

# Глобальные сервисы определения таксационных показателей в лесопатологическом обследовании усыхающих темнохвойных насаждений Пермского края

Л. А. Иванчина, С. В. Артюшкин, А. Ю. Одинцов

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
Пермь, 614990, Россия  
E-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru

В последние годы в Пермском крае многократно выросла потребность в проведении лесопатологических обследований (ЛПО) в связи с распространением инвазивного вида уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford). Наблюдается массовое усыхание пихтовых древостоев, вследствие чего использование дистанционных методов ЛПО становится всё более актуальным. Целью исследования стала оценка степени точности определения таксационных показателей усыхающих темнохвойных насаждений Пермского края с помощью разработанных моделей и онлайн-продуктов, а также возможности их использования для проведения ЛПО дистанционным методом. В настоящее время имеются модели и глобальные сервисы для определения высоты и запаса древостоя. Практическая валидация глобальных моделей высоты полого выявила существенные ограничения их прямого использования без предварительной региональной калибровки. Модель VHRM (*англ.* Very High Resolution canopy height Maps) позволяет получать карты высоты растительного покрова сверхвысокого разрешения из RGB-изображений с использованием самообучающегося графического преобразователя и сверточного декодера, обученных на данных аэрофотосъёмки с лидара. Несмотря на высокое разрешение и детальное отображение границ древостоя, модель оказалась непригодной для количественной оценки из-за критического систематического занижения высоты древостоя (смещение до  $-9,6$  м). Наиболее сбалансированные результаты с минимизацией среднеквадратической ошибки продемонстрировала модель GFCH (*англ.* Global Forest Canopy Height), невзирая на общую тенденцию к завышению показателей. Модель HRCHM (*англ.* High-Resolution Canopy Height Model of the Earth) проявила значительную временную нестабильность, что ограничивает её применение для задач ретроспективного мониторинга. Неудовлетворительную результативность показали глобальные карты запаса древесины GlobBiomass\_GSV (*англ.* GlobBiomass Growing Stock Volume), Biomass\_CCI (*англ.* Biomass Climate Change Initiative) для условий Пермского края. Выявленное занижение запаса в насаждениях делает данные продукты неинформативными для принятия хозяйственных решений. Таким образом, в настоящее время методы ДЗЗ в системе лесопатологического мониторинга целесообразно рассматривать как вспомогательный инструмент для предварительной стратификации территории и оптимизации маршрутов наземных обследований, но не как полноценную замену инструментальным измерениям.

**Ключевые слова:** лесопатологическое обследование, дистанционное зондирование, высота древостоя, запас древостоя, Пермский край, глобальные карты высоты полого

Одобрена к печати: 24.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-263-276

## Введение

В соответствии с действующим лесным законодательством одним из мероприятий по обеспечению санитарной безопасности в лесах является проведение лесопатологических обследований (далее — ЛПО) (Постановление..., 2020). В процессе ЛПО оценивается санитарное состояние лесных насаждений, определяются причины повреждений (или гибели) лесов, выявляются виды вредителей и болезней, которыми повреждены и поражены деревья, встречаемость вредителей и болезней, а также степень повреждённости (поражённости) древостоев (Приказ..., 2020). Основная задача ЛПО заключается в установлении необходимости проведения санитарно-оздоровительных мероприятий, целью которых представляется улучшение санитарного состояния лесов.

Стандартное ЛПО проводится в полевых условиях методом закладки пробных площадей инструментальным способом. Кроме того, действующим законодательством предусмотрено проведение ЛПО с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Приказ..., 2020).

Плюсом натуральных ЛПО считается расчёт фактических таксационных показателей лесного насаждения, которые зачастую не совпадают со сведениями таксационного описания в связи с давностью лесоустройства и непостоянством природных экосистем. Фактические таксационные показатели позволяют наиболее точно установить объёмы назначаемых санитарно-оздоровительных мероприятий, в частности, запас древостоев, который необходимо вырубить в процессе санитарной рубки.

Недостатком наземного способа следует считать невозможность обследовать значительные площади, а также труднодоступные участки (Барталев и др., 2010). Значительные территории возможно обследовать с помощью спутниковых данных (Алексеев, Черниховский, 2024). Материалы ДЗЗ активно применяются государственными структурами при ведении государственного лесопатологического мониторинга (Астапенко и др., 2024).

В Пермском крае в настоящее время лесопатологическое обследование с помощью данных ДЗЗ не проводится. Кроме того, в последние годы в Пермском крае массово усыхают пихтовые древостои вследствие распространения инвазивного вида уссурийского полиграфа (Иванчина и др., 2025; Кривец и др., 2024), в связи с чем использование дистанционных методов ЛПО становится всё более актуальным. Вместе с тем из-за нашествия вида потребность в проведении ЛПО в Пермском крае многократно выросла.

В соответствии с приказом Министерства природных ресурсов РФ от 9 ноября 2020 г. № 910 (Приказ..., 2020) при осуществлении ЛПО по спутниковым данным приводится таксационная характеристика лесных насаждений по данным лесоустройства, что, в связи с регулярным несоответствием фактической характеристике, не позволяет объективно назначить объёмы санитарно-оздоровительных мероприятий. При этом разработаны различные модели и онлайн-продукты, позволяющие определить дистанционно некоторые таксационные показатели, в частности высоту древостоев (Чимитдоржиев и др., 2025; Lang et al., 2023; Lei et al., 2024; Lin et al., 2020; Zhu et al., 2024) и запас древесины (Hüttich et al., 2014; Santoro et al., 2021; Schepaschenko et al., 2021; Yang et al., 2020).

Цель исследований — оценить степень точности определения таксационных показателей усыхающих темнохвойных насаждений Пермского края с помощью глобальных моделей и сервисов, а также возможность их использования для проведения ЛПО дистанционным методом.

## Материалы и методы

Объектами исследований служили темнохвойные насаждения, произрастающие в Южно-таёжном районе европейской части и в районе хвойно-широколиственных (смешанных) лесов европейской части Российской Федерации, в которых наблюдается усыхание деревьев пихты, заселённых уссурийским полиграфом.

Всего подобрано 30 лесных насаждений, характеризующихся однородной вертикальной структурой, одним древесным ярусом. Схема расположения объектов исследований представлена на *рис. 1* (см. с. 265).

С целью определения таксационных показателей насаждений в полевых условиях в летние периоды 2024–2025 гг. закладывались пробные площади (Бунькова и др., 2020), в границах которых выполнен сплошной перебор деревьев с измерением диаметра на высоте 1,3 м с помощью мерной вилки Mantax Blue (Haglof, Швеция), измерена высота каждого дерева с помощью лазерного дальномера Nikon Forestry Pro II. Определена категория санитарного состояния каждого дерева согласно действующим Правилам санитарной безопасности в лесах (Постановление..., 2020). В камеральных условиях рассчитан запас древостоев по категориям санитарного состояния.

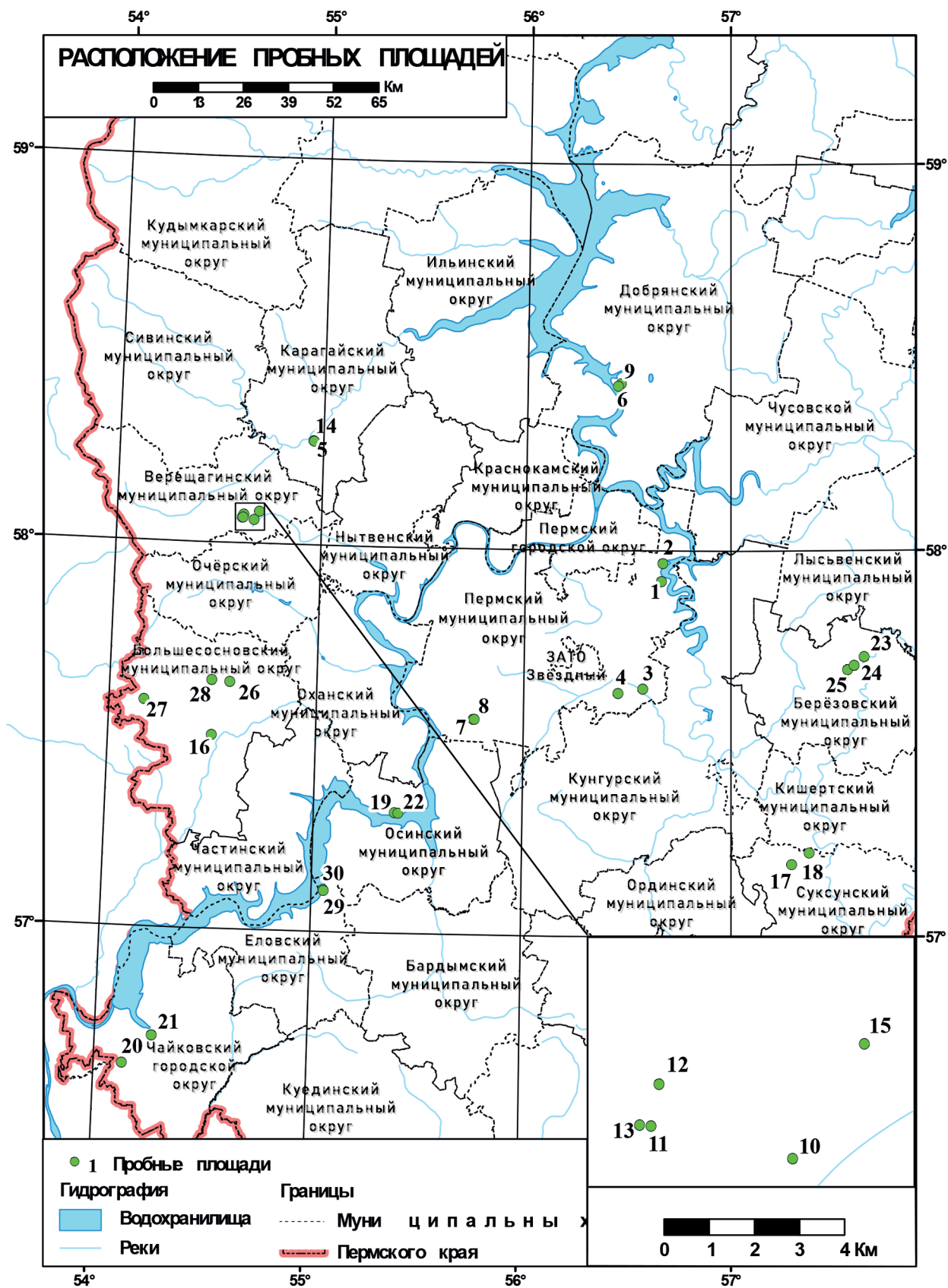


Рис. 1. Схема расположения исследуемых лесных насаждений

При сравнении запасов, определённых в ходе наземной таксации, с запасами, представленными в глобальных сервисах, в жизнеспособную часть древостоев включали здоровые, ослабленные и сильно ослабленные деревья, а в нежизнеспособную — усыхающие, свежий и старый сухостой.

Площадь исследуемых насаждений варьирует от 1,7 до 133,7 га. Насаждения представлены типами леса: ельник зеленомошный, ельник кисличный, ельник травяной, ельник липовый. Средняя высота древостоев изменяется от 16,1 до 25,3 м. Запас на 1 га жизнеспособной части древостоев варьирует от 71 до 827 м<sup>3</sup>/га.

Характерные площади лесных участков с нарушенной устойчивостью, выявляемых в рамках государственного лесопатологического мониторинга для последующего назначения ЛПО, составляют от 0,1 га и более (Приказ..., 2020). Учитывая масштаб объектов, для задач дистанционного выявления санитарного неблагополучия нормативно обосновано и технически допустимо использование материалов ДЗЗ среднего разрешения, включая данные миссии Sentinel-2 и глобальные модели высоты полога.

Это принципиально отличает методику от задач лесоустройства (таксации лесов), где нормативно закреплено требование к использованию снимков высокого и сверхвысокого разрешения (детальной 1–2 м) для подеревной оценки. Применение данных среднего разрешения обеспечивает достаточную точность для детектирования границ повреждённых насаждений на уровне лесотаксационного выдела, позволяя при этом сохранить высокую частоту обновлений данных для оперативного планирования наземных ЛПО.

В настоящее время разработана серия глобальных моделей и онлайн-продуктов для определения высоты и запасов древостоев, среди которых наиболее важными стали четыре, различающиеся особенностями архитектуры и обучающей выборки:

Модель 1 — GFCH (*англ.* Global Forest Canopy Height), 2019 г. (<https://glad.earthengine.app/view/global-forest-canopy-height-2019>). Базируется на интеграции данных космического лидара GEDI (*англ.* Global Ecosystem Dynamics Investigation) и временных рядов оптических снимков Landsat. Алгоритм модели использует ансамбль деревьев решений для экстраполяции измерений структуры леса на глобальный уровень с пространственным разрешением 30 м, привязываясь к базовому 2019 г.

Модель 2 — HRCHM (*англ.* high-resolution canopy height model of the Earth) (<https://nlang.users.earthengine.app/view/global-canopy-height-2020>), представляет собой вероятностную нейронную сеть на основе ансамбля свёрточных моделей, обученную на данных лидара GEDI, установленного на Международной космической станции и Sentinel-2. Её ключевой особенностью выступает оценка неопределённости прогноза, что позволяет минимизировать эффекты насыщения сигнала в высоких лесных массивах, а также применение постобработки с использованием карт Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency — ESA) WorldCover для маскирования нелесных территорий.

Модель 3 — ECHS (*англ.* Estimating Canopy Height at Scale), (<https://worldwidemap.projects.earthengine.app/view/canopy-height-2020>). Это фреймворк глобальной оценки, использующий композитные изображения Sentinel-1 и Sentinel-2. В этой модели применена специализированная функция потерь для компенсации геолокационных ошибок в обучающих данных, а также фильтрация артефактов в горных районах на основе цифровой модели рельефа SRTM (*англ.* Shuttle Radar Topography Mission), что обеспечивает улучшенные метрики точности по сравнению с предыдущими картами.

Модель 4 — VHRM (*англ.* Very High Resolution canopy height Maps) позволяет получать карты высоты растительного покрова сверхвысокого разрешения из RGB-изображений с применением самообучающегося графического преобразователя и свёрточного декодера, обученных на данных аэрофотосъёмки с лидара (<https://wri-datalab.earthengine.app/view/submeter-canopyheight>). Использует архитектуру зрительных трансформеров с самообучением и свёрточным декодером. Обучение данной модели проводилось на аэрофотоснимках высокого разрешения и данных воздушного лазерного сканирования, что позволяет извлекать информацию о высоте непосредственно из текстурных признаков изображений цветовой модели RGB (*англ.* Red, Green, Blue).

Для получения исходных данных дистанционного зондирования использовали снимки Sentinel-2A уровня обработки L2A (*англ.* Level-2A) (данные с коррекцией влияния атмосферы), полученные через сервис Copernicus Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Отбор изображений проводился с учётом критерия облачности менее 20 % и отсутствия перекрытия целевых участков, охватывая вегетационные периоды (с марта по сентябрь) с 2018 по 2025 г. Исключение составил 2020 г., для которого использовались данные, предоставленные авторами моделей и обработанные в среде Google Earth Engine (<https://earthengine.google.com/>).

Техническая реализация расчётов включала несколько этапов. Для локального запуска модели 2 была развёрнута виртуальная среда Conda и разработано собственное программное обеспечение на языке Python, обеспечивающее последовательную автоматизированную обработку снимков Sentinel-2. Для работы с ECHS и выгрузки данных по лесным выделам использовались скрипты на языке JavaScript в среде Google Earth Engine. Оценка точности моделей осуществлялась посредством прямого сопоставления растровых карт с материалами натурных измерений.

Для обработки данных был разработан алгоритм на языке Python, реализующий пиксельноориентированный подход к валидации. Поскольку пространственное разрешение растровых моделей не позволяет сопоставлять их значения с отдельными деревьями напрямую, проводилась пространственная агрегация натуральных данных: высота всех деревьев, полученная по инструментальным измерениям, попадающих в границы одного пикселя растра, усреднялась для получения репрезентативного эталонного значения. На основе сформированных пар данных «значение модели – усреднённое значение инструментальных измерений» рассчитывались основные метрики ошибок (среднее, абсолютная и среднеквадратическая ошибки), коэффициент детерминации  $R^2$ .

Для анализа запаса использованы данные двух онлайн-продуктов. Первый — ESA Biomass\_CCI (*англ.* Biomass Climate Change Initiative) (<https://climate.esa.int/en/projects/biomass/data/>) — продукт, который предоставляет данные для оценки плотности наземной биомассы AGB (*англ.* Above Ground Biomass) в древесной растительности с пространственной привязкой и разрешением 100×100 м. Второй набор данных — это GlobBiomass\_GSV (*англ.* GlobBiomass Growing Stock Volume) (<https://globbiomass.org/biomass/>) за 2010 г. Продукт представляет собой глобальную карту запаса стволовой древесины (в м<sup>3</sup>/га) с пространственным разрешением 100×100 м, полученную на основе совместной обработки многовременных радарных данных L-диапазона (ALOS PALSAR (*англ.* Advanced Land Observing Satellite Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar)) и C-диапазона (Envisat ASAR (*англ.* Environmental Satellite Advanced Synthetic Aperture Radar)) с привлечением лидарных измерений ICESat GLAS (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite Geoscience Laser Altimeter System) для калибровки. Следует отметить, что с помощью указанных наборов данных можно определить только запас живых частей древостоев.

В ходе сравнительного анализа материалов наземной таксации и данных глобальных карт запаса древесины была выполнена оценка точности моделей GlobBiomass\_GSV и Biomass\_CCI. Поскольку предварительная проверка распределения вариационных рядов с применением критерия Шапиро – Уилка выявила значимое отклонение от нормального закона, для установления корреляционных зависимостей применялся коэффициент Спирмена.

## Результаты и обсуждение

Для оценки применимости данных дистанционного зондирования в целях ЛПО была проведена статистическая валидация четырёх моделей высот с материалами полевых инструментальных измерений. Основные показатели точности, полученные в ходе обработки статистики, приведены в *таблице*.

При оценке результатов по всей совокупности данных ни одна из моделей не продемонстрировала положительного коэффициента детерминации, что свидетельствует о слабой связи между модельными и эталонными значениями на уровне отдельных измерений.

Наилучший, хотя и отрицательный, коэффициент детерминации ( $-0,199$ ) показала модель GFCH, обеспечив минимальную среднеквадратическую ошибку (6,7 м), сопоставимую с результатами ECHS. Однако для GFCH характерно систематическое завышение высоты в среднем на 3,4 м.

Статистические показатели точности моделей высоты лесного полога

Модель	$R^2$	Среднеквадратичная ошибка, м	Смещение, м	Средняя абсолютная ошибка, м	Максимальная ошибка, м
GFCH	$-0,199$	6,707	3,400	5,070	22,8
HRCHM	$-0,841$	6,998	1,970	5,523	27,0
ECHS	$-0,562$	6,706	2,487	5,371	22,5
VHRM	$-2,841$	11,982	$-9,632$	10,324	29,0

Модель HRCHM характеризуется наименьшим систематическим смещением (1,97 м), оказываясь наиболее близкой к истинным значениям в среднем, но уступает по величине общей ошибки. Наименее точные результаты получены для VHRM, где ошибка составила около 12 м, а смещение достигло  $-9,6$  м, что указывает на существенное занижение реальной высоты древостоя.

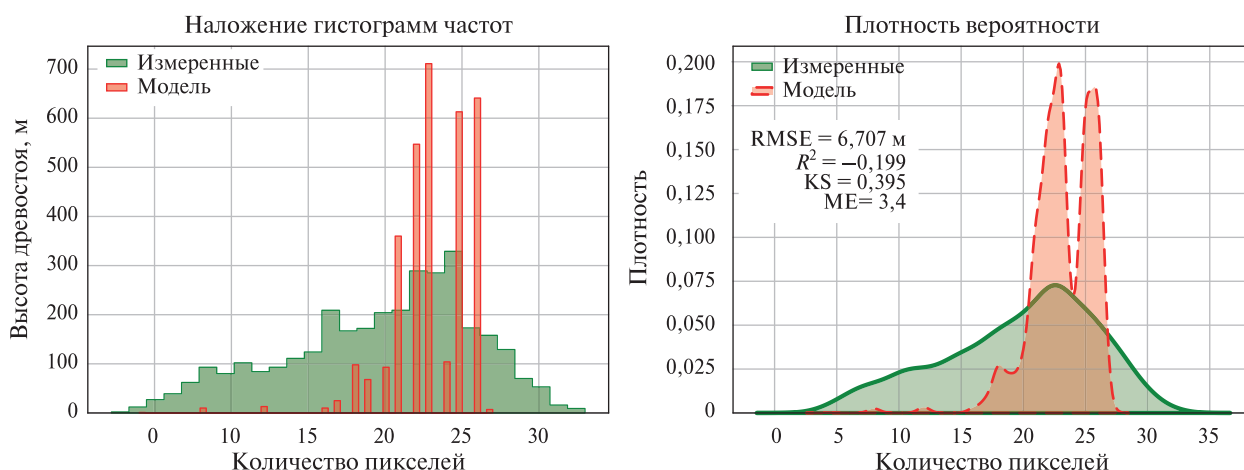


Рис. 2. Сравнение распределения вычисленных значений с измеренными. Модель GFCH. RMSE (англ. Root Mean Squared Error) — среднеквадратичная ошибка, ME (англ. Mean Error) — средняя ошибка, KS (англ. Kolmogorov–Smirnov test) — критерий Колмогорова – Смирнова

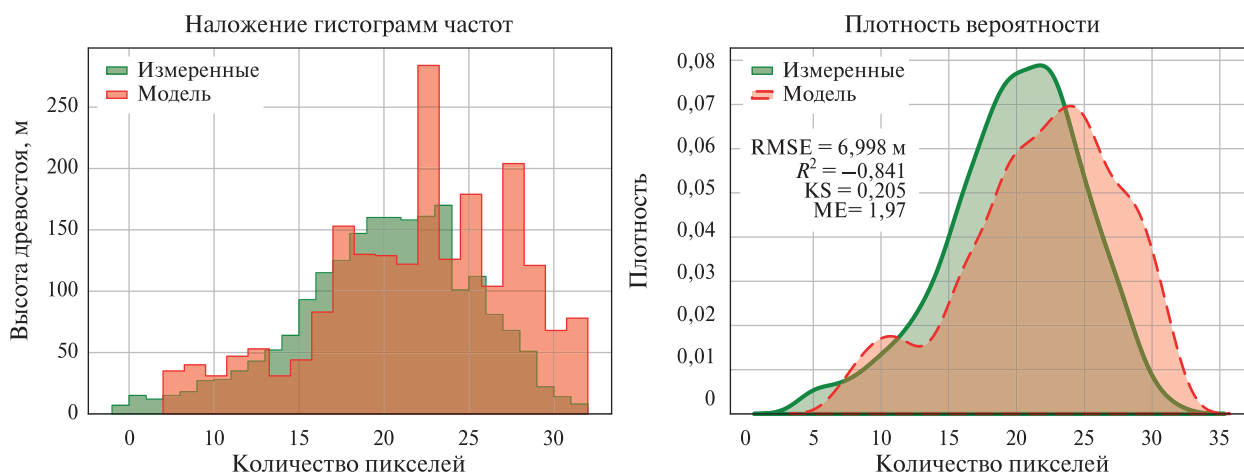
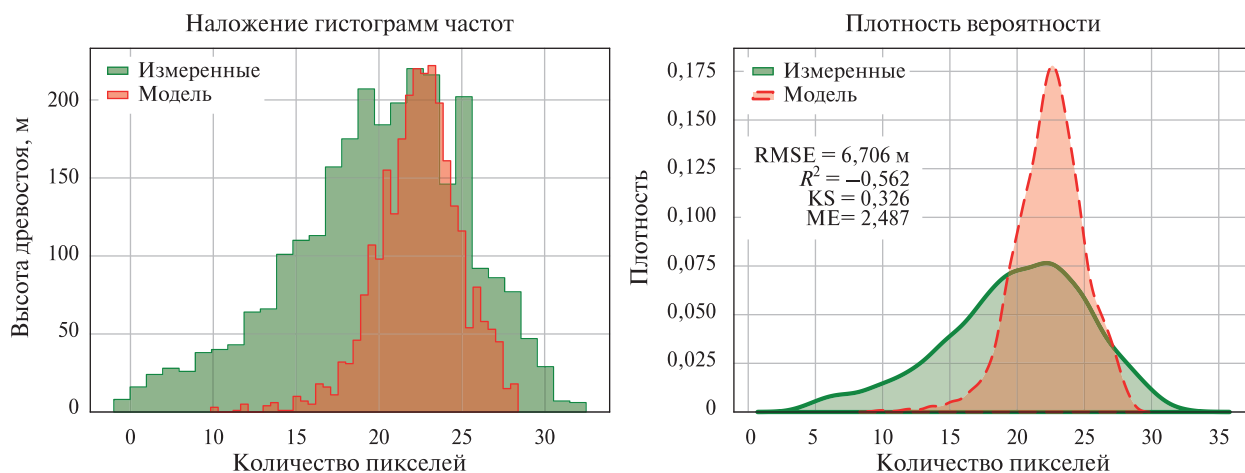
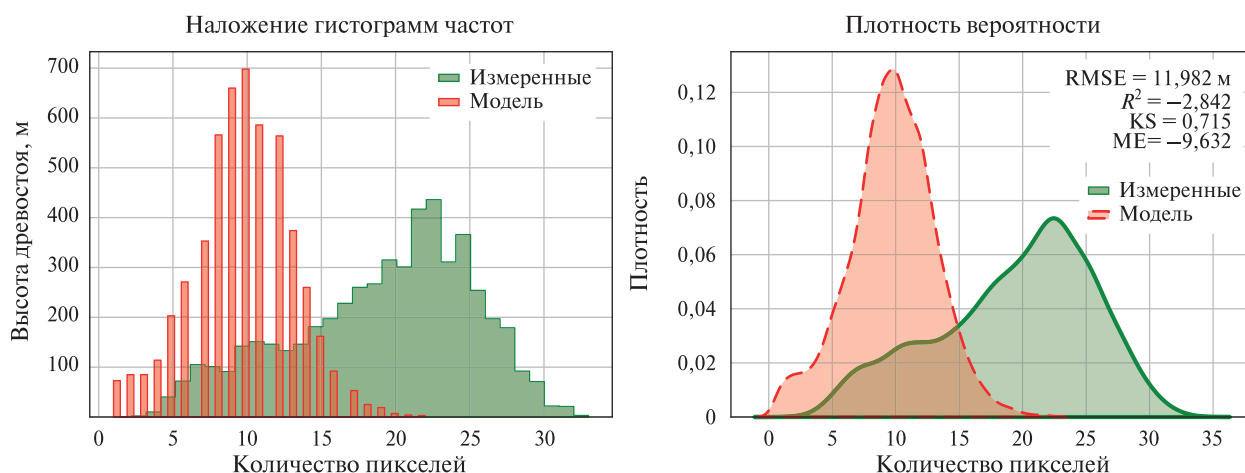


Рис. 3. Сравнение распределения вычисленных значений с измеренными. Модель HRCHM

Важный критерий пригодности данных для ЛПО — соответствие распределения высоты фактической структуре насаждения. На *рис. 2–5* (см. с. 268) представлены результаты анализа за распределения для каждой из исследуемых моделей.



*Рис. 4.* Сравнение распределения вычисленных значений с измеренными. Модель ECHS



*Рис. 5.* Сравнение распределения вычисленных значений с измеренными. Модель VHRM

Распределение значений HRCHM оказалось наиболее близким к измеренным, что подтверждается визуальным перекрытием гистограмм и минимальным значением статистики критерия (0,205). Модель GFCH демонстрирует неестественно резкие пики в распределении, вероятно, обусловленные особенностями алгоритма обработки, при этом расхождение с натурой оценивается как умеренное. Данные ECHS смещены в область высоких значений со сглаженным графиком распределения, тогда как данные VHRM сильно смещены в сторону низких показателей, подтверждая систематическое занижение высоты.

Модель ECHS склонна завышать высоту на большинстве участков, при этом разброс среднеквадратической ошибки варьирует от 4 до 10 м. Несмотря на низкое среднее смещение по всей выборке, модель HRCHM локально демонстрирует нестабильность со значительными отклонениями в обе стороны на отдельных полигонах. Модель VHRM показывает устойчивую тенденцию к занижению высоты практически на всех участках, достигая в ряде случаев критических значений расхождения, а модель GFCH стабильно завышает показатели, однако на ряде территорий смещение минимально, что коррелирует с более низкими показателями общей ошибки.

Сравнение результатов HRCHM по годам демонстрирует их нестабильность, как видно на рис. 6. Именно на временном отрезке 2020–2021 гг. фиксируются максимальные медианные значения и наибольший разброс показателей, которые в этот период наиболее приближены к результатам натурных измерений. В то же время интервалы, удалённые от референсного года (2018–2019 гг. и период после 2022 г.), характеризуются существенным снижением расчётной высоты до заведомо меньших реальных биометрических параметров древостоя. Наблюдаемый спад показателей в 2024–2025 гг., сопровождающийся отдельными статистическими выбросами, свидетельствует не о биологической деградации насаждений, а о снижении предсказательной способности модели вне окна её калибровки и вероятной рассинхронизации с источниками входных данных.

Коэффициент ранговой корреляции Спирмена для модели GlobBiomass\_GSV составил 0,290, что указывает на слабую статистическую связь и свидетельствует о низкой способности спутниковых данных отражать пространственную изменчивость лесного фонда в исследуемом регионе. Для модели Biomass\_CCI данный показатель оказался ещё ниже (0,162), подтверждая отсутствие значимой зависимости. Сопоставление абсолютных величин продемонстрировало существенное систематическое смещение спутниковых оценок в сторону занижения относительно эталонных значений живого запаса древостоев (рис. 7). При увеличении фактического запаса древесины выше 350–400 м<sup>3</sup>/га значения, полученные дистанционным методом, перестают возрастать и фиксируются на уровне 120–125 м<sup>3</sup>/га, показатели модели GlobBiomass\_GSV составили порядка 120 м<sup>3</sup>/га, что соответствует занижению в 2,7 раза. Для модели Biomass\_CCI расхождение оказалось ещё более выраженным: среднее значение не превысило 60 м<sup>3</sup>/га, демонстрируя пятикратное отклонение от фактических данных (рис. 8, см. с. 271).

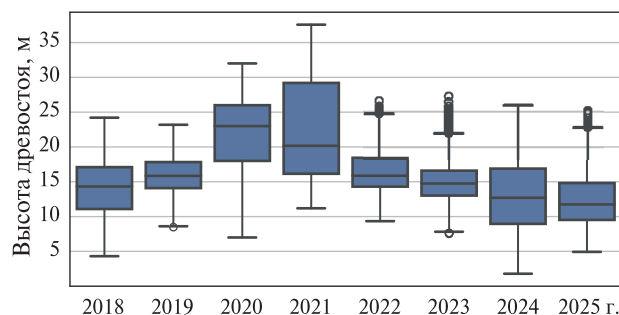


Рис. 6. Динамика распределения высоты древостоя по годам на исследуемом участке по результатам обработки снимков Sentinel-2 с помощью HRCHM

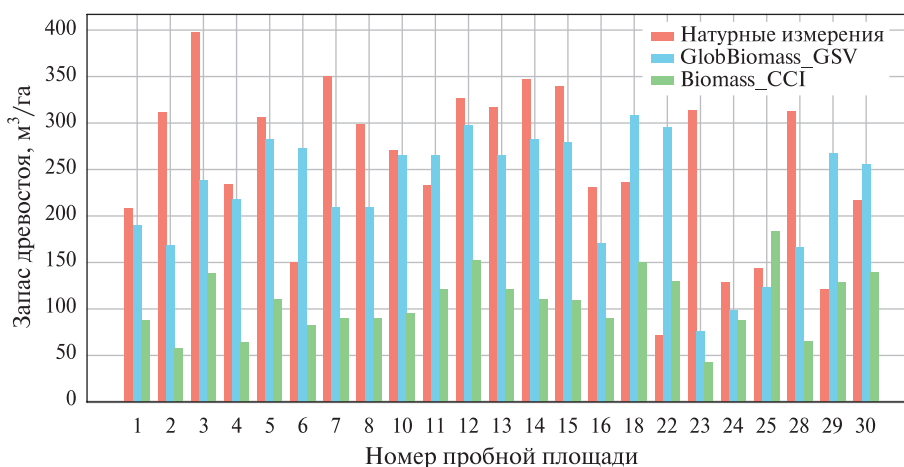


Рис. 7. Сравнение результатов продуктов моделей и полевых инструментальных измерений

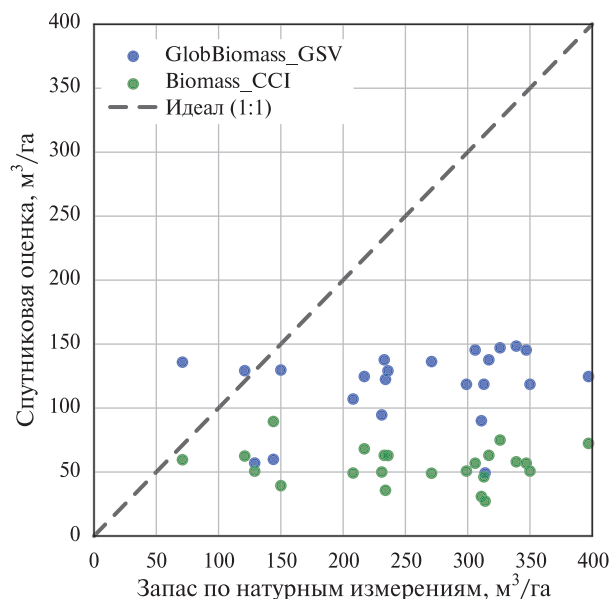


Рис. 8. Оценки данных моделей в сравнении с инструментальными измерениями в зависимости от запаса

Корреляционный анализ подтвердил отсутствие устойчивой связи между наземными и спутниковыми данными. Рассчитанный коэффициент корреляции Пирсона для пары «наземные данные – модель GlobBiomass\_GSV» составил 0,21, а для модели Biomass\_CCI — 0,09, что характеризует связь как предельно слабую и статистически незначимую. Исключение из расчётов объёма мёртвой древесины, составляющей до 30 % от общей биомассы на обследуемой территории, позволило привести данные к сопоставимому виду, однако чувствительность алгоритмов дистанционного зондирования к изменениям живого запаса осталась неудовлетворительной.

Кроме того, указанные глобальные сервисы не позволяют определить запас погибшей древесины, что делает их неприменимыми при проведении ЛПО дистанционным методом.

Ключевым аспектом применимости методов дистанционного зондирования в системе лесопатологического мониторинга становится обоснование пространственного разрешения используемых данных, которое должно коррелировать с масштабом наблюдаемых явлений. Специфика ЛПО, регламентируемая действующим Приказом Минприроды России от 09.11.2020 № 910 (Приказ..., 2020), предполагает работу с лесными участками, характерная площадь которых часто составляет от 0,5 до нескольких гектаров. Важно отметить, что в отличие от Лесоустроительной инструкции (Приказ..., 2018), императивно требующей для таксации лесов использования снимков высокого разрешения (не хуже 2,5 м), нормативная база ЛПО не содержит жёстких ограничений по данному параметру, устанавливая приоритет достоверности определения санитарного состояния насаждений. Это нормативное различие открывает возможности для использования общедоступных спутниковых данных среднего разрешения, однако физические параметры съёмки накладывают существенные ограничения на их интерпретацию.

Анализ геометрического соответствия показывает, что при использовании снимков с разрешением 30 м (серия спутников Landsat), представляющихся стандартом для глобальных продуктов мониторинга леса. На стандартный лесопатологический выдел площадью 0,5 га приходится всего около 5–6 пикселей. Такая дискретизация неизбежно приводит к эффекту «смешанного пикселя», когда спектральный отклик от локальных очагов повреждения усредняется с сигналом от здоровых деревьев, что снижает чувствительность алгоритмов детектирования. В то же время переход к данным с разрешением 10 м (Sentinel-2) позволяет получить для аналогичного участка матрицу из 50 пикселей, что обеспечивает возможность выявления внутривыделной неоднородности структуры полога.

Данный вывод согласуется с результатами исследований, направленных на сравнение эффективности сенсоров различного разрешения в лесном хозяйстве. В частности, изыскания (Astola et al., 2019) при моделировании таксационных показателей в бореальных лесах: точность прогнозирования высоты и запаса по данным Sentinel-2 оказывалась на 5–10 % выше благодаря лучшей детализации текстуры полого. Кроме того, исследования А. А. Хоу с соавторами (Howe et al., 2022) по оценке последствий пожаров подтвердили, что разрешение 10–20 м считается критическим порогом для точного картирования повреждений, необходимого для корректного назначения санитарно-оздоровительных мероприятий.

Сопоставляя эти данные с результатами проведённой валидации глобальных моделей высоты, можно заключить, что низкая точность ряда моделей обусловлена не только алгоритмическими ошибками, но и недостаточным пространственным разрешением исходных данных для условий мозаичной структуры лесов исследуемого региона. Наибольшее отклонение, выявленное у VHRM, вероятно, связано с особенностями её обучения на RGB-изображениях высокого разрешения и спецификой глобальной мозаики снимков спутников WorldView, снимки в которой неоднородны по времени и условиям атмосферы в момент съёмки. Для модели GFCH основной лимитирующий фактор — 30-метровое пространственное разрешение снимков Landsat. Значения отражения от отдельных разновысотных деревьев усредняются на относительно крупной территории, что ведёт к сглаживанию экстремумов и систематическому завышению показателей на участках с разреженным пологом. В случае с HRCHM, показавшей наименьшее смещение, источником погрешностей следует считать особенность обучающей выборки модели, базирующейся на данных лидара GEDI, покрытие которого ограничено 51,6° с. ш., тогда как пробные площади находятся севернее. Специфика ошибок модели ECHS, склонной к завышению высоты и сглаживанию распределения, объясняется интеграцией радарных данных Sentinel-1. Радарный сигнал чувствителен к неровностям и влажности поверхности, но в условиях наличия большого количества сухостоя возникают эффекты рассеяния, которые алгоритм, вероятно, интерпретирует как наличие более высокого полого, чем есть фактически. Также необходимо отметить, что полевые измерения являются точечными и фиксируют параметры конкретных деревьев на ограниченных пробных площадях, в то время как результаты моделей основаны на спутниковых снимках, представляющих собой растровые данные, с данными, агрегированными на площадь в соответствии с пространственным разрешением сенсора. Пиксель среднего пространственного разрешения усредняет диапазон высоты древостоя, нивелируя локальные пики запаса и высоты.

Таким образом, оптимальным решением для задач дистанционного лесопатологического мониторинга представляется использование мультиспектральных данных и производных продуктов с пространственным разрешением 10 м, что представляет собой необходимый компромисс между детальностью, требуемой для оценки состояния небольших выделов, и охватом территории, позволяющим проводить оперативный мониторинг.

## Заключение

Результаты выполненного исследования позволяют сформулировать ряд ключевых выводов относительно эффективности применения данных дистанционного зондирования Земли в практике лесопатологических обследований. Практическая валидация глобальных моделей высоты полого выявила существенные ограничения их прямого использования без предварительной региональной калибровки. Несмотря на высокое разрешение и структурное подобие данных, VHRM оказалась непригодной для количественной оценки из-за критического систематического занижения высоты древостоя (смещение до –9,6 м). Наиболее сбалансированные результаты с точки зрения минимизации среднеквадратической ошибки продемонстрировала GFCH, несмотря на общую тенденцию к завышению показателей. Модель HRCHM проявила значительную временную нестабильность, что ограничивает её применение для задач ретроспективного мониторинга.

Отдельно следует отметить неудовлетворительную результативность глобальных карт запаса древесины (GlobBiomass\_GSV, Biomass\_CCI) для условий исследуемого региона, характеризующуюся критически высокими показателями ошибки. Сопоставление данных выявило среднюю абсолютную ошибку в 207 м<sup>3</sup>/га для GlobBiomass\_GSV и 254 м<sup>3</sup>/га для Biomass\_CCI. При этом среднеквадратическое отклонение достигло 255 и 300 м<sup>3</sup>/га соответственно. Выявленное занижение запасов в насаждениях делает данные продукты неинформативными для принятия хозяйственных решений. Таким образом, в настоящее время методы ДЗЗ в системе лесопатологического мониторинга целесообразно рассматривать как вспомогательное средство для предварительной стратификации территории и оптимизации маршрутов наземных обследований, но не как полноценную замену инструментальным измерениям.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-76-10057, <https://rscf.ru/project/24-76-10057/>.

## Литература

1. Алексеев А. С., Черниковский Д. М. Выявление повреждений хвойных насаждений на основе комплексного анализа результатов дистанционного зондирования Земли и наземных обследований // Изв. вузов. Лесной журн. 2024. № 2. С. 11–28. DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.
2. Астапенко С. А., Голубев Д. В., Шилкина Е. А. Методы и инструменты государственного лесопатологического мониторинга // Наука и технологии Сибири. 2024. № 2(13). С. 47–53.
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Крылов А. М., Стыценко Ф. В., Ховратович Т. С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 215–225.
4. Бунькова Н. П., Залесов С. В., Залесова Е. С., Магасумова А. Г., Осипенко Р. А. Основы фитомониторинга: учеб. пособие. Екатеринбург: Уральский гос. лесотехн. ун-т, 2020. 90 с.
5. Иванчина Л. А., Шилоносов Л. А., Шихов А. Н. Оценка усыхания темнохвойных лесов, вызванного распространением уссурийского полиграфа, на территории Пермского края по спутниковым и полевым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 149–160. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-149-160.
6. Кривец С. А., Керчев И. А., Бисирова Э. М. и др. Обзор современного вторичного ареала уссурийского полиграфа (*Polygraphus proximus* Blandford) на территории Российской Федерации // Российский журн. биол. инвазий. 2024. № 1. С. 49–69. DOI: 10.35885/1996-1499-17-1-49-69.
7. Постановление Правительства РФ от 9 декабря 2020 г. № 2047 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах».
8. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 марта 2018 г. № 122 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции».
9. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 9 ноября 2020 г. № 910 «Об утверждении Порядка проведения лесопатологических обследований и формы акта лесопатологического обследования».
10. Чимитдоржиев Т. Н., Кирбижекова И. И., Дмитриев А. В. Методика радиолокационной поляриметрической интерферометрии для определения высоты молодого соснового леса по данным TerraSAR-X/TanDEM-X зимнего периода // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 101–117. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-101-117.
11. Astola H., Häme T., Sirro L. et al. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region // Remote Sensing of Environment. 2019. V. 223. P. 257–273. DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.019.
12. Howe A. A., Parks S. A., Harvey B. J. et al. Comparing Sentinel-2 and Landsat 8 for burn severity mapping in western North America // Remote Sensing. 2022. V. 14. Article 5249. DOI: 10.3390/rs14205249.
13. Hüttich C., Korets M., Bartalev S. et al. Exploiting growing stock volume maps for large scale forest resource assessment: Cross-comparisons of ASAR- and PALSAR-based GSV estimates with forest inventory in Central Siberia // Forests. 2014. V. 5. No. 7. P. 1753–1776. DOI: 10.3390/f5071753.
14. Lang N., Jetz W., Schindler K., Wegner J. D. A high-resolution canopy height model of the Earth // Nature Ecology and Evolution. 2023. V. 7(11). P. 1778–1789. DOI: 10.1038/s41559-023-02206-6.
15. Lei Y., Wang Y., Wang G. et al. Estimating forest canopy height based on GEDI lidar data and multisource remote sensing images // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote

- Sensing and Spatial Information Sciences. 2024. V. XLVIII-1-2024. P. 297–303. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-297-2024.
16. Lin H., Xu M., Cao C. et al. Estimates of forest canopy height using a combination of ICESat-2/ATLAS data and stereo-photogrammetry // Remote Sensing. 2020. V. 12. Article 3649. DOI: 10.3390/rs12213649.
  17. Santoro M., Cartus O., Carvalhais N. et al. The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations // Earth System Science Data. 2021. V. 13. Iss. 8. P. 3927–3950. DOI: 10.5194/essd-13-3927-2021.
  18. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al. Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported // Scientific Reports. 2021. V. 11(1). Article 12825. DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
  19. Yang L., Liang S., Zhang Y. A new method for generating a global forest aboveground biomass map from multiple high-level satellite products and ancillary information // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2020. V. 13. P. 2587–2597. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2987951.
  20. Zhu W., Li Y., Luan K. et al. Forest canopy height retrieval and analysis using random forest model with multi-source remote sensing integration // Sustainability. 2024. V. 16. Article 1735. DOI: 10.3390/su16051735.

## Global services for determining forest inventory parameters in forest pathology surveys of declining dark coniferous stands of Perm Krai

L. A. Ivanchina, S. V. Artyushkin, A. Yu. Odintsov

*Perm State University, Perm 614990, Russia*  
*E-mail: ivanchina.ludmila@yandex.ru*

In recent years, the need for forest pathology surveys (FPS) has increased significantly in Perm Krai due to the spread of the invasive four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford). Widespread dieback of fir stands is currently being observed, making the implementation of remote forest health survey methods increasingly relevant. The purpose of the study is to assess the accuracy of determining forest inventory indicators of drying dark coniferous plantations in Perm Krai using the existing models and online products, as well as the possibility of using them for conducting remote FPS. Currently, there are models and global services for determining forest canopy height and growing stand volume. Practical validation of global canopy height models has revealed significant limitations in their direct use without prior regional calibration. The model used in very high resolution canopy height maps from RGB imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar (VHRM), despite high spatial resolution and detailed display of forests borders, proved unsuitable for quantitative assessment due to a critical systematic underestimation of tree stands heights (maximal bias –9.6 m). Model Global Forest Canopy Height (GFCH) demonstrated the most balanced results by minimizing mean squared error, despite the general tendency to overestimate indicators. A high-resolution canopy height model of the Earth (HRCHM) showed significant temporal instability, which limits its use for retrospective monitoring tasks. Global maps of growing stock volume GlobBiomass Growing Stock Volume (GlobBiomass\_GSV), Biomass Climate Change Initiative (Biomass\_CCI) demonstrated unsatisfactory results for conditions of Perm Krai. The identified underestimation of growing stock volume proves these products uninformative for forest management decision making. Consequently, current remote sensing techniques in forest pathological surveys should be viewed as a supplementary tool for preliminary area stratification and ground survey route optimization, rather than a full-scale substitute for instrumental field measurements.

**Keywords:** forest pathology surveys, remote sensing, stand height, growing stock volume, Perm Krai, global canopy height maps

Accepted: 24.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-263-276

## References

1. Alekseev A. S., Chernikhovsky D. M., Identification of damage to coniferous stands based on comprehensive analysis of the results of remote sensing of the Earth and ground surveys, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi Zhurnal*, 2024, No. 2, pp. 11–28 (in Russian), DOI: 10.37482/0536-1036-2024-2-11-28.
2. Astapenko S. A., Golubev D. V., Shilkina E. A., Methods and tools of state forest pathology monitoring, *Science and Technology of Siberia*, 2024, No. 2(13), pp. 47–53 (in Russian).
3. Bartalev S., Egorov V., Khovratovich T., Krylov A., Stytsenko F., The evaluation of possibilities to assess forest burnt severity using multi-spectral satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, V. 7, No. 3, pp. 215–225 (in Russian).
4. Bun'kova N. P., Zalesov S. V., Zalesova E. S., Magasumova A. G., Osipenko R. A., *Osnovy fitomonitoringa: uchebnoe posobie* (Basics of phytomonitoring: Textbook), Ekaterinburg: Ural State Forest Engineering University, 2020, 90 p. (in Russian).
5. Ivanchina L. A., Shilonosov L. A., Shikhov A. N., Estimation of drying out of dark coniferous forests caused by the spread of the four-eyed fir bark beetle in Perm Krai based on satellite and field observations, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 3, pp. 149–160 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-149-160.
6. Krivets S. A., Kerchev I. A., Bisirova E. M. et al., Overview of the current secondary range of the Four-eyed fir bark beetle (*Polygraphus proximus* Blandford) in the Russian Federation, *Russian J. Biological Invasions*, 2024, V. 15, No. 2, pp. 180–197, DOI: 10.1134/S2075111724700061.
7. *Postanovlenie Pravitel'stva RF "Ob utverzhdenii Pravil sanitarnoi bezopasnosti v lesakh"* (Resolution of the Government of the Russian Federation "On approval of the Rules for sanitary safety in forests"), Dec. 9, 2020, No. 2047 (in Russian).
8. *Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ehkologii Rossiiskoi Federatsii "Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noi instruktsii"* (Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation "On approval of the Forest management instructions"), Mar. 29, 2018, No. 122 (in Russian).
9. *Prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ehkologii Rossiiskoi Federatsii "Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya lesopatologicheskikh obsledovaniy i formy akta lesopatologicheskogo obsledovaniya"* (Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation "On approval of the Procedure for conducting forest pathology surveys and the form of the forest pathology survey report), Nov. 9, 2020, No. 910 (in Russian).
10. Chimitdorzhiev T. N., Kirbizhekova I. I., Dmitriev A. V., PolInSAR-based estimation of young pine forest height in winter using TerraSAR-X/TanDEM-X data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 4, pp. 101–117 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-101-117.
11. Astola H., Häme T., Sirro L. et al., Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 223, pp. 257–273, DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.019.
12. Howe A. A., Parks S. A., Harvey B. J. et al., Comparing Sentinel-2 and Landsat 8 for burn severity mapping in western North America, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Article 5249, DOI: 10.3390/rs14205249.
13. Hüttich C., Korets M., Bartalev S. et al., Exploiting growing stock volume maps for large scale forest resource assessment: Cross-comparisons of ASAR- and PALSAR-based GSV estimates with forest inventory in Central Siberia, *Forests*, 2014, V. 5, No. 7, pp. 1753–1776, DOI: 10.3390/f5071753.
14. Lang N., Jetz W., Schindler K., Wegner J. D., A high-resolution canopy height model of the Earth, *Nature Ecology and Evolution*, 2023, V. 7(11), pp. 1778–1789, DOI: 10.1038/s41559-023-02206-6.
15. Lei Y., Wang Y., Wang G. et al., Estimating forest canopy height based on GEDI lidar data and multi-source remote sensing images, *The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2024, V. XLVIII-1-2024, pp. 297–303, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-2024-297-2024.
16. Lin H., Xu M., Cao C. et al., Estimates of forest canopy height using a combination of ICESat-2/ATLAS data and stereo-photogrammetry, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, Article 3649, DOI: 10.3390/rs12213649.
17. Santoro M., Cartus O., Carvalhais N. et al., The global forest above-ground biomass pool for 2010 estimated from high-resolution satellite observations, *Earth System Science Data*, 2021, V. 13, Iss. 8, pp. 3927–3950, DOI: 10.5194/essd-13-3927-2021.
18. Schepaschenko D., Moltchanova E., Fedorov S. et al., Russian forest sequesters substantially more carbon than previously reported, *Scientific Reports*, 2021, V. 11(1), Article 12825, DOI: 10.1038/s41598-021-92152-9.
19. Yang L., Liang S., Zhang Y., A new method for generating a global forest aboveground biomass map from multiple high-level satellite products and ancillary information, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, V. 13, pp. 2587–2597, DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2987951.

20. Zhu W., Li Y., Luan K. et al., Forest canopy height retrieval and analysis using random forest model with multi-source remote sensing integration, *Sustainability*, 2024, V. 16, Article 1735, DOI: 10.3390/su16051735.