

ESTIMATION OF TREE COVER HEIGHT ON OLIGOTROPHIC BOG BASED ON UAV LIDAR SURVEYING

Ilyasov D.V.^{1*}, Kaverin A.A.¹, Zhernov S.N.¹, Glagolev M.V.^{1,2,3}, Niyazova A.V.¹, Kupriianova I.V.¹, Filippov I.V.¹, Terentieva I.E.⁴, Sabrekov A.F.¹, Lapshina E.D.¹

¹⁾ Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

²⁾ Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва

³⁾ Институт лесоведения РАН, г. Успенское (Московская область)

⁴⁾ University of Calgary, Calgary

d_ilyasov@ugrasu.ru

Citation: Ilyasov D.V., Kaverin A.A., Zhernov S.N., Glagolev M.V., Niyazova A.V., Kupriianova I.V., Filippov I.V., Terentieva I.E., Sabrekov A.F., Lapshina E.D. 2023. Estimation of tree cover height on oligotrophic bog based on UAV lidar surveying. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. 14(4): 237-248

DOI: 10.18822/edgcc625744

При помощи лидарной БПЛА-съемки мы провели оценку высоты отдельных деревьев в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе, а также определили среднюю высоту деревьев на 12 участках четырех типологически различных биотопов (ГМК, Рям, РмМК, Открытое болото) в болотном массиве "Мухрино" (средняя тайга Западной Сибири). Для проверки полученных данных мы осуществили наземную верификацию с помощью лесотаксационных работ. Коэффициент детерминации между наземной и дистанционной оценкой высоты отдельных деревьев составил 0.87, а для средней высоты деревьев оказалась в диапазоне от 0.55 до 0.87. В рамках исследования была представлена методика получения и обработки лидарных данных, а также даны методические рекомендации по повышению точности дистанционной оценки высоты древостоя с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: дроны, запасы древесины, пул углерода болот, болотные сосняки, *Pinus sylvestris*, *Pinus sibirica*.

Using UAV lidar survey, we assessed the height of individual trees in the pine-shrub-sphagnum community and determined the average tree height across 12 sites of four different biotopes (Ridge-hollow bog complexes, Ryam, Ridge-hummock complexes, Open bog) in the Mukhrino oligotrophic bog (middle taiga of Western Siberia). Ground verification of the data was conducted through forest taxation. The coefficient of determination between ground-based and remote estimates of individual tree heights was 0.87, while the average tree height ranged from 0.55 to 0.87. We presented a methodology for acquiring and processing lidar data, along with methodological recommendations for enhancing the accuracy of remote tree stand height assessment using UAVs.

Key words: UAVs, tree biomass, bog carbon pools, wetland pine stand, *Pinus sylvestris*, *Pinus sibirica*.

Используемые сокращения

БПЛА – беспилотные летательные аппараты;

ВИП ГЗ – важнейший инновационный проект государственного значения;

ГМК – грядово-мочажинные болотные комплексы;

ДО – дистанционная оценка (высот деревьев);

ПО – прямая оценка (высот деревьев);

РмМК – рямово-мелкомочажинные болотные комплексы;

стд – стандартное отклонение;

Q – квартиль

ВВЕДЕНИЕ

Оценка запасов углерода болотных экосистем необходима для полноценного понимания их роли в цикле углерода суши, особенно в условиях климатических изменений, что было отмечено на национальном [Распоряжение...] и международном [IPCC, 2023] уровнях. В России для достижения этой цели реализуется ВИП ГЗ «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ». Важным компонентом пула углерода болот, помимо торфяной залежи, является растительный покров. При этом около 38% болот таежной зоны России характеризуются наличием древесного яруса растительности [Vompersky et al., 2011]. Наиболее распространенными типами таких болот являются сосново-кустарничково-сфагновые сообщества («рямы» и «рослые рямы») и, в меньшей степени – травяно-моховые сообщества с редкой сосной («открытые болота»). Запасы древесной фитомассы (как фотосинтезирующей, так и нефотосинтезирующей) играют здесь важную роль: они достигают 3.4–17.3 кг/м² или 70–90% от общего запаса с учетом кустарничков, трав и мхов, что подчеркивает средообразующие функции древесного яруса в таких экосистемах [Efremov et al., 2005; Kosykh, Makhatkov, 2008; Koronatova, Kosykh, 2014].

Общепринятым способом оценки запасов древесной фитомассы является лесная таксация [Анучин, 1982]. Используемые здесь подходы применимы и для болотных экосистем. Однако особенности морфологии древесного покрова болот (повсеместное распространение угнетенной формы деревьев, трудности в формальной оценке высоты деревьев из-за разного расположения корневой шейки относительно неоднородной поверхности мохового покрова), его высокая пространственная гетерогенность и логистическая труднодоступность участков проведения полевых исследований обуславливают необходимость поиска и отработки методов дистанционной оценки запасов древесной фитомассы. В первом приближении такая задача может быть решена на основе комплексного подхода [Hudak et al., 2012; Fedorov et al., 2023; Zhao et al., 2018]: i) высокдетальной дистанционной оценке высоты деревьев при помощи лидарной БПЛА-съемки, ii) наземной верификации дистанционно измеренной высоты деревьев путем лесотаксации на отдельных участках, iii) оценке запасов древесной фитомассы путем идентификации параметров аллометрических моделей¹.

Цель работы состояла в оценке высоты древесного покрова нескольких участков олиготрофного болота путем лидарной БПЛА-съемки и верификации полученных данных при помощи лесотаксации.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект и организация полевых работ

Исследование проводилось на олиготрофном болотном массиве «Мухрино» (60°53'20" с.ш., 68°42'10" в.д.) в 30 км к юго-западу от г. Ханты-Мансийск в левобережье рек Обь и Иртыш [Ivanov, Novikov, 1976; Kupriianova et al., 2022]. Территория исследования находится в среднетаежной биогеографической зоне, а болотный массив является типичным для центральной части Западной Сибири. Участками проведения полевых работ были выбраны грядово-мочажинные и рямово-мелкомочажинные болотные комплексы (ГМК и РмМК соответственно; с грядами, покрытыми *Pinus sylvestris*), рямы (сосново-кустарничково-сфагновые биотопы) и открытые болота (кустарничковое сфагновое болото с редкими низкорослыми соснами *Pinus sylvestris*).

В рамках работ было выполнено два полевых эксперимента:

¹ Здесь под аллометрическими моделями, мы понимаем регрессионные модели связи запасов фитомассы в древесном растительном покрове с высотой, диаметром ствола и другими морфометрическими характеристиками деревьев. Подробнее с различными аллометрическими моделями можно познакомиться в Уткин А.И. и др., 1996; Уткин А.И. и др., 1997; Усольцев В.А. и др., 2016.

1) лидарная съемка и наземная верификация **высот отдельных деревьев** на участке рьяма (N60.8993216, E68.6964339; тип биотопа – рям; площадь участка 0.01 га; пример результатов лидарной съемки показан в приложении 1),

2) лидарная съемка и наземная верификация **средних высот деревьев** на 12 участках облесенных биотопов различных типов.

Более подробное описание участков олиготрофного болота, на которых была проведена оценка средней высоты древесного покрова, представлено в табл. 1 и в [Кургианова, 2022].

Полевой эксперимент 1, посвященный оценке высот отдельных деревьев – это дистанционный аналог той части лесотаксационных мероприятий, которые направлены на оценку высоты древостоя (согласно общепринятой методике, должно быть измерено каждое дерево на репрезентативном участке определенной площади). В процессе этого эксперимента мы хотели понять, насколько велика будет погрешность в дистанционной оценке высоты отдельно стоящих деревьев. Полевой эксперимент 2 был заложен с двумя целями: 1) верификация оценки средней высоты древесного покрова с наземными данными; очевидно, что дистанционная оценка может некоторым образом исказить гистограмму частот высоты деревьев, что может привести к ошибке в оценке среднего 2) оценка репрезентативности используемого метода на нескольких пространственно-различных типах болотных биотопов.

Таблица 1. Характеристики участков олиготрофного болота, на которых была оценена высота отдельных деревьев и средняя высота древесного покрова при помощи лидарной съемки и лесотаксации.

№ участка	Координаты центра участка		Тип биотопа	Площадь участка, га
	широта	долгота		
Оценка высот отдельных деревьев (полевой эксперимент 1)				
1.1	60.8993216	68.6964339	Рям	0.01
Оценка средней высот деревьев (полевой эксперимент 2)				
2.1	60.8867325	68.6761150	ГМК	0.50
2.2	60.8969470	68.6684900	ГМК	0.16
2.3	60.8867320	68.6866715	ГМК	0.50
2.4	60.9003960	68.6877255	Открытое болото	0.25
2.5	60.8969520	68.6733890	Открытое болото	0.16
2.6	60.8950620	68.6847485	ГМК	0.10
2.7	60.8866965	68.6667450	Рям	0.10
2.8	60.8969245	68.6887000	Рям	0.16
2.9	60.8966105	68.6864890	Рям	0.25
2.10	60.8951505	68.6770410	РмМК	0.16
2.11	60.8871165	68.6925775	РмМК	0.16
2.12	60.8867325	68.6761150	РмМК	0.50

Примечание: ГМК – грядово-мочажинный комплекс олиготрофного болота, Открытое болото – травяно-моховое сообщество с редкой сосной, Рям – сосново-кустарничково-сфагновое сообщество, РмМК – рямово-мелкомочажинный комплекс олиготрофного болота

Верификация высот отдельных деревьев

На размеченной при помощи заградительной ленты и 12 цифровых меток (для облегчения ориентировки на участке) пробной площади размером 10×10 метров (координаты центра: N60.899306 E68.696499) осуществлена лидарная съемка при помощи БПЛА DJI Matrice 300 и лидара Zenmuse L1 (SZ DJI Technology Co., Ltd., China). Высота лидарной съемки в надире (приемопередатчик лидара был расположен под углом 90° к поверхности съемки, то есть вертикально вниз) составила 35 метров над уровнем поверхности болотного массива, плотность облака точек – 300 точек/м². Затем на этом же участке сантиметровой рулеткой измерены высоты всех деревьев от средней (глазомерно) поверхности мохового покрова в точке произрастания до «макушки» и составлен план с пространственной привязкой к ближайшей цифровой метке.

Первичная обработка данных лазерного сканирования (выравнивание и сглаживание облака точек, выгрузка данных в формате .las) была выполнена при помощи программы DJI

Terra. При помощи модулей обработки данных лазерного сканирования MATLAB (The MathWorks, USA) была выполнена постобработка данных (Приложение 2):

- импорт файлов в формате .las (модуль «lasFileReader»),
- чтение облака точек («readPointCloud»),
- сегментация облака точек на классы «растительный покров» и «земная поверхность» («segmentGroundSMRF»),
- нормализация облака точек с учетом наклона земной поверхности («scatteredInterpolant»),
- поиск вершин отдельных деревьев («helperDetectTreeTops»)
- расчет высоты древесного покрова (как разницы между высотами вершин деревьев и земной поверхности).

В ходе обработки были использованы следующие необходимые параметры: пространственное разрешение модели высоты растительного покрова – 0.3 м, окно сглаживания по Гауссу – 5×5 ячеек, минимальная высота древесного покрова – 1 м. В завершении был осуществлен линейный регрессионный анализ ($p = 0.05$, $N = 27$) связи между высотами отдельных деревьев, полученных в результате наземной и лидарной оценок.

Средняя высота древесного покрова

В таблице 1 показаны координаты центра, площадь, и тип болотных биотопов участков, на которых была осуществлена лидарная съемка в надире с высоты 110 метров, плотность облака точек при этом составила 30 точек/м². Обработка данных лидарной съемки была выполнена аналогичным образом, как и на первом этапе², также осуществлен линейный регрессионный анализ связи средних (в границах участка) высот деревьев, полученных в результате наземной и лидарной оценок ($p = 0.05$, $N = 12$). Здесь же была проведена лесотаксация³ (сантиметровой рулеткой были измерены и усреднены высоты всех деревьев), результатом которой стали данные о средней высоте древесного покрова на участке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Высоты отдельных деревьев в ряме

Результаты прямых измерений высот отдельных деревьев представлены в приложении 3. Всего на участке было обнаружено 63 дерева, из которых 55 являлись представителями *Pinus sylvestris*, 4 – *Pinus sibirica* и 4 – усохшими, видовую принадлежность которых определить не удалось. Средняя (\pm std) и медианная (1Q, 3Q) высоты деревьев над поверхностью мохового покрова составили 201 ± 55 и 204 (171; 230) см соответственно; минимальная и максимальная – 63 и 300 см.

В результате сегментации облака точек лазерного сканирования на исследуемом участке удалось автоматически идентифицировать 27 крон «деревьев». Здесь использованы кавычки, так как некоторые группы деревьев, растущие поблизости друг от друга, в процессе сегментации образовали кластеры и разделить их не удалось (рис. 1Б, отдельные кластеры показаны цветом). Таким образом, алгоритм оценки высот отдельных деревьев («helperDetectTreeTops») фактически позволил определить их вершины только тогда, когда облака точек отдельных крон не перекрывались; в данном случае была получена высота наиболее высокого дерева из кластера.

² Более подробное описание процесса обработки данных лазерного сканирования для оценки высоты, проективного покрытия и сегментации крон отдельных деревьев см. по URL: <https://www.mathworks.com/help/lidar/ug/extraction-of-forest-metrics-and-individual-tree-attributes.html> (Extract Forest Metrics and Individual Tree Attributes from Aerial Lidar Data).

³ Более подробное описание методических рекомендаций по проведению таксации леса на пробных площадях ВИП ГЗ опубликовано на сайте ЦЭПЛ РАН, см. по URL: <https://ritm-c.ru/results/methods/>

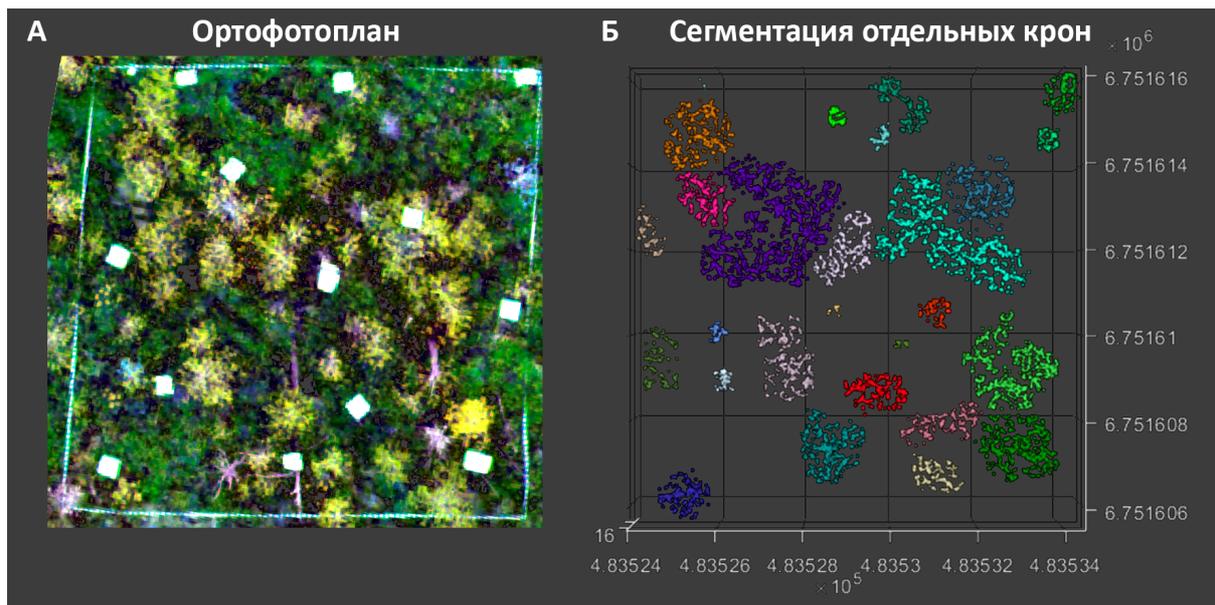


Рисунок 1. Ортофотоплан участка измерения высот отдельных деревьев (А) в искусственных цветах (светло-зеленым показаны кроны деревьев; белые сегменты – метки, изготовленные из линолеума с цифровой нумерацией, которые облегчали подсчет деревьев и идентификацию их местоположения) и сегментация облака точек лидарной съемки для этой же территории (Б; по осям абсцисс и ординат показаны долгота и широта местности соответственно в системе WGS84/UNM z42).

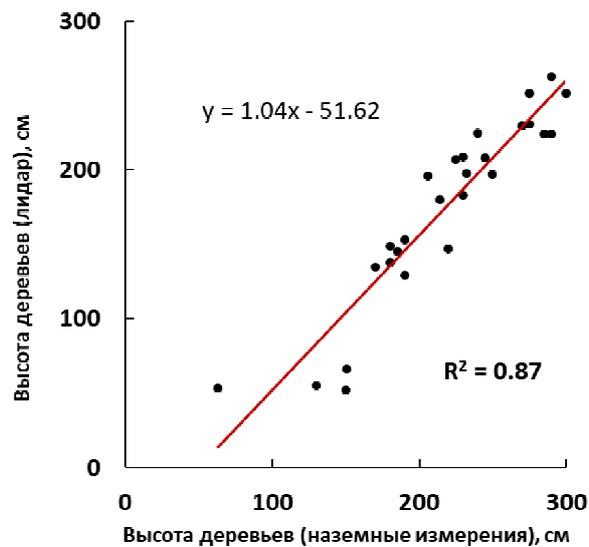


Рисунок 2. Линейная регрессия между высотой отдельных деревьев, полученной при помощи прямой (наземные измерения) и дистанционной (на основе сегментации облака точек лидарной съемки) оценки (красная сплошная линия и черные кружки).

При помощи линейного регрессионного анализа мы сравнили высоты деревьев, полученные на основе прямой и дистанционной оценки. Для этого вручную сопоставили местоположение отдельных деревьев на участке и в пространстве сегментированного облака точек (при наличии в кластере нескольких деревьев, сравнение осуществляли с высотой наиболее высокого из них). Коэффициент детерминации (R^2) составил 0.87 (рис. 2). При этом разница между высотами деревьев, полученными при помощи прямой и дистанционной оценки, оказалась положительна во всех случаях, что говорит о наличии систематической ошибки, равной 43 ± 23 см. Наибольшее несоответствие между прямой и дистанционной оценкой высот характерно для низкорослых деревьев высотой до 1.5–2 м.

Средние высоты деревьев на участках различных биотопов

Результаты сравнения средних (по участку) высот деревьев, полученных при помощи прямой (ПО) и дистанционной (ДО) оценки представлены в таблице 2. Разность между средними высотами (ПО–ДО) носит несистематический характер и в основном варьирует в пределах от -0.1 до 0.3 м, лишь на участке 2.11 (РмМК) разность составила катастрофические -0.8 м. Наилучшим образом (минимальная разность между ДО и ПО) удалось оценить высоту древесного покрова на участке 2.5 (Открытое болото), 2.6 (ГМК), 2.8 (Рям) и 2.12 (РмМК). Мы провели тест Краскела-Уоллиса ($N = 12$, $p = 0.05$) для попарного сравнения различий в оценке разности ПО–ДО по типам биотопов (группирующая переменная – тип биотопов, независимая – ПО–ДО). Было установлено, что попарные различия отсутствуют между всеми группами биотопов ($p = 0.87$), что говорит о несистематичности полученной погрешности не только в рамках отдельных болотных типов, но и между ними. При проведении линейного регрессионного анализа связи средних высот деревьев, полученных прямо и дистанционно, коэффициент детерминации (R^2) с учетом данных на участке 2.11 составил 0.55 (Приложение 4).

Таблица 2. Средняя высота деревьев, полученная на отдельных участках при помощи прямой (лесотаксация) и дистанционной (на основе сегментации облаков точек лидарной съемки) оценки.

№ участка	Тип биотопа	Средняя высота деревьев, м		Разность между ПО и ДО, м	Количество деревьев (ПО)	Количество деревьев (ДО)
		Прямая оценка (ПО)	Дистанционная оценка (ДО)			
2.1	ГМК	2.5	2.6	-0.1	225	97
2.2	ГМК	2.1	1.8	0.3	181	48
2.3	ГМК	2.9	3.0	-0.1	445	118
2.4	Открытое болото	1.7	1.9	-0.2	47	16
2.5	Открытое болото	2.3	2.3	0.0	167	48
2.6	ГМК	2.3	2.3	0.0	276	74
2.7	Рям	2.5	2.4	0.1	611	106
2.8	Рям	2.3	2.2	0.0	846	129
2.9	Рям	2.8	2.9	-0.1	739	169
2.10	РмМК	2.6	2.5	0.1	451	187
2.11	РмМК	2.8	2.0	-0.8	320	69
2.12	РмМК	2.5	2.5	0.0	1754	108

ОБСУЖДЕНИЕ

Верификация высот отдельных деревьев

Некоторые деревья при измерении высот отдельных растений не были распознаны, так как оказались объединены в один сегмент облака точек с другими. Мы предполагаем, что такой эффект был получен из-за малого размера и близкого расположения крон угнетенной формы *Pinus sylvestris*, специфичной для олиготрофных болот. Частично эту проблему в процессе сегментации крон удалось нивелировать увеличением пространственного разрешения модели высоты растительного покрова с 0.5 (по умолчанию) до 0.1 м/пикс. Дальнейшее увеличение разрешения модели оказалось невозможно, так как требует большей плотности облака точек лидарной съемки. Возможным вариантом учета небольших близко растущих деревьев является итеративный алгоритм: после того, как найдена наиболее высоко расположенная точка в кластере крон, она может быть записана в выходной массив, после чего анализ стартует повторно, и осуществляется поиск второй по высоте точке в кластере крон и т.д.

Систематическая положительная ошибка, возникшая при анализе высоты отдельных деревьев, вероятно связана с тем, что модуль сегментации облака точек на классы «растительный покров» и «земная поверхность» («segmentGroundSMRF») не в полной мере приспособлен к высокой гетерогенности нанорельефа болот: перепады высот между кочками и межкочьями в ряме могут достигать 40–60 см на участке размером в 1–2 метра. Кроме того, достаточно густой растительный покров кустарничкового яруса также может затруднять выделение элементов земной поверхности из общего облака точек. Мы предполагаем, что некоторые корректировки режима лидарной съемки помогут в будущем улучшить результат, например: увеличение плотности облака точек; съемка с меньшей высоты; съемка под углом, отличным от надира; осуществление съемки в двух перпендикулярных относительно друг друга направлениях движения БПЛА («крест-накрест»).

Мы выполнили корректировку линейного регрессионного уравнения, внося поправку на систематическую ошибку (рис. 3). Разумеется, это не изменило величину коэффициента детерминации, однако позволило получить более адекватное уравнение связи между высотами деревьев, измеренными прямо и дистанционно.

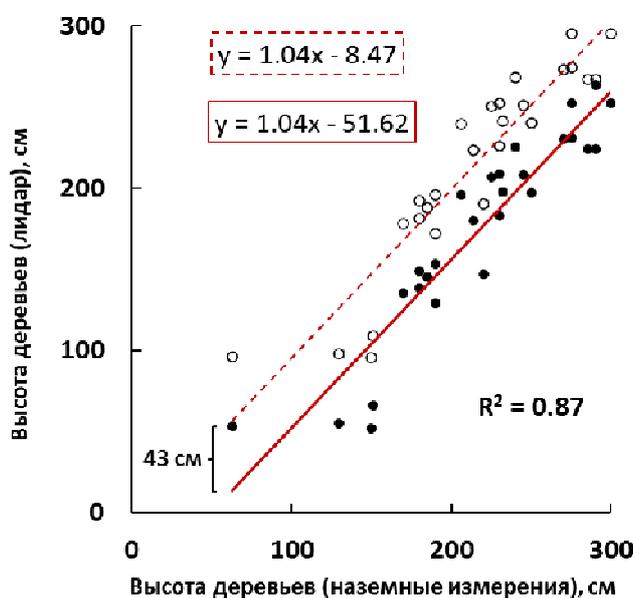


Рисунок 3. Линейная регрессия между высотой отдельных деревьев, полученной при помощи прямой (наземные измерения) и дистанционной (на основе сегментации облака точек лидарной съемки) оценки (красная сплошная линия и черные кружки); линейная регрессия между высотой отдельных деревьев, полученной при помощи прямой и дистанционной оценки с поправкой на систематическую ошибку (красная штриховая линия и белые кружки). Величина систематической ошибки показана фигурной скобкой.

Верификация средней высоты деревьев

Ошибка средней высоты древостоя (ПО–ДО) на различных участках была несистематической: предположительно, это обусловлено большими размерами исследуемых участков (до 70×70 метров), отличающимся нанорельефом рассмотренных биотопов, и, возможно, большей высотой лидарной съемки, в результате чего некоторые неоднородности поверхности оказались усреднены за счет погрешностей лазерного сканирования (в процессе съемки не были использованы RTK станции высокоточного позиционирования, обеспечивающие субсантиметровую погрешность привязки облака точек). Кроме того, измерение средних высот деревьев было выполнено группой лесотаксаторов, что, вероятно, могло уменьшить влияние систематических погрешностей за счет того, что различные экспериментаторы могли ошибаться как в большую, так и в меньшую сторону, в то время как измерение высоты отдельных деревьев в ряме было выполнено одним человеком (который с большей вероятностью ошибался только в большую или в меньшую сторону).

Для нас осталась необъясненной существенная ошибка измерения средней высоты деревьев на участке 2.11 (РмМК). Мы не обнаружили связи погрешности с площадью участков или количеством произрастающих на нем деревьев; ее не удалось исключить при различных параметрах обработки данных лазерного сканирования; ранжированные высоты деревьев (полученные как при ПО, так и при ДО) не содержали выбросов или иных некорректных значений. При исключении из линейного регрессионного анализа участка 2.11 коэффициент детерминации составил 0.87.

Величина полученных коэффициентов детерминации (рассмотрим $R^2 = 0.87$ как для отдельных деревьев, так и для их средних значений) сопоставима или несколько меньше, чем в аналогичных исследованиях [Dalla Corte et al., 2020; Panagiotidis et al., 2017; Ganz et al., 2019]. Более тесная связь измеренной при помощи ПО и ДО высоты деревьев была получена для лесных экосистем, где деревья значительно выше, а нанорельеф более однородный, в результате чего относительные погрешности меньше.

Мы предполагаем, что увеличение числа отдельных деревьев и площади участков, использованных для верификации данных лидарной съемки, а также корректировка параметров съемки позволят в будущем улучшить финальный результат. В частности, дальнейшее улучшение точности дистанционной оценки высоты древостоя может быть достигнуто путем корректировки режима лидарной съемки (за указанные здесь предложения мы выражаем глубокую благодарность рецензентам): увеличения плотности облака точек (до 300–900 точек/м²); использования повторяющего режима сканирования с распознаванием трех возвратов лазерного луча; съемки с меньшей высоты (не более 80 м); съемки под углом, отличным от надира (70°); увеличения области съемки не менее чем на 30% от площади исследуемого участка (для того, чтобы избежать потери данных в местах поворота БПЛА); осуществления съемки в двух перпендикулярных относительно друг друга направлениях движения БПЛА; использования станций высокоточного позиционирования RTK (GNSS); большего пространственного разрешения модели высот растительного покрова; больших по размеру участков наземной верификации.

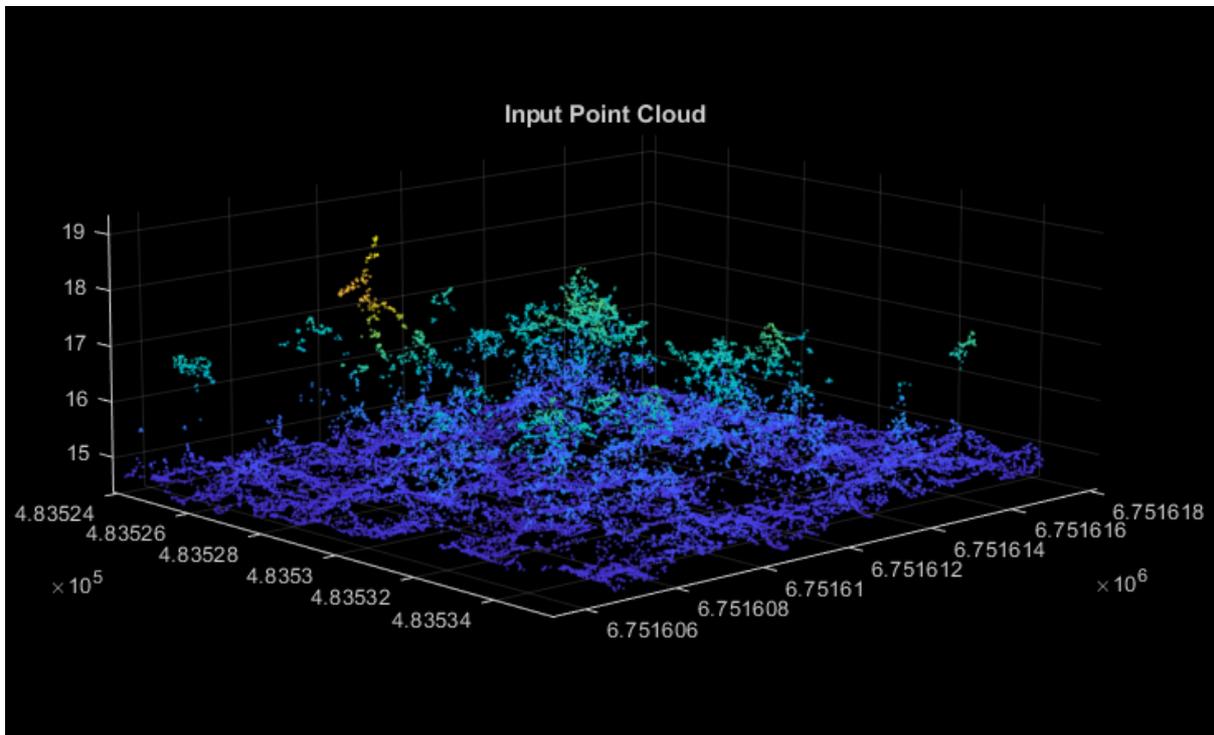
ВЫВОДЫ

Полученные коэффициенты детерминации связи высот отдельных деревьев ($R^2 = 0.87$) и средних высот деревьев ($R^2 = 0.55–0.87$) на типологически различных участках олиготрофного болота достаточны для дистанционной оценки высоты древостоя. При дистанционном определении высот отдельных деревьев на участке ряма была получена систематическая ошибка, которая приводила к недооценке высот. При дистанционном определении средних высот деревьев систематических ошибок обнаружено не было, однако на одном из 12 участков разница в сравнении со высотой, полученной при прямом измерении, составила -0.8 м. Кроме того, при дистанционной оценке высот (как отдельных деревьев, так и в среднем на участке) затруднена автоматическая кластеризация отдельных крон, и количество идентифицируемых деревьев существенно меньше, чем при наземной оценке; однако не оказывает существенного влияния на оценку средней высоты древостоя на участке.

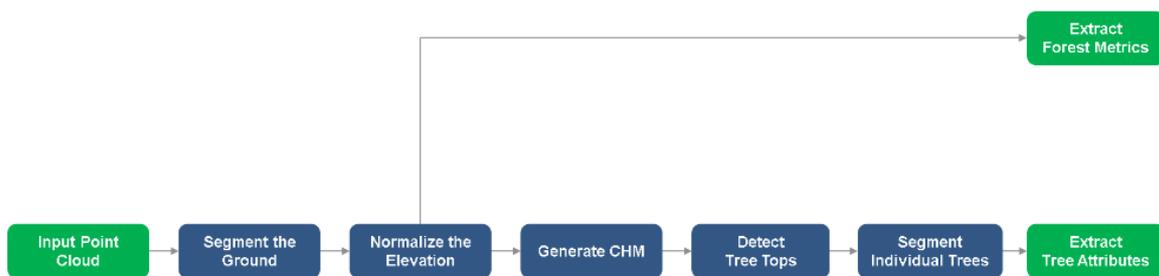
БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2022-169) на организацию новой молодежной лаборатории «Лаборатория изучения пространственно-временной изменчивости углеродного баланса лесных и болотных экосистем средней тайги Западной Сибири» в Югорском государственном университете в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты». Мы благодарны всем рецензентам за их труд, который позволил не только существенно улучшить данную статью, но и сформировать методический задел на получение лучшего результата в будущем.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1: Облако точек, полученное в результате импорта лидарной съемки, выполненной для оценки высоты отдельных деревьев на участке ряма (синий цвет соответствует поверхности мохового покрова, голубой и оранжевый – кронам деревьев различной высоты)



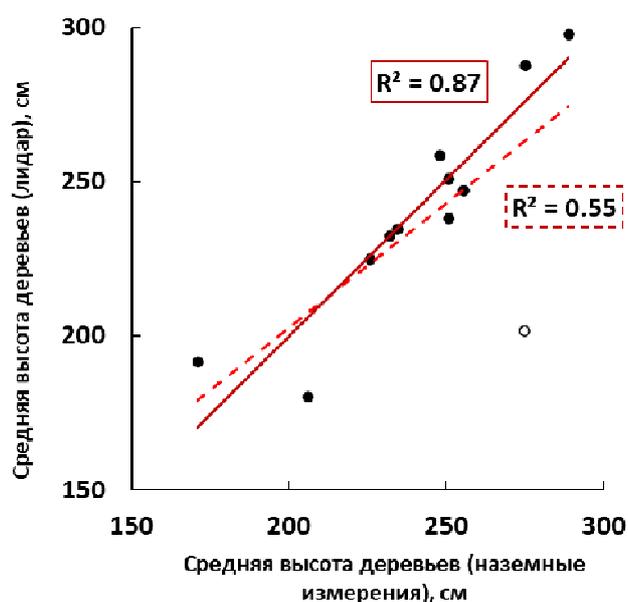
ПРИЛОЖЕНИЕ 2: Последовательность постобработки лидарных данных, выполненная при помощи модулей обработки MATLAB



ПРИЛОЖЕНИЕ 3: Результаты прямых измерений высот отдельных деревьев на участке сосново-кустарничкового сфагнового сообщества болотного стационара «Мухрино»

№	Высота, см	Вид / состояние	№	Высота, см	Вид / состояние	№	Высота, см	Вид / состояние
1	126	<i>Pinus sibirica</i>	24	190	<i>Pinus sylvestris</i>	47	214	сыхотой
2	150	<i>Pinus sylvestris</i>	25	140	<i>Pinus sylvestris</i>	48	285	<i>Pinus sylvestris</i>
3	185	<i>Pinus sylvestris</i>	26	270	<i>Pinus sylvestris</i>	49	240	сыхотой
4	185	<i>Pinus sylvestris</i>	27	290	<i>Pinus sylvestris</i>	50	190	<i>Pinus sylvestris</i>
5	190	<i>Pinus sylvestris</i>	28	210	<i>Pinus sylvestris</i>	51	232	<i>Pinus sylvestris</i>
6	72	<i>Pinus sibirica</i>	29	250	<i>Pinus sylvestris</i>	52	230	<i>Pinus sylvestris</i>
7	150	<i>Pinus sylvestris</i>	30	275	<i>Pinus sylvestris</i>	53	230	<i>Pinus sylvestris</i>
8	230	<i>Pinus sylvestris</i>	31	275	<i>Pinus sylvestris</i>	54	120	<i>Pinus sibirica</i>
9	285	<i>Pinus sylvestris</i>	32	275	<i>Pinus sylvestris</i>	55	170	<i>Pinus sylvestris</i>
10	177	<i>Pinus sylvestris</i>	33	190	<i>Pinus sylvestris</i>	56	300	<i>Pinus sylvestris</i>
11	174	<i>Pinus sylvestris</i>	34	170	<i>Pinus sylvestris</i>	57	210	<i>Pinus sylvestris</i>
12	275	<i>Pinus sylvestris</i>	35	205	<i>Pinus sylvestris</i>	58	230	<i>Pinus sylvestris</i>
13	230	<i>Pinus sylvestris</i>	36	210	<i>Pinus sylvestris</i>	59	220	сыхотой
14	164	<i>Pinus sylvestris</i>	37	225	<i>Pinus sylvestris</i>	60	220	сыхотой
15	245	<i>Pinus sylvestris</i>	38	180	<i>Pinus sylvestris</i>	61	63	<i>Pinus sylvestris</i>
16	170	<i>Pinus sylvestris</i>	39	270	<i>Pinus sylvestris</i>	62	151	<i>Pinus sylvestris</i>
17	185	<i>Pinus sylvestris</i>	40	270	<i>Pinus sylvestris</i>	63	290	<i>Pinus sibirica</i>
18	220	<i>Pinus sylvestris</i>	41	180	<i>Pinus sylvestris</i>			
19	173	<i>Pinus sylvestris</i>	42	206	<i>Pinus sylvestris</i>			
20	130	<i>Pinus sylvestris</i>	43	203	<i>Pinus sylvestris</i>			
21	110	<i>Pinus sylvestris</i>	44	230	<i>Pinus sylvestris</i>			
22	110	<i>Pinus sylvestris</i>	45	190	<i>Pinus sylvestris</i>			
23	90	<i>Pinus sylvestris</i>	46	197	<i>Pinus sylvestris</i>			

ПРИЛОЖЕНИЕ 4: Линейная регрессия между средней высотой деревьев, полученной при помощи прямой (наземные измерения) и дистанционной (на основе сегментации облака точек лидарной съемки) оценке. Сплошная красная линия демонстрирует регрессионное уравнение без учета участка 2.11 (РмМК) – выколота точка; штриховая – с ним.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анучин Н.П. Лесная таксация : [учеб.] / Н.П. Анучин. – 5-е изд., доп. – М. : Лесная промышленность, 1982. – 552 с.
- Dalla Corte A.P., Rex F.E., Almeida D.R.A.D., Sanquetta C.R., Silva C.A., Moura M.M., Wilkinson B., Zambrano A.M.A., da Cunha Neto E.M., Veras H.F.P., de Moraes A., Klauberg C., Mohan M., Cardil A., Broadbent E.N. 2020. Measuring individual tree diameter and height using GatorEye High-Density UAV-Lidar in an integrated crop-livestock-forest system. *Remote Sensing*, 12(5): 863.
- Efremov S.P., Efremova T.T., Bleuten W. 2005. Biological Productivity and the Carbon Pool of Forest Swamps in West Siberia. *Siberian Journal of Ecology*, 12(1): 29-44. (in Russian). [Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Блейтен В. 2005. Биологическая продуктивность и углеродный пул фитомассы лесных болот Западной Сибири // Сибирский экологический журнал. Т. 12. № 1. С. 29-44.]
- Fedorov N.; Bikbaev I.; Shirokikh P.; Zhigunova S.; Tuktamyshev I.; Mikhaylenko O.; Martynenko V.; Kulagin A.; Giniyatullin R.; Urazgildin R.; Komissarovet M., Belan L. 2023. Estimation of Carbon Stocks of Birch Forests on Abandoned Arable Lands in the Cis-Ural Using Unmanned Aerial Vehicle-Mounted LiDAR Camera. *Forests*, 14: 2392. <https://doi.org/10.3390/f14122392>
- Ganz S., Käber Y., Adler P. 2019. Measuring tree height with remote sensing – A comparison of photogrammetric and LiDAR data with different field measurements. *Forests*, 10(8): 694.
- Ivanov K.E., Novikov S. 1976. *Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим*. Nauka, Moscow, 447 pp. (in Russian). [Иванов К.Е.; Новиков С. 1976. Болота Западной Сибири, их строение и гидрологический режим; Наука: Москва, СССР. п. 447.]
- Hudak A.T., Strand E. K., Vierling L.A., Byrne J. C., Eitel J.U., Martinuzzi S., Falkowski M.J. 2012. Quantifying aboveground forest carbon pools and fluxes from repeat LiDAR surveys. *Remote Sensing of Environment*, 123: 25-40.
- Lee H., Calvin K., Dasgupta D., Krinmer G., Mukherji A., Thorne P., ... Zommers, Z. 2023. Synthesis report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6), *Longer report. IPCC*.
- Koronatova N.G., Kosykh N.P. 2014. Ratio between productivity of tree and moss-grass-dwarf shrub storeys in ombrotrophic raised bogs in the middle taiga. In: *Proceedings of the Fourth International Field Symposium*, (A.A. Titlyanova, M.I. Dergacheva, eds.). Publishing house of Tomsk University, Tomsk. P. 182-185. (in Russian). [Коронатова Н.Г., Косых Н.П. 2014. Соотношение продуктивности древесного и мохово-травяно-кустарничкового ярусов на среднегаёжных выпуклых олиготрофных болотах // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: Материалы Четвертого Международного полевого симпозиума / Под ред. А.А. Титляновой и М.И. Дергачевой. Томск: Изд-во Том. Ун-та. С. 182-185.]
- Kosykh N.P., Makhatkov I.D. 2008. Структура растительного вещества в лесо-болотных экосистемах средней тайги Западной Сибири. *Вестник Томского государственного педагогического университета*, 4: 77-80. (in Russian). [Косых Н.П., Махатков И.А. 2008. Структура растительного вещества в лесо-болотных экосистемах средней тайги Западной Сибири // Вестник Томского государственного педагогического университета. № 4. С. 77-80.]
- Kurpitanova I.V., Kaverin A.A., Filippov I.V., Ilyasov D.V., Lapshina E.D., Logunova E.V., Kulyabin M.F. 2022. The main physical and geographical characteristics of the Mukhrino field station area and its surroundings. *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 13(4): 215-252.
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I. 1996. Allometric equations for phytomass based on data from pine, spruce, aspen and birch trees in the European part of Russia. *Russian Journal of Forest Science*, 6: 36-46. (in Russian). [Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И. 1996. Аллометрические уравнения для фитомассы по данным деревьев сосны, ели, осины и березы в Европейской части России. // Лесоведение. N 6 С. 36-46.]
- Utkin A.I., Zamolodchikov D.G., Korovin G.N., Nefed'ev V.V., Gul'be T.A., Gul'be Ya.I., Gamburg S.P. 1997. Determination of carbon reserves in sample plots: comparison of allometric and volumetric conversion methods. *Russian Journal of Forest Science*, 5: 51-65. (in Russian). [Уткин А.И., Замолодчиков Д.Г., Коровин Г.Н., Нефедьев В.В., Гульбе Т.А., Гульбе Я.И., Гамбург С.П. 1997. Определение запасов углерода на пробных площадях: сравнение аллометрического и конверсионнообъемного методов. // Лесоведение. 1997. N 5 С. 51-65.]
- Usoltsev V.A., Chasovskikh V.P., Noritsina Yu.V., Noritsin D.V. 2016. Allometric models of tree phytomass for laser sensing and ground-based taxation of the carbon pool in Eurasian forests: a comparative analysis. *Siberian Journal of Forest Science*, 4: 15-25. (in Russian). [Усольцев В.А., Часовских В.П., Норицина Ю.В., Норисин Д.В. 2016. Аллометрические модели фитомассы деревьев для лазерного зондирования и наземной таксации углеродного пула в лесах Евразии: сравнительный анализ. Сибирский лесной журнал, 4, 15-25.]
- Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Surový P., Chiteculo V. 2017. Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 38: 2392-2410.
- Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A. 2011. Estimation of Forest Cover Extent over Peatlands and Paludified Shallow-Peat Lands in Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 4(7) 734-741.
- Zhao K., Suarez J.C., Garcia M., Hu T., Wang C., Londo A. 2018. Utility of multitemporal lidar for forest and carbon monitoring: Tree growth, biomass dynamics, and carbon flux. *Remote Sensing of Environment*, 204: 883-897.
- Order of the Government of the Russian Federation dated October 29, 2022 No. 3240-р On approval of the most important innovative project of national importance "Unified National System for Monitoring Climate-Active Substances" and the action plan ("road map") for the implementation of the first stage (2022 - 2024) of the most important innovative project of national importance "Unified national system for monitoring climate-active substances" (in Russian). [Распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2022 г. № 3240-р Об утверждении важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ" и

плана мероприятий ("дорожной карты") по реализации первого этапа (2022 - 2024 гг.) важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ"]

Поступила в редакцию: 12.12.2023
Переработанный вариант: 30.12.2023