Оценка и верификация надземной фитомассы по данным БПЛА и глобальных наборов данных на примере южно-таёжной подзоны Западной Сибири

А. О. Елисеев [1], Э. М. Бисирова [1,2], И. Г. Грачев [1], И. А. Керчев [1]

[1] *Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН*
Томск, 634055, Россия
E-mail: kuzoller@gmail.com

[2] *Томский филиал Всероссийского центра карантина растений*
Томск, 634021, Россия
E-mail: bissirovaem@mail.ru

Проведена комплексная оценка надземной фитомассы лесных насаждений южно-таёжной подзоны Западной Сибири (Томская область) на основе интеграции глобальных наборов данных (GlobBiomass, GEOCARBON, GFW (*англ.* Global Forest Watch)), полевых измерений и аэрофотосъёмки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА) DJI Phantom 4 Multispectral. Разработан алгоритм экстраполяции фитомассы через цифровую модель местности (ЦММ), демонстрирующий высокую точность (коэффициент детерминации 0,89) при сопоставлении с наземными данными. Установлено, что глобальные продукты имеют систематические погрешности. Набор данных GlobBiomass имеет наименьшую погрешность, средняя абсолютная процентная ошибка MAPE (*англ.* Mean Absolute Percentage Error) составляет 32 %. Для остальных наборов данных погрешности были заметно выше, так для набора данных GEOCARBON средняя абсолютная погрешность равна 43 %, а для набора GFW погрешность (MAPE) — 44 %. Погрешности в первую очередь обусловлены грубым пространственным разрешением и недостаточной адаптацией алгоритмов к бореальным лесам. Ключевым результатом стала методика расчёта объёма древостоя по ЦММ с высоким пространственным разрешением, обеспечивающая детальную оценку фитомассы на площади 109 га. Показано, что сочетание данных БПЛА и локальных аллометрических моделей значительно повышает точность по сравнению с глобальными картами. Исследование подчёркивает важность верификации спутниковых продуктов и перспективность применения БПЛА для мониторинга углеродного пула в лесных экосистемах.

Ключевые слова: ЦММ, БПЛА, GlobBiomass, GEOCARBON, GFW, объём древесного полога, надземная фитомасса

Одобрена к печати: 27.08.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-222-233

Введение

Лес играет важную роль в глобальном углеродном цикле, поскольку он удерживает значительную часть надземного углерода в своей фитомассе. Прямое измерение надземной фитомассы (постоянные и временные пробные площади) требуют значительных временных затрат, а повторные измерения, если они вообще проводятся, обычно ограничиваются 10-летними интервалами. Для оценки запасов фитомассы обычно применяют аллометрические зависимости как для отдельного насаждения, так и для их совокупности (Замолодчиков и др., 2005; Усольцев и др., 2016; Швиденко и др., 2004; Щепащенко и др., 2017).

В свою очередь активное применение находят методы определения надземной фитомассы по космоснимкам, что является многообещающей альтернативой, особенно в регионах с обширными лесными территориями и труднодоступными участками. Спутниковые данные, обеспечивающие наблюдения за всей поверхностью Земли с регулярными повторными обновлениями в зависимости от характеристик датчика, позволяют охватить большие территории с высокой частотой наблюдений, что делает спутниковое дистанционное зондирование незаменимым инструментом для мониторинга динамики растительности в глобальном и региональном масштабе (Макарова, Владимирова, 2020; Hesen et al., 2005).

Одно из ключевых преимуществ спутниковых методов заключается в их способности предоставлять данные в режиме реального времени или с минимальной задержкой, что особенно важно для оперативного реагирования на изменения в экосистемах, такие как вырубка лесов, пожары или засухи. Кроме того, спутниковые технологии позволяют интегрировать данные из различных источников, включая оптические, радиолокационные и лидарные системы, что повышает точность и надёжность оценок фитомассы (Li et al., 2024).

В настоящее время существуют только косвенные методы дистанционной оценки фитомассы, основанные на измерении параметров, связанных с растительным покровом, таких как спектральные индексы, высота растительности, плотность кроны и другие характеристики. Эти методы используют корреляцию между наблюдаемыми данными и фактической фитомассой, что требует тщательной калибровки и валидации с применением наземных измерений. Затруднительно отличить молодой лес от старого или выявить средний диаметр и высоту древостоев, поэтому спутниковые данные сами по себе недостаточны для надёжной оценки фитомассы (Щепащенко и др., 2017). Современные подходы, включающие машинное обучение и искусственный интеллект, помогают преодолеть эти ограничения, улучшая точность прогнозов и автоматизируя процесс анализа данных (Kumar et al., 2021).

Такие индексы, как NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), могут терять чувствительность на участках с густым растительным покровом, а в засушливых или полупустынных зонах влияние почвенного фона и низкой вегетационной активности искажает результаты. Кроме того, временное разрешение спутниковых данных не всегда соответствует динамике роста растений, особенно в условиях быстрых сезонных изменений или краткосрочных стрессовых событий (засухи, пожары). Атмосферные помехи, такие как облачность, также снижают точность измерений, требуя сложных алгоритмов коррекции (Данюлис и др., 1989). Эти ограничения приводят к тому, что в некоторых случаях спутниковые данные демонстрируют слабую связь с реальными показателями. Например, исследование на основе данных SPOT-4 выявило отсутствие явной корреляции между индексом NDVI и запасами надземной фитомассы, что, вероятно, связано с неодинаковыми условиями увлажнения и физико-химическими свойствами почв (Гопп, Смирнов, 2009). В то же время применение более детальных данных, таких как мультиспектральные снимки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), может улучшить точность оценок. Например, на пробном участке в Малайзии индекс NDVI показал удовлетворительную связь (коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}55$) с данными аллометрических расчётов (Anuar et al., 2023). Применение продуктов отражающей способности MODIS для территории России также не даёт явной связи с надземной фитомассой, что связано с рядом факторов. Так, в исследовании (Houghton et al., 2007) лишь по одному из 12 регионов коэффициент регрессии между лесотаксационными данными превысил 0,5.

В связи с этим в последние годы всё большее внимание уделяется глобальным наборам данных о надземной фитомассе AGB (*англ.* Above-Ground Biomass), которые содержат информацию о запасах фитомассы на поверхности Земли. Эти данные обычно представлены в виде растровых изображений или векторных слоёв, где каждая ячейка или объект содержит значение фитомассы в тоннах на гектар (т/га) или других единицах измерения. Такие наборы данных создаются на основе интеграции спутниковых наблюдений, наземных измерений и моделей.

Современные глобальные наборы данных о надземной фитомассе создаются с использованием дистанционного зондирования Земли (спутниковые снимки, лидарные данные) и наземных измерений. Они интегрируются с географическими информационными системами (ГИС) и моделями машинного обучения для повышения точности и детализации.

В настоящей работе выполнена оценка применимости глобальных наборов данных о надземной фитомассе и проведено сопоставление данных об объёме фитомассы, полученной в результате полевых наблюдений и аллометрического моделирования, а также осуществлена пространственная интерполяция данных полевых наблюдений, полученных с БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral, на основе цифровой модели местности (ЦММ).

Материалы и методы

Район исследования

Полевые исследования проводились в лесных экосистемах южно-таёжной подзоны Западной Сибири (Томская область). Для этой территории характерны лесные экосистемы с преобладанием хвойных и смешанных лесов. Болота и антропогенная нагрузка снижают средние показатели, делая район важным для исследований углеродного баланса и устойчивого лесопользования. Основными лесообразующими породами в регионе являются сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), ель сибирская (*Picea obovata* Ledeb.) и пихта сибирская (*Abies sibirica* Ledeb.) с участием мелколиственных видов — берёзы (*Betula pendula Roth*, *Betula pubescens Ehrh*.) и осины (*Populus tremula* L.).

Для исследования были выбраны участки, отражающие типичную структуру южно-таёжных лесов, включая как спелые темнохвойные древостои, так и производные насаждения, сформировавшиеся после рубок и гарей. Это позволило охватить широкий диапазон изменчивости таксационных показателей и биометрических характеристик деревьев, что важно для последующего сопоставления с дистанционными данными.

Оценка запасов фитомассы проводилась на 15 постоянных пробных площадях (ППП), расположенных в пределах Томского района Томской области. Исследование охватило темнохвойные леса с преобладанием пихты сибирской, возраст которых составляет 65–105 лет, с примесью ели и кедра сибирского. Эти участки расположены в Ларинском ландшафтном заказнике (ППП № 10–13) и вблизи посёлка Итатка (ППП № 14). Также были обследованы кедровники, представляющие собой преимущественно чистые массивы кедра сибирского возрастом 120–170 лет (ППП № 1–5, 7–9). Дополнительно в исследование вошли вторичные лиственные леса с преобладанием берёзы в породном составе, средний возраст которой составляет 70 лет (ППП № 6), а также осинник со средним возрастом 60 лет (ППП № 15). Местоположение ППП указано в *табл. 1* и на *рис. 1*.

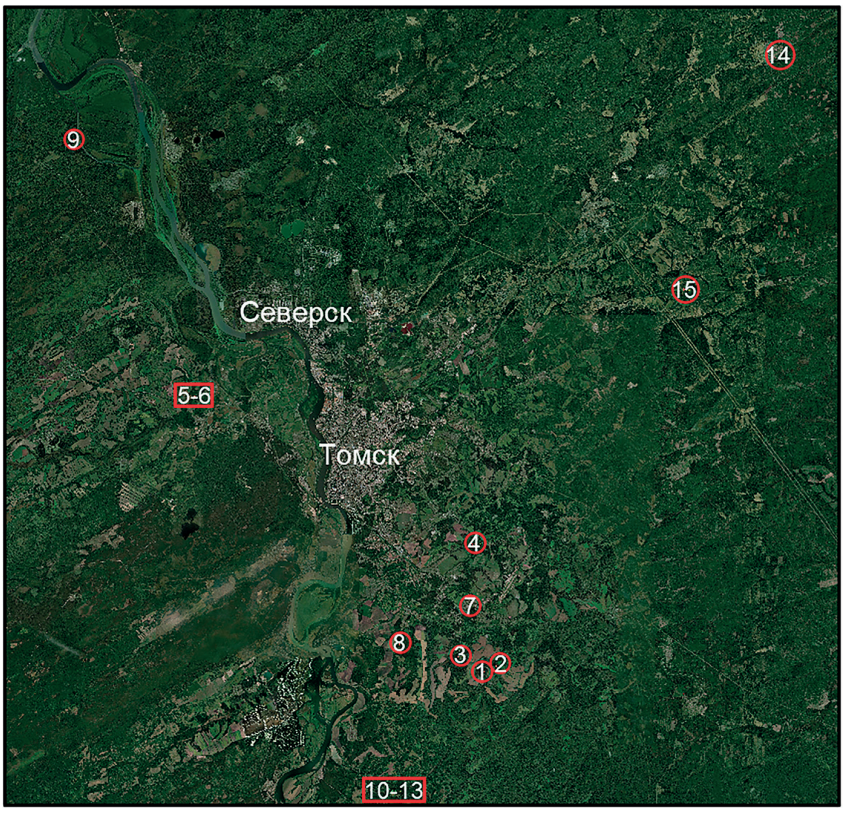


Рис. 1. Местоположение пробных площадей

Таблица 1. Местоположение пробных площадей

№	Местоположение	Размер ППП, га	Площадь съёмки БПЛА, га	Координаты	
				с. ш.	в. д.
1	Белоусово	0,50	13,70	56° 18′ 34,9″	85° 10′ 21,5″
2	Белоусово	0,30	9,30	56° 18′ 51,8″	85° 11′ 28,0″
3	Аксёново	0,60	8,66	56° 19′ 21,0″	85° 08′ 02,3″
4	Протопопово	1,00	8,40	56° 24′ 58,6″	85° 09′ 29,7″
5	Зоркальцево	1,00	13,40	56° 32′ 20,2″	84° 44′ 12,9″
6	Зоркальцево	0,35	13,40	56° 32′ 13,5″	84° 43′ 55,3″
7	Богашево	0,40	–	56° 21′ 50,9″	85° 09′ 00,7″
8	Лучаново-Ипатово	0,64	12,80	56° 19′ 57,7″	85° 02′ 44,4″
9	Нагорный Иштан	0,16	7,70	56° 45′ 06,7″	84° 33′ 16,1″
10	Ларинский заказник	0,20	7,40	56° 45′ 06,7″	84° 33′ 16,1″
11	Ларинский заказник	0,25	7,20	56° 12′ 36,1″	85° 02′ 05,1″
12	Ларинский заказник	0,25	3,40	56° 12′ 31,5″	85° 02′ 19,7″
13	Ларинский заказник	0,16	4,70	56° 12′ 41,4″	85° 01′ 49,3″
14	Итатка	0,25	–	56° 49′ 15,5″	85° 37′ 08,2″
15	Семилужки	0,25	12,30	56° 37′ 36,0″	85° 28′ 25,2″

Полевые измерения

Полевые исследования проведены на постоянных пробных площадях размером 0,25–1,0 га, в зависимости от густоты, полноты древостоя и его породного состава, с числом деревьев от 100 шт. материнского полога, которые заложены в соответствии с ОСТ 56-69-83 (1984) в однородных насаждениях и представляют собой локальные биогеоценозы. На ППП осуществляется сплошной перечёт деревьев по породам. Каждое дерево на ППП нумеровалось масляной краской, инструментально измерялись их диаметр и высота. Определение возрастной структуры древостоя проводится в результате подсчётов годичных колец по древесным кернам, взятым приростным буравом. На ППП устанавливались таксационные показатели (состав древостоя, средний диаметр и высота, возраст, площадь сечения, запас древесины, полнота и густота) древостоев методами, принятыми в лесоведении (Анучин, 1982; Справочное..., 1974; Чмыр и др., 2000).

Расчёт фитомассы древесных насаждений проведён по аллометрической модели, предназначенной для оценки запасов и годичного депонирования углерода согласно В. А. Усольцеву и соавторам (Усольцев и др., 2022).

Применение данных БПЛА

Установлена зависимость между пространственным распределением высоты древесного полога, полученным по данным БПЛА, и показателями фитомассы древостоя для оценки углеродного пула лесных экосистем.

Для этой цели выполнялся расчёт объёма древесного полога на основе ЦММ с высоким пространственным разрешением (<20 см/пиксель, высота съёмки 100 м), полученной по данным аэрофотосъёмки с БПЛА DJI Phantom 4 Multispectral. Цифровая модель местности строилась в DJI Terra методом фотограмметрической обработки сшитых снимков. На первоначальном этапе определялась модель высоты полога, которая рассчитывалась как разница между ЦММ и цифровой моделью рельефа (ЦМР) (Silva et al., 2016).

Всего в ходе исследования было рассмотрено 15 ППП. Корректные данные ЦММ по данным БПЛА охватывали 13 ППП, для 2 ППП присутствовали значительные пропуски в данных, и они были исключены из анализа. Общая площадь всех заложенных ППП составила 6,3 га, площадь аэрофотосъёмки по данным БПЛА составила 109 га (более 1 км^2). Зона аэрофотосъёмки охватывала буферную территорию вокруг ППП для интерполяции полевых данных. Наибольшая площадь аэрофотосъёмки составила 13,7 га (ППП № 1), наименьшая — 3,4 га (ППП № 12).

Растровые расчёты осуществлялись в ГИС SAGA (*англ.* System for Automated Geoscientific Analyses), схема расчёта представлена на *рис. 2.*

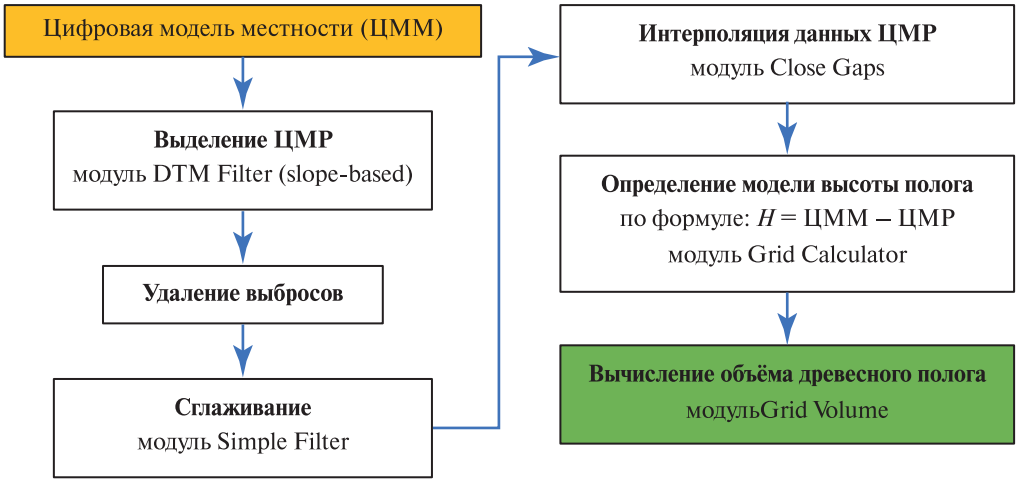


Рис. 2. Алгоритм расчёта объёма древесного полога по данным БПЛА

Для выделения ЦМР из ЦММ использовался модуль DTM Filter, основанный на допущении, что большая разница высот между двумя соседними ячейками растра вряд ли будет вызвана крутым уклоном местности. Ячейка растра классифицируется как рельеф, если в радиусе поиска нет другой ячейки, в которой разница высот между этими ячейками превышает допустимую максимальную разницу высот на расстоянии между этими ячейками. В данном модуле был задан радиус поиска в 50 ячеек (10 м), уклон рельефа 30 % для исключения крон деревьев из ЦМР.

После выделения ЦМР были удалены некорректные ячейки растра. Для этого использовался калькулятор растров Grid Calculator, в котором был задан диапазон высот, либо значение ячеек было скорректировано вручную.

После этого выполнялось сглаживание модели рельефа в модуле Simple Filter для удаления помех. На следующем этапе проводилась интерполяция данных для выделенных фрагментов ЦМР в модуле Close Gaps.

Затем определялась высота древостоя по разности между цифровой моделью местности и рельефом в калькуляторе растров. На последнем этапе вычислялся объём древесного полога для заданного участка с использованием модуля Grid Volume без поправки на полноту.

Для верификации глобальных карт надземной фитомассы и данных по объёму древостоя, полученных по данным БПЛА, использовались полевые наблюдения по 15 пробным площадям. Данные об объёме древесного полога удалось получить по 13 из 15 ППП, по которым имелась корректная ортофотосъёмка, в дальнейшем по ним была выполнена верификация с глобальными наборами данных о надземной фитомассе.

Используя эти данные, выполнена экстраполяция данных о запасе фитомассы и углерода на значительно большую территорию. Для этого была установлена линейная зависимость между данными полевых измерений фитомассы и объёмом древостоя, полученным по ЦММ: $Ф = 0{,}98W_д + 25$, $R^2 = 0{,}89$, где Ф — фитомасса, т/га; $W_д$ — объём древесного полога, м^3.

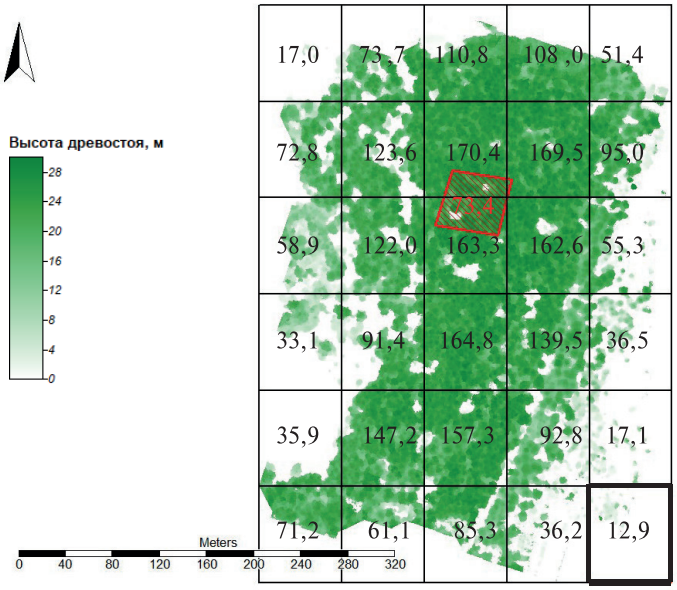


Рис. 3. Фитомасса (в т/га) для участка Зоркальцево, полученная по уравнению связи, и ППП № 5 (выделено красным)

Для примера на *рис. 3* показан участок съёмки БПЛА для Зоркальцево общей площадью 13,4 га, включающий ППП № 5 площадью 0,25 га. Данные по 30 ячейкам площадью 0,56 га были рассчитаны с помощью уравнения связи. В результате можно визуально оценить распределение фитомассы для каждой ячейки из всех, по которым был посчитан объём древесного полога.

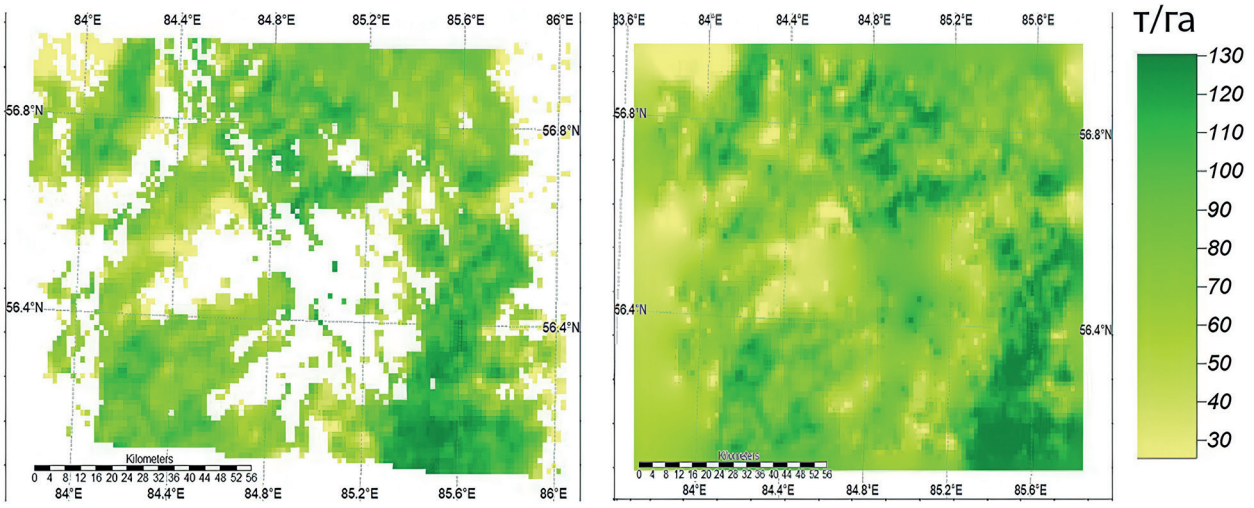
Глобальные наборы данных

Для верификации полученных нами данных для пробных площадей использовались глобальные общедоступные карты надземной фитомассы GEOCARBON, GlobBiomass и GFW (*англ.* Global Forest Watch).

Глобальная карта надземной фитомассы GEOCARBON за усреднённый период 2000–2012 гг. была создана путём объединения уточнённой пантропической и бореальной карт, ранее полученных на основе спутниковых данных и скорректированных с учётом фактических наземных наблюдений, с целью обеспечения глобального покрытия. Пространственное разрешение ячейки растра составляет 0,01° или 1200 м, площадь ячейки равна 144 га (Avitabile et al., 2016).

В данных присутствуют пробелы (пропуски), которые не позволяли оценить объём надземной фитомассы для пяти участков, поэтому в дальнейшем была выполнена интерполяция растровых данных для восстановления пробелов. Для этого применялся модуль Close Gaps в ГИС SAGA. В результате данные по отсутствующим территориям были определены с долей значительной погрешности, *рис. 4* (см. с. 228).

Глобальная карта надземной фитомассы GlobBiomass за 2010 г. была получена по изображениям космического радара с синтезированной апертурой с интенсивностью обратного рассеяния, на основе которой объёмный запас леса был оценён с использованием физически обоснованных моделей, а затем преобразован в надземную фитомассу с использованием коэффициентов плотности древесины, рассчитанных по эмпирическим моделям (Santoro, 2018). Оценка надземной фитомассы была получена по спутниковым радарным (ALOS PALSAR (*англ.* Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar), Envisat ASAR (*англ.* Advanced Synthetic Aperture Radar)), оптическим (Landsat-7) и лидарным (ICESat (*англ.* Ice, Cloud, and land Elevation Satellite)) данным.



а *б*

Рис. 4. Фрагмент карты глобальной надземной фитомассы GEOCARBON (в т/га) в районе Обь-Томского междуречья: *а* — с пробелами в данных; *б* — использованием интерполяции

Надземная фитомасса по данным GlobBiomass представлена в размерности т/га за 2010 г. Пространственное разрешение ячейки растра составляет 100 м, площадь ячейки — 1 га. В отличие от набора данных GEOCARBON он имеет значительно более высокую детализацию и охватывает всю рассматриваемую территорию, *рис. 5.*

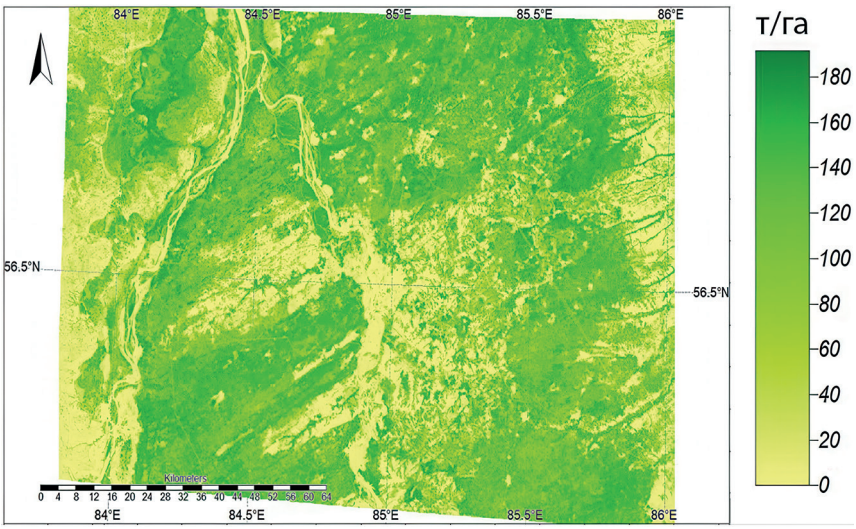


Рис. 5. Фрагмент карты глобальной надземной фитомассы GlobBiomass (в т/га) в районе Обь-Томского междуречья

Динамичная онлайн-платформа для мониторинга лесов GFW включает в себя оценку запасов живой древесной фитомассы (AGB) за период с 2000 по 2022 г.

В оценках AGB GFW используются спутниковые снимки: для 3D-анализа структуры лесов применяется лидар NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) GEDI (*англ.* Global Ecosystem Dynamics Investigation), а также космоснимки спутников Sentinel-1 (радар) и Sentinel-2 (оптический). Пространственное разрешение составляет 30 м по различным типам леса (тропический, умеренный, бореальный). Ежегодные обновления данных отражают изменения, связанные с обезлесением, деградацией или демутационными процессами (Araza et al., 2022; Zarin et al., 2016).

На первоначальном этапе расчёт надземной фитомассы для каждой анализируемой пробной площади определялся как среднее арифметическое значение всех ячеек растра набора данных. Однако в результате была получена слабая корреляционная зависимость ($R^2 < 0{,}2$) с полевыми измерениями по всем наборам данных. Тогда было принято решение проводить оценку, суммируя каждую ячейку растра, попадающую в границу пробной площади, предварительно увеличив пространственное разрешение до 10 м для более корректной оценки параметров на малых пробных площадях (минимальный размер ППП 40×40 м). Для увеличения пространственного разрешения исходных растров использовалась интерполяция B-сплайнами в модуле Resampling ГИС SAGA. Этот метод был выбран, так как он обеспечивает плавные переходы между ячейками при пересчёте значений, позволяя корректно агрегировать информацию для малых пробных площадей.

Результаты

Между данными полевых наблюдений и глобальными наборами данных выявлена довольно высокая степень корреляции для всех наборов данных, коэффициент детерминации R^2 изменяется от 0,72 для набора данных Geocarbon до 0,89 для набора GFW, *табл. 2.*

Таблица 2. Надземная фитомасса по различным источникам данных и объём древесного полога

№ ППП	Надземная фитомасса, т							Объём древесного полога, м^3
	Полевые наблюдения	Geocarbon	Δ, %	GlobBiomass	Δ, %	GFW	Δ, %	БПЛА
1	126,55	65	48,6	78	38,4	60	52,6	111,4
2	63,05	59	6,4	21	66,7	43,2	31,5	52,5
3	150,90	70	53,6	135	10,5	72	52,3	103,8
4	232,51	79,7	65,7	234	–0,6	124,5	46,5	229,9
5	215,15	–	–	168	21,9	124,8	42,0	195,9
6	75,37	58	23,0	11	85,4	24,5	67,5	63,8
7	117,29	–	–	45,6	61,1	49,56	57,7	29,3
8	122,57	66	46,2	86	29,8	93	24,1	18,6
9	38,96	–	–	29	25,6	14,6	62,5	60,7
10	42,38	62	–46,3	46,6	–10,0	30,8	27,3	6,7
11	43,13	55	–27,5	53,5	–24,0	32,8	24,0	–
12	26,64	60	–125,2	25	6,2	32,5	–22,0	36,1
13	33,41	55	–64,6	12,5	62,6	14,8	55,7	14,3
14	51,55	56	–8,6	37	28,2	29,2	43,4	–
15	44,74	43	3,9	21	53,1	22	50,8	40,3
R^2		0,72		0,85		0,89		0,86
MAPE, %		42		32		44		–
MaxAPE,%		125		84		67		–

Наименьшая средняя абсолютная ошибка MAPE (*англ.* Mean Absolute Percentage Error) для всех участков была получена для данных GlobBiomass — 32 %. Для наборов данных GEOCARBON и GFW погрешность (MAPE) равна 43 и 44 % соответственно. Наибольшая максимальная абсолютная ошибка MaxAPE (*англ.* Maximum Absolute Percentage Error) была получена для ППП № 12 и составила 125 % для набора данных GEOCARBON и 84 % по данным GlobBiomass. Наименьшая максимальная абсолютная ошибка наблюдалась по данным GFW и достигала 67 % для ППП № 5.

Для набора данных GlobBiomass были получены минимальные расхождения. Этот набор заметно занижает объём фитомассы на 12 пробных площадях; аналогичная ситуация наблюдается и в других глобальных наборах.

Занижение оценок фитомассы глобальными наборами данных для рассматриваемой территории связано с несколькими ключевыми факторами. Во-первых, глобальные продукты используют упрощённые алгоритмы с низким разрешением (от 30 до 1200 м), которые не учитывают местные особенности: специфику хвойных пород, возрастную структуру лесов и мелкомасштабную неоднородность. Во-вторых, глобальные наборы данных часто недооценивают фитомассу подлеска.

Объём древесного полога на большинстве пробных площадей соответствует надземной фитомассе. Значительно заниженный объём отмечается на некоторых деградированных лесных участках и рединах. Общая площадь ППП составляет лишь 5,7 % (6,3 га) от территории более 110 га, на которой рассчитывался объём древесного полога древостоя, что свидетельствует о возможности интерполяции полевых данных на значительно большую площадь.

Заключение

Благодаря расчёту объёма древесного полога можно с высокой степенью достоверности оценить надземную фитомассу, но для этого необходимо иметь более высокую детализацию модели местности. В свою очередь для нахождения наилучшей связи между объёмом древесного полога и надземной фитомассой необходимо учитывать породу и состояние деревьев, а также локальные особенности лесных экосистем.

Проведённое исследование показало, что данные дистанционного зондирования, полученные с помощью БПЛА, обеспечивают высокую точность оценок ($R^2 = 0{,}89$) при наличии корректной калибровки с наземными измерениями. Однако глобальные наборы данных, такие как GEOCARBON, GlobBiomass и GFW, демонстрируют значительные расхождения с полевыми наблюдениями (MAPE от 32 до 44 %), что связано с их низким пространственным разрешением и упрощёнными алгоритмами, не учитывающими местную специфику.

Наилучшие результаты среди глобальных продуктов показал набор данных GlobBiomass ($R^2 = 0{,}85$), что подчёркивает важность интеграции радарных и оптических данных для повышения точности оценок. Тем не менее даже эти данные требуют дополнительной верификации и адаптации к региональным условиям. Применение методов машинного обучения и увеличение детализации спутниковых снимков могут стать ключевыми направлениями для дальнейших исследований, направленных на минимизацию погрешностей и улучшение мониторинга углеродного баланса лесных экосистем.

Таким образом, комбинация наземных измерений, данных БПЛА и усовершенствованных алгоритмов обработки спутниковой информации позволит создать более надёжные модели оценки надземной фитомассы, что особенно актуально для управления лесными ресурсами и изучения глобальных изменений климата.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением географического охвата наблюдений, а также интеграцией мультиспектральных и лидарных технологий для повышения точности оценок фитомассы в сложных по структуре лесных насаждениях.

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы № FWRG-2025-0002 «Развитие системы мониторинга и комплексного анализа пулов и потоков парниковых газов болотных и лесных экосистем Западной Сибири».

Литература

1. *Анучин Н. П.* Лесная таксация: учеб. для вузов. 5-е изд. М.: Лесная промышленность, 1982. 352 с.
2. *Гопп Н. В.*, *Смирнов В. В.* Использование вегетационного индекса (NDVI) для оценки запасов надземной фитомассы тундровых сообществ растений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2009. Т. 4. № 1. С. 187–191.

3. *Данюлис Е. П.*, *Жирин В. М.*, *Сухих В. И.*, *Эльман Р. И.* Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве: учеб. пособие. М.: Агропромиздат, 1989. 223 с.
4. *Замолодчиков Д. Г.*, *Уткин А. И.*, *Коровин Г. Н.* Конверсионные коэффициенты фитомасса/запас в связи с дендрометрическими показателями и составом древостоев // Лесоведение. 2005. № 6. С. 73–81.
5. *Макарова М. А.*, *Владимирова Н. А.* Обзор ресурсов открытых пространственных данных о растительном покрове Земли в сети интернет // Ботанический журн. 2020. № 105(4). С. 387–407. DOI: 10.31857/S0006813620040067.
6. ОСТ 56-69-83. Пробные площади лесоустроительные. Метод закладки. М.: Гослесхоз СССР, 1984. 59 с.
7. Справочное пособие по таксации лесов Сибири / под ред. Э. Н. Фалалеева. Т. 1. Красноярск, 1974. 216 с.
8. *Усольцев В. А.*, *Часовских В. П.*, *Норицина Ю. В.*, *Норицин Д. В.* Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии // Сибирский лесной журн. 2016. № 4. С. 68–76. DOI: 10.15372/SJFS20160407.
9. *Усольцев В. А.*, *Цепордей И. С.*, *Норицин Д. В.* Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород Урала // Леса России и хоз-во в них. 2022. № 1. С. 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001.
10. *Чмыр А. Ф.*, *Маркова И. А.*, *Сенов С. Н.* Методология лесоводственных исследований: учеб. пособие. СПб.: ЛТА, 2000. 96 с.
11. *Швиденко А. З.*, *Щепащенко Д. Г.*, *Нильссон С.*, *Булуй Ю. И.* Система моделей роста и динамики продуктивности лесов России (таблицы и модели биопродуктивности) // Лесное хоз-во. 2004. № 2. С. 40–44.
12. *Щепащенко Д. Г.*, *Швиденко А. З.*, *Пергер К. и др.* Изучение фитомассы лесов: текущее состояние и перспективы // Сибирский лесной журн. 2017. № 4. С. 3–11. DOI: 10.15372/SJFS20170401.
13. *Anuar N. I.*, *Khalid N.*, *Tahar K. N.*, *Othman A. N.* Analyze the relationship between aboveground biomass and NDVI values derived from UAV multispectral imagery // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2023. V. 1240. No. 1. Article 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/1240/1/012015.
14. *Araza A.*, *de Bruin S.*, *Herold M. et al.* A comprehensive framework for assessing the accuracy and uncertainty of global above-ground biomass maps // Remote Sensing of Environment. 2022. V. 272. Article 112917. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112917.
15. *Avitabile V.*, *Herold M.*, *Heuvelink G.* An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets // Global Change Biology. 2016. V. 22. P. 1406–1420. DOI: 10.1111/gcb.13139.
16. *Hese S.*, *Lucht W.*, *Schmullius C. et al.* Global biomass mapping for an improved understanding of the CO_2 balance — the Earth observation mission carbon-3D // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 94. P. 94–104. DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.006.
17. *Houghton R. A.*, *Butman D.*, *Bunn A. G. et al.* Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories // Environmental Research Letters. 2007. V. 2. Article 045032. DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045032.
18. *Kumar P.*, *Krishna A. P.*, *Rasmussen T. M.*, *Pal M. K.* Rapid evaluation and validation method of above ground forest biomass estimation using optical remote sensing in Tundi reserved forest area, India // ISPRS Intern. J. Geo-Information. 2021. V. 10. Article 29. DOI: 10.3390/ijgi10010029.
19. *Li Y.*, *Li C.*, *Cheng Q. et al.* Estimating maize crop height and aboveground biomass using multi-source unmanned aerial vehicle remote sensing and Optuna-optimized ensemble learning algorithms // Remote Sensing. 2024. V. 16. Article 3176. DOI: 10.3390/rs16173176.
20. *Santoro M.* GlobBiomass — global datasets of forest biomass. PANGAEA, Data Publisher for Earth and Environmental Science, 2018. DOI: 10.1594/PANGAEA.894711.
21. *Silva C. A.*, *Hudak A. T.*, *Vierling L. A. et al.* Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data // Canadian J. Remote Sensing. 2016. V. 42. No. 5. P. 554–573. DOI: 10.1080/07038992.2016.1196582.
22. *Zarin D. J.*, *Harris N. L.*, *Baccini A. et al.* Can carbon emissions from tropical deforestation drop by 50% in 5 years? // Global Change Biology. 2016. V. 22. P. 1336–1347. DOI: 10.1111/gcb.13153.

Assessment and verification of aboveground phytomass using UAV and global datasets: A case study of the southern taiga subzone in Western Siberia

A. O. Eliseev [1], E. M. Bisirova [1,2], I. G. Grachev [1], I. A. Kerchev [1]

[1] *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS*
Tomsk 634055, Russia
E-mail: kuzoller@gmail.com
[2] *Tomsk Branch of All-Russian Plant Quarantine Center, Tomsk 634021, Russia*
E-mail: bissirovaem@mail.ru

The study presents a comprehensive assessment of aboveground phytomass in forest stands of the southern taiga subzone in Western Siberia (Tomsk Region) by integrating global datasets (GlobBiomass, GEOCARBON, Global Forest Watch (GFW)), field measurements, and aerial photography from a unmanned aerial vehicle (UAV) DJI Phantom 4 Multispectral. An algorithm for extrapolating phytomass using a digital terrain model (DTM) was developed, demonstrating high accuracy (coefficient of determination 0.89) when compared with ground-based data. The study revealed systematic biases in global datasets. The GlobBiomass dataset exhibited the lowest error, with a mean absolute percentage error (MAPE) of 32 %. For the other datasets, errors were significantly higher: GEOCARBON had a MAPE of 43 %, and GFW showed a MAPE of 44 %. These inaccuracies are primarily attributed to coarse spatial resolution and insufficient algorithm adaptation to boreal forests. A key outcome is a high-resolution DTM-based methodology for estimating stand volume, enabling detailed phytomass assessment across a 109-hectare area. The study demonstrates that combining UAV data with local allometric models significantly improves accuracy compared to global maps. The research underscores the importance of validating satellite products and highlights the potential of UAVs for monitoring carbon pools in forest ecosystems.

Keywords: DTM, UAV, GlobBiomass, GEOCARBON, GFW, canopy volume, aboveground phytomass

Accepted: 27.08.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-222-233

References

1. Anuchin N. P., *Lesnaya taksatsiya: uchebnik dlya vuzov* (Forest Inventory: Textbook for universities), 5th ed., Moscow: Lesnaya promyshlennost', 1982, 352 p. (in Russian).
2. Gopp N. V., Smirnov V. V., Using the vegetation index (NDVI) to assess aboveground phytomass reserves in tundra plant communities, *Interexpo Geo-Sibir*, 2009, V. 4, No. 1, pp. 187–191 (in Russian).
3. Danyulis E. P., Zhirin V. M., Sukhikh V. I., Elman R. I., *Distantsionnoe zondirovanie v lesnom khozyaistve: uchebnoe posobie* (Remote Sensing in Forestry: Study guide), Moscow: Agropromizdat, 1989, 223 p. (in Russian).
4. Zamolodchikov D. G., Utkin A. I., Korovin G. N., Conversion coefficients of phytomass/growing stock in relation to dendrometric parameters and stand composition, *Lesovedenie*, 2005, No. 6, pp. 73–81 (in Russian).
5. Makarova M. A., Vladimirova N. A., Review of open spatial data resources on Earth's vegetation cover on the Internet, *Botanicheskii zhurnal*, 2020, No. 105(4), pp. 387–407 (in Russian), DOI: 10.31857/S0006813620040067.
6. *OST 56-69-83. Probnye ploshchadi lesoustroitel'nye. Metod zakladki* (Forest Management Sample Plots. Establishment Method), Moscow: Gosleskhoz SSSR, 1984, 59 p. (in Russian).
7. *Spravochnoe posobie po taksatsii lesov Sibiri* (Reference Manual on Forest Inventory in Siberia), E. N. Falaleev (ed.), V. 1, Krasnoyarsk, 1974, 216 p. (in Russian).
8. Usoltsev V. A., Chasovskikh V. P., Noritsina Yu. V., Noritsin D. V., Allometric models of tree phytomass for laser scanning and ground-based assessment of carbon pool in Eurasian forests, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2016, No. 4, pp. 68–76 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20160407.
9. Usoltsev V. A., Tsepordei I. S., Noritsin D. V., Allometric models of biomass for forest-forming tree species in the Ural, *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh*, 2022, No. 1, pp. 4–14 (in Russian), DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001.

10. Chmyr A. F., Markova I. A., Senov S. N., *Metodologiya lesovodstvennykh issledovanii: uchebnoe posobie* (Methodology of Forestry Research: Study guide), Saint Petersburg: LTA, 2000, 96 p. (in Russian).
11. Shvidenko A. Z., Shchepashchenko D. G., Nilsson S., Bului Yu. I., System of growth models and productivity dynamics of Russian forests (bioproductivity tables and models), *Lesnoe khozyaystvo*, 2004, No. 2, pp. 40–44 (in Russian).
12. Shchepashchenko D. G., Shvidenko A. Z., Perger K. et al., Study of forest phytomass: current state and prospects, *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2017, No. 4, pp. 3–11 (in Russian), DOI: 10.15372/SJFS20170401.
13. Anuar N. I., Khalid N., Tahar K. N., Othman A. N., Analyze the relationship between aboveground biomass and NDVI values derived from UAV multispectral imagery, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2023, V. 1240, No. 1, Article 012015, DOI: 10.1088/1755-1315/1240/1/012015.
14. Araza A., de Bruin S., Herold M. et al., A comprehensive framework for assessing the accuracy and uncertainty of global above-ground biomass maps, *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 272, Article 112917, DOI: 10.1016/j.rse.2022.112917.
15. Avitabile V., Herold M., Heuvelink G., An integrated pan-tropical biomass map using multiple reference datasets, *Global Change Biology*, 2016, No. 22, pp. 1406–1420, DOI: 10.1111/gcb.13139.
16. Hese S., Lucht W., Schmullius C. et al., Global biomass mapping for an improved understanding of the CO_2 balance — the Earth observation mission carbon-3D, *Remote Sensing of Environment*, 2005, V. 94, pp. 94–104, DOI: 10.1016/j.rse.2004.09.006.
17. Houghton R. A., Butman D., Bunn A. G. et al., Mapping Russian forest biomass with data from satellites and forest inventories, *Environmental Research Letters*, 2007, V. 2, Article 045032, DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045032.
18. Kumar P., Krishna A. P., Rasmussen T. M., Pal M. K., Rapid evaluation and validation method of above ground forest biomass estimation using optical remote sensing in Tundi reserved forest area, India, *ISPRS Intern. J. Geo-Information*, 2021, V. 10, Article 29, DOI: 10.3390/ijgi10010029.
19. Li Y., Li C., Cheng Q. et al., Estimating maize crop height and aboveground biomass using multi-source unmanned aerial vehicle remote sensing and Optuna-optimized ensemble learning algorithms, *Remote Sensing*, 2024, V. 16, Article 3176, DOI: 10.3390/rs16173176.
20. Santoro M., *GlobBiomass — global datasets of forest biomass*, PANGAEA, Data Publisher for Earth and Environmental Science, 2018, DOI: 10.1594/PANGAEA.894711.
21. Silva C. A., Hudak A. T., Vierling L. A. et al., Imputation of individual longleaf pine (*Pinus palustris* Mill.) tree attributes from field and LiDAR data, *Canadian J. Remote Sensing*, 2016, V. 42, No. 5, pp. 554–573, DOI: 10.1080/07038992.2016.1196582.
22. Zarin D. J., Harris N. L., Baccini A. et al., Can carbon emissions from tropical deforestation drop by 50 % in 5 years?, *Global Change Biology*, 2016, V. 22, pp. 1336–1347, DOI: 10.1111/gcb.13153.