способу получения исходной информации. В результате критерии – как основание сопоставления – применялись к каждому рассмотренному подходу без изменения их состава.

Результаты

Результаты нормативного анализа показывают, что действующая российская система лесоустройства уже на организационном уровне допускает интеграцию полевых и дистанционных данных. Лесоустроительная инструкция закрепляет лесотаксационный выдел как основную единицу учета количественных и качественных характеристик лесных ресурсов; таксация, в свою очередь, трактуется как последовательность подготовительных, полевых и камеральных этапов. На подготовительном этапе используются материалы ДЗЗ и выполняется их дешифрирование, что формирует нормативную основу для переноса наземной информации на пространственно непрерывное покрытие [2].

Наиболее убедительные количественные результаты для оптического подхода получены в исследовании W.G. Rees и соавт. [4], посвященном двум контрастным районам российского бореального леса – Хибинам и окрестностям Якутска. Авторы использовали полевые пробные площади, снимки Sentinel-2 MSI и классификацию земного покрова. Для оценки запаса древостоев была получена среднеквадратическая относительная неопределенность порядка 35-55%. Средние оценки запаса для лесных участков составили 102 м³/га в районе Хибин и 118 м³/га в районе Якутска. Эти значения важны не как универсальный норматив точности, а как пример достижимого качества локально калиброванной модели в разреженных северных лесах.

Радиолокационные исследования показывают иной набор преимуществ. В работе M. Santoro и соавт. [5] многовременные измерения Envisat ASAR использовались для оценки запаса в том числе в Центральной Сибири. Относительная RMSE на исходном масштабе составляла приблизительно 34-48%, а при пространственном осреднении заметно уменьшалась. Последующее картографирование запаса северного полушария с тем же семейством алгоритмов показало, что на уровне административных единиц относительная

RMSE между спутниковыми и инвентаризационными оценками составляла 12-45%, в среднем около 29% [6].

Для Центральной Сибири С. Thiel и С. Schmullius [7] показали перспективность L-диапазонных данных ALOS PALSAR: наиболее информативной оказалась интерферометрическая когерентность, полученная в условиях промерзания, а совместное использование обратного рассеяния и когерентности улучшало оценку запаса. Это подтверждает, что для российских условий сезонность съемки является не помехой сама по себе, а потенциальным источником дополнительной информации.

Более новые модели используют машинное обучение и совмещают десятки признаков. В исследовании А. Suleymanov и соавт. [8] модель Random Forest строилась по 8395 наземным измерениям и 36 дистанционным и экологическим ковариатам; среди наиболее значимых переменных выделена коротковолновая инфракрасная полоса Sentinel-2A. Такой подход показывает переход от простых однофакторных зависимостей к многомерной оценке, но одновременно повышает требования к качеству и репрезентативности обучающей выборки.

Таблица 1 – Примеры опубликованной точности дистанционной оценки запаса древостоев

Источник и данные	Территория	Опубликованный результат
Rees et al., 2021; Sentinel-2	Хибины и Якутия	rRMSE порядка 35-55 %
Santoro et al., 2011; Envisat ASAR	в т.ч. Центральная Сибирь	rRMSE 34,2-48,1 %; ниже при осреднении
Santoro et al., 2015; Envisat ASAR	Северное полушарие	12-45% на уровне административных единиц, среднее около 29%
Thiel, Schmullius, 2016; ALOS PALSAR	Центральная Сибирь	лучшие результаты при совместном использовании когерентности и обратного рассеяния

Примечание. Показатели относятся к различным масштабам и схемам валидации и не должны напрямую ранжироваться как единая шкала точности [4–7].

Сопоставление методов позволяет выделить принципиальное ограничение дистанционной таксации: спутниковый сигнал не измеряет запас древесины непосредственно. Он отражает оптические или радиофизические свойства полога, которые статистически связаны с запасом. Поэтому одна и та же модель не обязательно сохраняет точность при переносе между природными зонами, породными составами и типами лесорастительных условий. Наземная сеть измерений необходима как для первоначальной калибровки, так и для независимой проверки.

Одновременно дистанционные данные решают задачу, недоступную сплошному наземному измерению, – дают пространственно непрерывную картину между пробными точками и позволяют выявлять участки, где состояние лесов изменилось после пожаров, рубок, ветровалов или иных нарушений. Это особенно существенно для России, где Рослесинфорг в 2026 г. планировал работы по таксации на площади 24,6 млн га, включая подготовительные, полевые и камеральные этапы [3]. Масштаб задачи сам по себе делает сочетание полевых и космических данных технологически обоснованным.

С научной точки зрения наиболее перспективным выглядит не замещение таксатора алгоритмом, а построение многоуровневой схемы. На первом уровне репрезентативные пробные площади обеспечивают прямые измерения и контроль систематических смещений, причем именно они задают опорную базу для последующих процедур. На втором уровне спутниковые и, при необходимости, авиационные данные формируют непрерывные признаки; на третьем - статистическая или машинная модель переводит эти признаки в карты запаса, высоты и других параметров с явной оценкой неопределенности. Затем границы

лесотаксационных выделов и результаты полевой проверки используются для камерального уточнения.

Практическая ценность комбинированного подхода возрастает при регулярном обновлении. Если модель обучена на свежих пробных площадях и применена к снимкам близкого срока, дистанционное зондирование может использоваться для приоритизации полевых обследований, поскольку режим проверки в этом случае дифференцируется по характеру изменений. Участки со стабильным спектральным и структурным откликом проверяются выборочно, а зоны изменений - напротив - получают повышенное внимание; такая схема соответствует логике рационального сочетания способов таксации, закрепленной в действующей Инструкции [2].

Заключение

Таксация лесов в России развивается от преимущественно наземного описания к интегрированной системе, где полевые измерения и дистанционное зондирование выполняют взаимодополняющие функции. Действующая нормативная база допускает наземный, дистанционный и комбинированный способы, что, как представляется, позволяет включать современные спутниковые материалы в подготовительные и камеральные этапы лесоустройства. Отсюда следует важный вывод: сама организационная конструкция лесоустройства уже открыта для интеграции, а дистанционные данные в ней рассматриваются не как внешний элемент, а как рабочий ресурс.

Наземные измерения сохраняют значение эталонной основы для определения диаметра, высоты, породного состава и запаса, а также для калибровки дистанционных моделей. Оптические данные Sentinel-2 эффективны для крупномасштабного картографирования, однако их точность зависит от структуры полога и локальной настройки; радиолокационные системы, в свою очередь, дополняют оптику независимостью от облачности и чувствительностью к структурным характеристикам древостоя. Опубликованные исследования российских бореальных лесов показывают, что дистанционная оценка запаса уже дает практически полезные результаты, но ошибки остаются значительными на уровне отдельного пикселя или выдела, по этой причине наиболее надежной представляется схема рационального сочетания - репрезентативная наземная сеть, дистанционные признаки, статистическая модель и независимая проверка точности.

Дальнейшее развитие таксации связано с повышением согласованности полевых баз данных и спутниковых наблюдений. В это направление включаются многовременные ряды, лазерное сканирование и методы машинного обучения; примечательно, что все перечисленные средства усиливают не один изолированный этап, а всю систему получения и обновления сведений. Ключевым требованием при этом должно оставаться количественное описание неопределенности - именно оно не позволяет рассматривать оперативность обновления сведений отдельно от их достоверности.

Литература

1. Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ (ред. от 04.08.2026) // Собрание законодательства РФ. – 2006. – № 50. – Ст. 5278.
2. Об утверждении Лесоустроительной инструкции: приказ Минприроды России от 05.08.2022 № 510 (зарегистрирован Минюстом России 30.09.2022 № 70328).
3. В России в 2026 году проведут оценку лесов на площади 24,6 млн га // Рослесинфорг. – 2026. – URL: <https://roslesinforg.ru/news/in-the-media/v-rossii-v-2026-godu-provedut-otsenku-lesov-na-ploshchadi-24-6-mln-ga/> (дата обращения: 07.10.2026).
4. Rees W.G. Estimation of Boreal Forest Growing Stock Volume in Russia from Sentinel-2 MSI and Land Cover Classification / W.G. Rees, J. Tomaney, O. Tutubalina, V. Zharko, S. Bartalev // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 21. – DOI: 10.3390/rs13214483.
5. Santoro M. Retrieval of growing stock volume in boreal forest using hyper-temporal series of Envisat ASAR ScanSAR backscatter measurements / M. Santoro, C. Beer, O. Cartus et al. // Remote Sensing of Environment. – 2011. – Vol.115, No.2. – P. 490-507. – DOI: 10.1016/j.rse.2010.09.018.

6. Santoro M. Forest growing stock volume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR / M. Santoro, A. Beaudoin, C. Beer, O. Cartus et al. // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol.168. – P. 316-334. – DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.005.
7. Thiel C. The potential of ALOS PALSAR backscatter and InSAR coherence for forest growing stock volume estimation in Central Siberia / C. Thiel, C. Schmullius // Remote Sensing of Environment. – 2016. – Vol. 173. – P. 258-273. – DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.030.
8. Suleymanov A. Spatial high-resolution modelling and uncertainty assessment of forest growing stock volume based on remote sensing and environmental covariates / A. Suleymanov, E. Bogdan, I. Gaysin et al. // Forest Ecology and Management. – 2024. – Vol. 554. – DOI: 10.1016/j.foreco.2023.121676.
9. Таксация лесов // Рослесинфорг: официальный сайт. – URL: <https://roslesinforg.ru/services/lesoustroystvo/> (дата обращения: 07.10.2026).
10. Таксация лесосек: таксационное описание и определяемые показатели // Рослесинфорг: официальный сайт. – URL: <https://roslesinforg.ru/services/otvod-i-taksatsiya-lesosek/> (дата обращения: 07.10.2026).