

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ ARBOREAL FOREST ДЛЯ ТАКСАЦИИ ЕЛОВЫХ ДРЕВОСТОЕВ

Н.Н. Дубенок, А.В. Лебедев, В.В. Гостев<sup>✉</sup>

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), Россия, 127550, Москва, Тимирязевская ул., д. 49

v.gostev@rgau-msha.ru

Приведены результаты оценки качества определения таксационных показателей чистых еловых древостоев Костромской области с использованием мобильного приложения Arboreal Forest на базе смартфона Apple iPhone 14 Pro, оснащенного LiDAR-датчиком. Исследования выполнены на четырех временных пробных площадях. Установлено, что значения диаметров и сумм площадей поперечных сечений стволов, полученные при помощи мобильного приложения и мерной вилки, имеют высокую степень соответствия. С применением теста Колмогорова — Смирнова ( $p = 0,05$ ) подтверждено отсутствие статистически достоверных различий между рядами распределения деревьев по ступеням толщины. Определено, что отклонение среднего диаметра, рассчитанного по данным приложения Arboreal Forest, от измеренного мерной вилкой не превышает  $\pm 3,2$  %, а отклонение сумм площадей сечений и запасов  $\pm 6,4$  %. Показано, что полученная точность соответствует требованиям, предъявляемым к глазомерно-измерительному способу таксации. Рекомендовано продолжить исследования, направленные на разработку отечественных приложений и способов таксации с применением мобильных устройств.

**Ключевые слова:** смартфон, iPhone LiDAR, Arboreal Forest, таксационные показатели, еловые древостои, Костромская область

**Ссылка для цитирования:** Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Использование мобильного приложения Arboreal Forest для таксации еловых древостоев // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2026. Т. 30. № 2. С. 18–30. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-18-30

Научные достижения последних десятилетий открывают большие возможности для внедрения новых и эффективных технологий в области лесотаксационных измерений. В настоящее время активно развиваются способы таксации с применением лазерного сканирования [1, 2]. В лесохозяйственных исследованиях наиболее часто используются данные, полученные с применением LiDAR (Light Detection and Ranging) — оптического сенсора, испускающего поток лазерных лучей. В результате лазерной съемки формируется облако точек, по которому возможно определение количественных характеристик объектов [3, 4].

В работах [5–7] отмечается, что оценки таксационных показателей древостоев с высокой точностью можно получить с помощью систем наземного лазерного сканирования, определяющего такие показатели, как высота и диаметр ствола деревьев [8–10]. Путем использования объединенных данных наземного и воздушно-лазерного сканирования можно повысить точность определения диаметра деревьев по

сравнению с наземной инструментальной таксацией [11].

Встроенными датчиками LiDAR оборудованы современные мобильные устройства (смартфоны и планшеты), что позволяет через приложения проводить лесотаксационные измерения отдельно растущих деревьев и древостоев в целом [12]. К основным преимуществам мобильных устройств, оснащенных датчиком LiDAR, относят небольшую массу, компактные размеры, понятный интерфейс, быстрый обмен данными, снижение временных и трудовых затрат на проведение работ, быстрое получение изображений и данных о пространственном расположении объектов [13, 14]. Среди многообразия мобильных приложений, позволяющих фиксировать дендрометрические показатели, можно выделить Arboreal Forest, Forest Scanner, iForester и др.

Применение смартфонов с установленными приложениями для таксации лесов способствует повышению эффективности работ и сокращению затрат на их проведение благодаря относительно небольшой стоимости мобильного устройства, заменяющего некоторые специализированные инструменты без потерь точности

Т а б л и ц а 1

**Характеристика древостоев (состав 10Е) на временных пробных площадях**  
**Forest stands characteristics (composition 10E) on temporary trial plots**

Номер пробной площадки	Площадь, га	Средняя высота дерева, м	Средний диаметр ствола, см	Число деревьев на 1 га, шт.	Сумма площадей сечений на 1 га, м <sup>2</sup>	Запас на 1 га, м <sup>3</sup>
1	0,7076	25,	36,5	163	17,0	178,4
2	0,3122	26,0	32,3	461	37,8	412,8
3	0,2265	24,0	29,7	474	32,6	328,9
4	0,1847	25,0	32,7	606	50,3	528,4

данных [15, 16]. Оценка качества определения таксационных показателей древостоев сосны и эвкалипта в пределах северной части Португалии с помощью устройств на базе операционных систем Android и iOS по сравнению с инструментальной таксацией показала, что наиболее точные результаты получены благодаря шведскому приложению Arboreal Forest [15].

Если сопоставить результаты измерений диаметра стволов, полученные через приложение Arboreal Forest и с помощью мерной ленты, то можно отметить их хорошую согласованность, несмотря на тенденцию незначительной недооценки результатов измерений мобильным приложением [17].

Опыт использования мобильных приложений для таксации лесов в России весьма ограничен. Приложения для смартфонов выступают эффективной альтернативой стандартным (инструментальным) методам проведения таксации и инвентаризации лесов, однако в рамках достижения технологического суверенитета и импортозамещения имеется потребность в разработке отечественных устройств и программного обеспечения к ним [12].

## Цель работы

Цель работы — оценка качества определения таксационных показателей еловых древостоев с помощью смартфона, оснащенного датчиком LiDAR, через приложение Arboreal Forest.

## Материалы и методы

Исследование выполнено на территории Кологривского лесничества Костромской области (58°8107'N, 44°3423'E, WGS 84). Сбор данных проводился в еловых древостоях, сформированных на территории региона преимущественно елью финской (*Picea × fennica* (Regel) Kom.), у которой с различной степенью проявляются

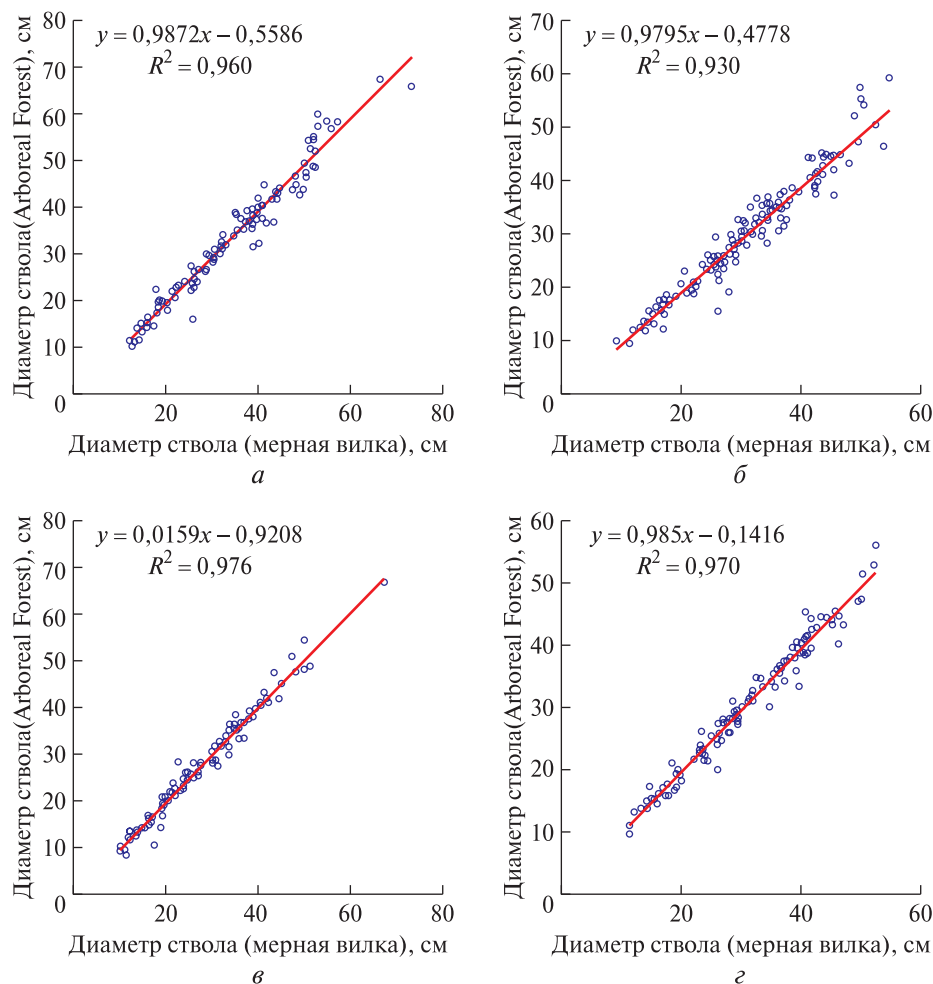


**Рис. 1.** Интерфейс приложения Arboreal Forest при измерении диаметра ствола (скриншот сделан во время работы)

**Fig. 1.** The Arboreal Forest app interface for measuring trunk diameter (screenshot taken during operation)

морфологические признаки ели обыкновенной (*P. abies* (L.) H. Karst.) и ели сибирской (*P. obovata* Ledeb.) [18, 19]. Полевые работы проведены на четырех временных пробных площадях, заложенных в наиболее типичных и высокопродуктивных типах леса — ельниках кисличных и ельниках черничных [20] (табл. 1).

Определение таксационного диаметра стволов выполнено одновременно с измерениями



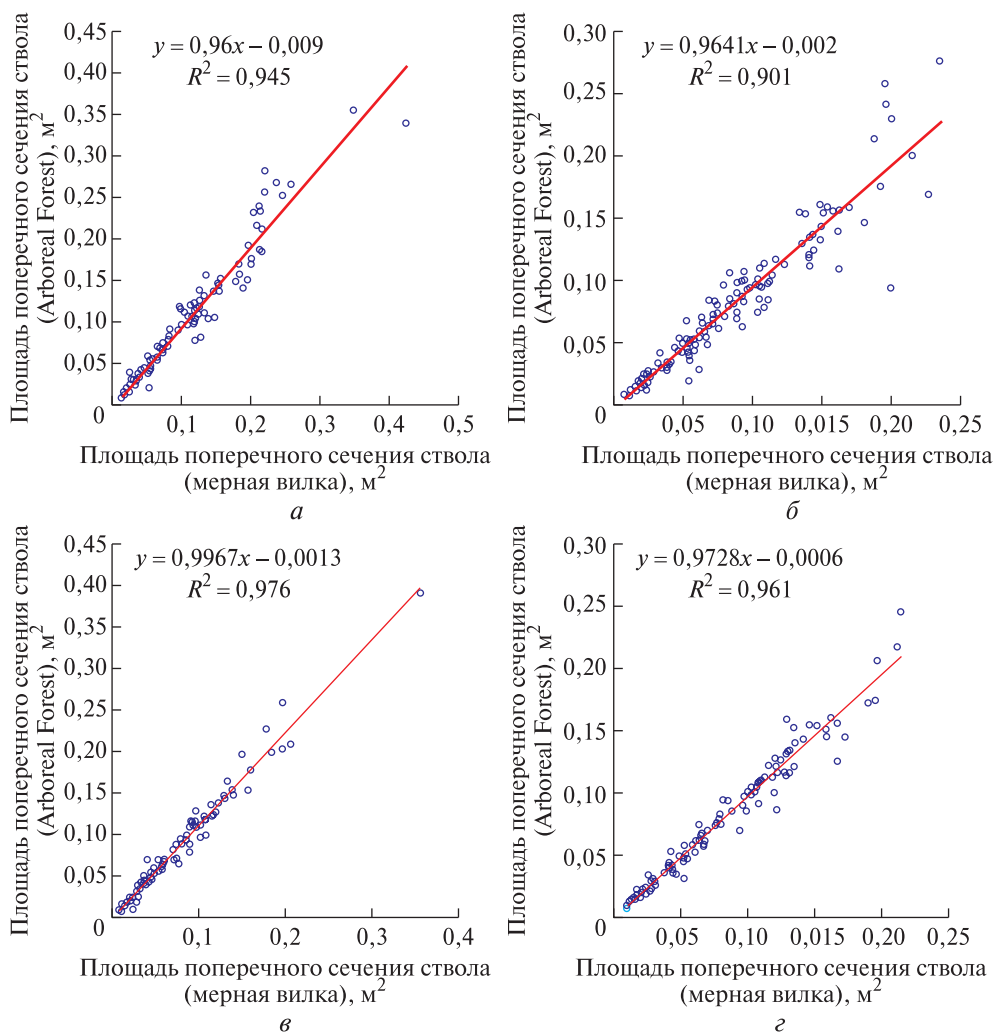
**Рис. 2.** Соотношение значений диаметра ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, полученными мерной вилкой и приложением Arboreal Forest: *пробные площади:* а — 1; б — 2; в — 3; з — 4

**Fig. 2.** Correlation of trunk diameter values at a height of 1,3 m above the ground, obtained with a tree caliper and the Arboreal Forest app: *sample plots:* а — 1; б — 2; в — 3; з — 4

диаметра стволов мерной вилкой (Haglof Mantax Blue) в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до 0,1 см и на базе приложения Arboreal Forest (версия 3.50) на платформе смартфона Apple iPhone Pro 14. Мобильное приложение использовано по инструкции разработчика. Для определения расстояния до деревьев перед началом работ устройством фиксировалась точка отсчета на местности. На пробной площади произвольной конфигурации был проведен сплошной перебор деревьев для измерения диаметра стволов. С расстояния от измеряемого объекта от 0,3 до 1,0 м (в зависимости от толщины ствола дерева) на высоту 1,3 м от поверхности земли наводилась камера смартфона. После автоматизированного распознавания контуров ствола фиксировалось значение таксационного диаметра

(с точностью до 0,1 см) (рис. 1) [15, 21], а исполнителем из выпадающего списка выбиралась соответствующая древесная порода. Географические координаты стволов обмеренных деревьев определялись в автоматическом режиме. По окончании перебора данные о номере дерева, диаметре его ствола, дате проведения измерений, GPS-координатах расположения ствола, точности сигнала GPS, древесной породе, а также комментарии сохранялись в виде файла формата JSON. Для определения высоты деревьев на каждой пробной площади высотомером Nikon Forestry Pro II осуществлялось измерение высот 20...25 деревьев в диапазоне всех представленных ступеней толщины стволов.

Материалы полевых исследований из отчетов приложения Arboreal Forest импортиро-



**Рис. 3.** Соотношение значений площади поперечного сечения стволов на высоте 1,3 м от поверхности земли, полученными мерной вилкой и приложением Arboreal Forest: *пробные площади:* а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

**Fig. 3.** Correlation of trunk cross-sectional area values at a height of 1.3 m above the ground, obtained with a tree caliper and the Arboreal Forest app: *sample plots:* а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

вались в таблицы Microsoft Office Excel для проведения подготовки к статистической обработке. По полученным значениям диаметра стволов проводился расчет среднего значения диаметра ствола для каждой пробной площади, определялись суммы площадей поперечных сечений. Анализ данных был направлен на выявление соответствий и степени различий между значениями диаметра стволов и площадей поперечных сечений на высоте 1,3 м от поверхности земли, установленных с применением приложения Arboreal Forest и инструментальным методом (стандартная методика).

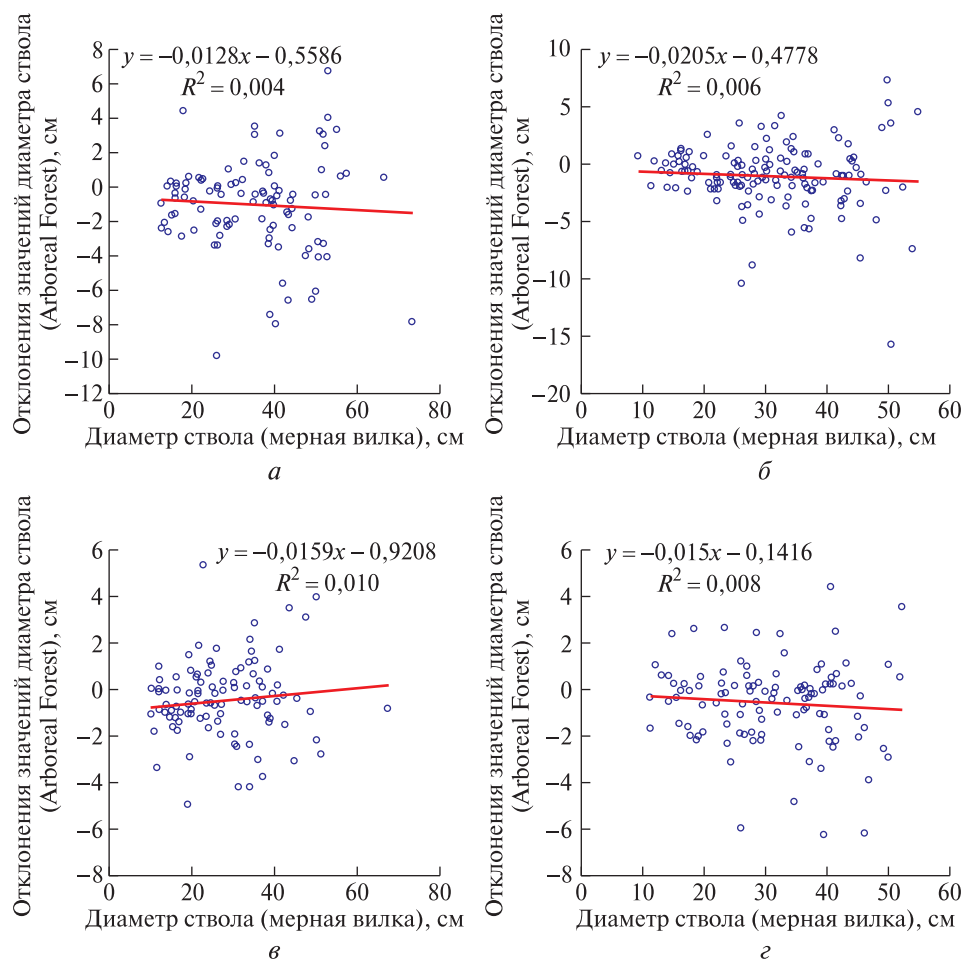
Оценка соответствия значений диаметра стволов на высоте 1,3 м от поверхности земли, полученных по стандартной методике и с использованием приложения Arboreal Forest, проводилась с применением графического анализа

и расчета общепринятых метрик: линейного отклонения, квадратного корня из среднеквадратической ошибки (*RMSE*), средней абсолютной ошибки (*MAE*), ошибки среднего смещения (*MBE*), среднего процента абсолютной ошибки (*MAPE*), коэффициента детерминации ( $R^2$ ) [22, 23].

Выявление различий между рядами распределения количества деревьев по четырехсантиметровым ступеням толщины, полученных двумя методами, проводилось с применением критерия согласия Колмогорова — Смирнова (*KS*), расчет которого выполнялся в среде вычислений *R* (версия 4.4.2.) при  $p = 0,05$  [24, 25].

## Результаты и обсуждение

Графическая визуализация соотношений между значениями диаметра стволов на высоте



**Рис. 4.** Отклонения значений диаметра ствола на высоте 1,3 м от поверхности земли, определенных по данным приложения Arboreal Forest, от измеренных мерной вилкой: пробные площади: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

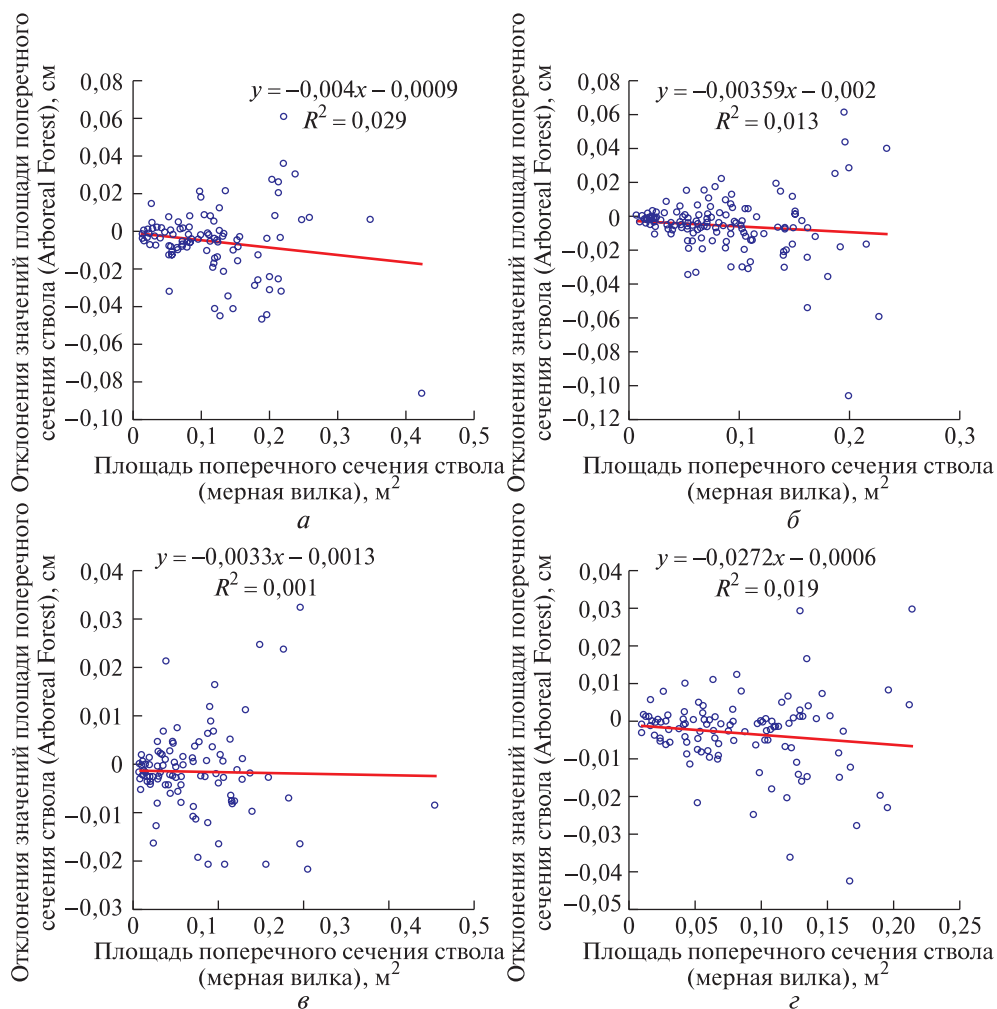
**Fig. 4.** Deviations of trunk diameter values at a height of 1.3 m above the ground, determined using Arboreal Forest app data, from those measured with a tree caliper: *sample plots*: а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

1,3 м от поверхности земли (рис. 2) и площадями поперечного сечения стволов (рис. 3), измеренными мерной вилкой и с помощью приложения Arboreal Forest, демонстрируют высокую степень соответствия. Большая часть точек данных расположена вдоль линий тренда, а значения коэффициентов детерминации (для диаметра стволов от 0,930 до 0,976; для площадей поперечного сечения стволов от 0,901 до 0,976) указывают на высокую согласованность значений двух рассматриваемых выборок.

Анализ отклонения значений диаметра ствола (рис. 4) и площади поперечного сечения на высоте 1,3 м от поверхности земли (рис. 5), определенных приложением Arboreal Forest от значений, измеренных мерной вилкой, позволяет сделать вывод об их независимости и близком расположении к нулю. При определении диаметра приложением Arboreal Forest на пробных площадях

1, 2 и 4 (рис. 4, а, б, г) зафиксировано незначительное занижение значений по сравнению со значениями, полученными с использованием мерной вилки, на что указывают отрицательные угловые коэффициенты линий тренда. Значения коэффициентов детерминации ( $R^2 < 0,1$ ) позволяют считать эту зависимость слабовыраженной. Для площадей поперечного сечения отмечается сходный тренд (см. рис. 5) при  $R^2 < 0,05$ .

Для диаметра ствола величина  $RMSE$  располагается в пределах от 1,289 до 2,146 см; для площади сечения — от 0,009 до 0,018 м<sup>2</sup> (табл. 2). Метрика  $MBE$  указывает на незначительное занижение значений диаметра и площади сечения приложением Arboreal Forest. Средняя доля абсолютной ошибки при определении диаметра приложением Arboreal Forest не превышает 10,044 %; площади поперечного сечения стволов — 13,186 %. На хорошую согласованность



**Рис. 5.** Отклонения значений площади поперечного сечения стволов на высоте 1,3 м от поверхности земли, определенных по данным приложения Arboreal Forest, от полученных данных при помощи мерной вилки: *пробные площади:* а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

**Fig. 5.** Deviations of trunk cross-sectional area values at a height of 1.3 m above the ground, determined using the Arboreal Forest app, from those obtained using the tree caliper: *sample plots:* а — 1; б — 2; в — 3; г — 4

измеренных мерной вилкой и полученных по данным приложения Arboreal Forest значений таксационных показателей указывает доля объясненной дисперсии: для диаметра стволов — от 0,930 до 0,976; для площади поперечного сечения стволов — от 0,901 до 0,976 (см. табл. 2).

Между рядами распределения для рассматриваемых двух методов отсутствуют статистически достоверные различия, о чем свидетельствуют результаты теста Колмогорова — Смирнова при уровне значимости 0,05 (рис. 6).

Таким образом, применение приложения Arboreal Forest позволяет получить сопоставимые с данными мерной вилки значения диаметра стволов и сумм площадей поперечного сечения стволов при проведении сплошного перечета деревьев.

Отклонение среднего диаметра стволов, рассчитанного с применением приложения Arboreal Forest, от полученного с использованием мерной вилки, составило от  $-1,0$  см ( $-3,2\%$ ) до  $-0,3$  см ( $-1,1\%$ ), что не превышает значение допустимой случайной ошибки ( $\pm 10\%$ ) при глазомерно-измерительном способе таксации, согласно Приказу Минприроды России от 05.08.2022 № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции» (табл. 3).

Значения сумм площадей поперечного сечения на высоте 1,3 м, рассчитанные с помощью приложения Arboreal Forest оказались ниже полученных мерной вилкой на величину от  $2,3$  м<sup>2</sup> ( $-6,4\%$ ) до  $0,7$  м<sup>2</sup> ( $-2,3\%$ ).

Определение запаса древесины  $M$  осуществляется по значениям суммы площадей попереч-

Т а б л и ц а 2

**Метрики соответствия значений таксационного диаметра и сумм площадей сечения на высоте 1,3 м от поверхности земли, определенных с применением мерной вилки и Arboreal Forest**

Correspondence metrics for the inspected diameter values and the sums of cross-sectional areas at a height of 1,3 m above the ground, determined using the tree caliper and Arboreal Forest

Номер пробной площади	Квадратный корень из среднеквадратической ошибки <i>RMSE</i>	Ошибка среднего смещения <i>MBE</i>	Средняя абсолютная ошибка <i>MAE</i>	Средний процент абсолютной ошибки <i>MAPE</i>	Коэффициент детерминации $R^2$
Средний диаметр ствола на высоте 1,3 м					
1	1,953	0,500	1,002	8,871	0,960
2	2,146	0,555	1,061	10,044	0,930
3	1,289	0,243	0,659	7,831	0,976
4	1,327	0,305	0,662	6,723	0,970
Сумма площадей поперечного сечения на высоте 1,3 м					
1	0,018	0,005	0,012	11,684	0,945
2	0,018	0,005	0,011	13,186	0,901
3	0,009	0,002	0,006	10,302	0,976
4	0,010	0,003	0,007	8,895	0,961

Т а б л и ц а 3

**Таксационные показатели еловых древостоев на исследуемых пробных площадях, рассчитанные по данным измерений приложения Arboreal Forest и мерной вилкой**

Inventory indicators of a spruce stand in the study plots, calculated using Arboreal Forest app measurements and a tree caliper

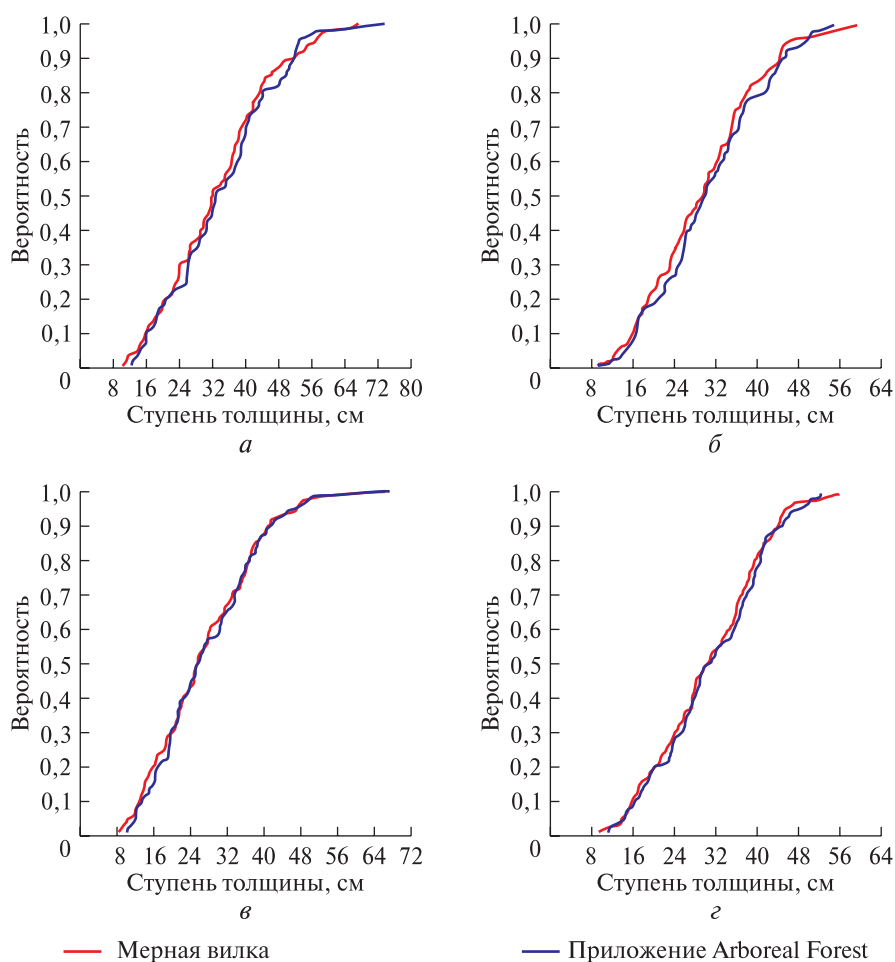
Номер пробной площади	Показатель	Приложение Arboreal Forest	Мерная вилка	Абсолютное отклонение	Относительное отклонение, %
1	Средний диаметр стволов, см	35,6	36,5	-0,9	-2,5
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	16,2	17,0	-0,8	-5,1
2	Средний диаметр стволов, см	31,3	32,3	-1,0	-3,2
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	35,5	37,8	-2,3	-6,4
3	Средний диаметр стволов, см	29,4	29,7	-0,3	-1,1
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	31,9	32,6	-0,7	-2,3
4	Средний диаметр, см	32,1	32,7	-0,6	-1,8
	Сумма площадей поперечного сечения стволов, м <sup>2</sup> /га	48,6	50,3	-1,8	-3,6

ного сечения стволов деревьев на высоте 1,3 м от поверхности земли  $G$ , их средней высоты  $H$  и среднего видового числа  $F$  по формуле

$$M = GHF.$$

Таким образом, при одинаковых значениях средней высоты и среднего видового числа точ-

ность определения запаса древостоя будет зависеть от значения суммы площадей поперечного сечения стволов. При ее расчете, по данным приложения Arboreal Forest, отклонение запасов по сравнению с данными, полученными мерной вилкой, не превышает 6,4 %. При этом допустимая случайная ошибка определения запаса при



**Рис. 6.** Соответствие ступеней толщины, установленных при помощи мерной вилки и приложения Arboreal Forest: *пробные площади*: а — 1 ( $KS = 0,078$ ;  $p = 0,87$ ); б — 2 ( $KS = 0,090$ ;  $p = 0,60$ ); в — 3 ( $KS = 0,065$ ;  $p = 0,98$ ); г — 4 ( $KS = 0,054$ ;  $p = 1,00$ )

**Fig. 6.** Correlation between the thickness grades established using the caliper and the Arboreal Forest app: *sample plots*: а — 1 ( $KS = 0,078$ ;  $p = 0,87$ ); б — 2 ( $KS = 0,090$ ;  $p = 0,60$ ); в — 3 ( $KS = 0,065$ ;  $p = 0,98$ ); г — 4 ( $KS = 0,054$ ;  $p = 1,00$ )

глазомерно-измерительном способе таксации не должна выходить за пределы  $\pm 15\%$ .

Полученные результаты согласуются с данными зарубежных авторов. Применение смартфона с датчиком LiDAR позволяет получать количественные характеристики (таксационный диаметр стволов, сумму площадей поперечного сечения стволов, запас), не уступающие по точности инструментальной таксации [26, 27]. По мобильному приложению собственной разработки авторами работы [28] была получена погрешность определения диаметра стволов, составившая  $\pm 3,7$  см. Технические особенности датчика LiDAR называют [21] вероятной причиной возникновения погрешностей при измерении диаметра стволов. Использование приложения Arboreal Forest, по мнению авторов работы [15], позволяет значительно

сократить время, затраченное на проведение таксационных измерений, по сравнению со стандартным методом, а полученные результаты полностью соответствуют требованиям, предъявляемым к точности определения диаметра ствола.

Аналогичную смартфону с датчиком LiDAR точность измерения таксационных показателей в зарубежных и отечественных исследованиях демонстрируют наземные лазерные сканеры.

В работе [29] указано, что с помощью наземного лазера получена погрешность в определении диаметра ствола деревьев сосны, составившая  $\pm 1$  см.

В работе [30] для лесообразующих пород северо-западной части провинции Юньнань на юге Китая таксационные диаметры определены наземным лазером с точностью до  $\pm 1,28$  см.

С помощью мобильного лазера получена трехмерная сцена пробной площади и достигнута точность определения диаметра ствола сосны, равная ступени толщины [31]. Однако ввиду высокой стоимости и небольшой производительности широкое применение наземных лазерных сканеров в лесохозяйственных исследованиях затруднительно.

Слабо освещен в мировой литературе вопрос влияния условий местопроизрастания на точность таксации с помощью смартфона [27, 32]. Значительные трудности вызывает использование мобильных устройств для определения высоты деревьев, по причине наличия густого подлеска и подроста, сомкнутости полога, недостаточной освещенности и технических особенностей [33, 34].

Необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение эффективности применения мобильных устройств для инвентаризации лесных массивов. Актуальным является вопрос внедрения алгоритмов инвентаризации лесных массивов с помощью мобильных устройств на базе региональных сортиментных таблиц, моделей образующей стволов, уравнений зависимости высоты от диаметра. Возможна разработка отечественного приложения для таксации, аналогичного рассмотренному.

## Выводы

Вследствие анализа точности определения таксационных показателей диаметра и площади поперечного сечения стволов ели с помощью мобильного приложения Arboreal Forest на базе смартфона Apple iPhone Pro 14 при проведении сплошного перечета на пробных площадях получены результаты, указывающие на их хорошее соответствие. Соответствие ступеней толщины, установленных с помощью мерной вилки и приложения Arboreal Forest, подтверждено тестом Колмогорова — Смирнова на уровне значимости 5 %. Для еловых древостоев Костромской области установлено отклонение среднего диаметра ствола, рассчитанного с помощью приложения Arboreal Forest от полученного с помощью мерной вилки, которое не превышает  $\pm 3,2$  %, и отклонение сумм площадей поперечного сечения стволов и запасов древесины, которое не превышает  $\pm 6,4$  %, что свидетельствует о необходимой точности, предъявляемой к глазомерно-измерительному способу таксации. Рекомендуется проведение дальнейших исследований, направленных на разработку способов таксации с применением смартфонов, оборудованных датчиком LiDAR, что повысит эффективность инвентаризации лесных массивов.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-01016, <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>*

## Список литературы

- [1] Петровская А.А., Мохов С.П. Определение размерно-качественных показателей древостоя с применением дронов и методов наземного лазерного сканирования // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов, 2024. № 1 (276). С. 120–124. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-16.
- [2] Крутов Т.Ю., Терехов В.И., Якубов А.Р. Подходы к разработке метода автоматизированной подеревной цифровой таксации локального участка леса с применением воздушных и наземных лидаров // Искусственный интеллект в автоматизированных системах управления и обработки данных: сб. статей Всерос. науч. конф., в 2 т., Москва, 27–28 апреля 2022 года. Т. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. С. 68–72.
- [3] Кедров А.В., Малтамо М. Лесоустройство с использованием технологий LiDAR // Геоинформационное обеспечение пространственного развития Пермского края: Сборник научных трудов / Пермский государственный национальный исследовательский университет, ГИС-центр ПГНИУ. Вып. 8. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. С. 34–40.
- [4] Ковязин В.Ф., Пасько О.А., Лепихина О.Ю., Трушников В.Е. Оценка точности инвентаризации лесных земель с применением воздушного лазерного сканирования // Геодезия и картография, 2022. Т. 83. № 6. С. 54–63. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63.
- [5] Говядин И.К., Чубинский А.Н., Алексеев А.С. Метод измерения диаметров деревьев на основе технологий искусственного интеллекта // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии, 2024. № 249. С. 177–194. DOI 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194
- [6] Устинов С.М., Митрофанов Е.М., Устинов М.В. Исследование возможности использования наземного мобильного лазерного сканера для определения высот и диаметров деревьев в сосновых насаждениях // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова, 2023. № 1(70). С. 134–140. DOI: 10.34655/bgsha.2023.70.1.016.
- [7] Bazezew M.N., Hussin Y.A., Kloosterman E.H. Integrating airborne LiDAR and terrestrial laser scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia // International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, no. 73(5), pp. 638–652. DOI: 73. 638-652. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.026>
- [8] Newnham G.J., Armston J.D., Calders K., Disney M.I., Lovell J.L., Schaaf C.B., Strahler A.H. Terrestrial Laser Scanning for Plot-Scale Forest Measurement // Current Forestry Reports, 2015, no. 1 (4), pp. 239–251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>
- [9] Liang X., Kankare V., Hyypä J., Wang Y., Kukko A., Haggrén H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F.,

- Holopainen M. Vastaranta Terrestrial laser scanning in forest inventories // *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, no. 115, pp. 63–77.  
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- [10] Pace R., Masini E., Giuliani D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., Angelis P. D., Calfapietra C. Tree measurements in the urban environment: insights from traditional and digital field instruments to smartphone applications // *Arboric. Urban For.*, 2022, no. 48, pp. 113–123.  
DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>
- [11] Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Slavik M. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures // *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, no. 112 (7), article 102917.  
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102917>
- [12] Лебедев А.В. Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона // *Лесотехнический журнал*, 2023. Т. 13. № 3(51). С. 56–70.  
DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5
- [13] Costantino D., Voza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges // *Applied System Innovation*, 2022, no. 5, p. 63.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>
- [14] Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad // *Methods Ecol. Evol.*, 2022, no. 14, pp. 1603–1609.  
<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- [15] Sandim A. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications // *Forests*, 2023, no. 14(8), p. 1553.  
<https://doi.org/10.3390/f14081553>
- [16] Ucar Z., Eker R., Bilici E., Akay A. Evaluating the Use of Smartphone Applications for Log Stacks Volume Measurement in Turkish Forestry Practices // *Croatian J. of Forest Engineering*, 2024, no. 45 (2), pp. 263–276.  
<https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2398>
- [17] Noah A Howie A., De Stefano A. Measuring Tree Diameter Using LiDAR Equipped iPad: An Evaluation of Forest Scanner and Arboreal Forest Applications // *Forest Science*, 2024, v. 70, iss. 4, pp. 304–310.  
<https://doi.org/10.1093/forsci/fxae017>
- [18] Рыжова Н.В., Шутов В.В., Коренев И.А., Мальшев В.А., Лебедев О.Ю. Морфология шишек и продуктивность ели в Костромской области // *Лесоведение*, 2003. № 5. С. 61–64.
- [19] Лебедев А.В., Гемонов А.В., Селиверстов А.М. Фенотипическая структура и разнообразие популяций ели заповедника «Кологривский лес» // *Природообустройство*, 2022. № 1. С. 109–116.  
DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-109-116
- [20] Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Чистяков С.А. Ход роста древостоев в еловых типах леса заповедника «Кологривский лес» // *Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.П. Филиппова*, 2023. № 1(70). С. 81–90.  
DOI: 10.34655/bgsha.2023.70.1.011
- [21] Borz S. A., Toaza J.M., Proto A.R. Accuracy of two LiDAR-based augmented reality apps in breast height diameter measurement // *Ecological Informatics*, 2024, v. 81, p. 102550.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102550>
- [22] Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Модель образующей древесного ствола сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей в Костромской области // *Лесотехнический журнал*, 2023. Т. 13. № 4.1(52). С. 5–22.  
DOI 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3.
- [23] Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостев В.В. Образующая, форма и объем стволов деревьев ели Костромской области // *Хвойные бореальной зоны*, 2024. Т. 42. № 4. С. 23–32.  
DOI 10.53374/1993-0135-2024-4-23-32
- [24] Ogana F.N., Itam E.S., Osho J.S.A. Modeling diameter distributions of *Gmelina arborea* plantation in Omo Forest Reserve, Nigeria with Johnson's SB // *J. of Sustainable Forestry*, 2017, no. 2 (36), pp. 121–133.  
<https://doi.org/10.1080/10549811.2016.1263575>
- [25] Pogoda P. Ochał W., Orzeł S. Modeling Diameter Distribution of Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) Stands in Poland // *Forests*, 2019, no. 10, id 412.  
<https://doi.org/10.3390/f10050412>
- [26] Ahamed A., Foye J., Poudel S., Trieschman E.J. Fike Measuring Tree Diameter with Photogrammetry Using Mobile Phone Cameras // *Forests*, 2023, no. 14, p. 2027. <https://doi.org/10.3390/f14102027>
- [27] Figorilli S., Tocci F., Vasta S., Sperandio G., Violino S., Gallo P., Ripa C., Costa C., Colle G., Saba E. P., Ortenzi L. Precision forestry: an open-source IoT digital caliper and app to simplify tree diameter measurements // *J. of Forestry Research*, 2024, no. 35, pp. 1–12.  
<https://doi.org/10.1007/s11676-024-01784-w>
- [28] Holcomb A., Tong L., Keshav S. Robust Single-Image Tree Diameter Estimation with Mobile Phones // *Remote Sens*, 2023, no. 15, p. 772.  
<https://doi.org/10.3390/rs15030772>
- [29] Henning J.G., Radtke P.J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar // *Forest Science*, 2006, no. 52 (1), pp. 67–80.
- [30] Liu G., Wang J., Dong P., Chen Y., Liu Z. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level // *Forests*, 2018, no. 9 (7), article 398.  
<https://doi.org/10.3390/f907039>
- [31] Шайтура С.В., Шайтура Н.С., Митрофанов Е.М., Мухин А.С., Устинов С.М. Применение наземных лазерных сканеров для мониторинга леса // *Природообустройство*, 2024. № 3. С. 124–132.  
DOI: <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2024-4-124-132>
- [32] Liu C., Xing Y., Duanmu J., Tian X. Evaluating Different Methods for Estimating Diameter at Breast Height from Terrestrial Laser Scanning // *Remote Sens.*, 2018, no. 10, p. 513. <https://doi.org/10.3390/rs10040513>
- [33] Srinivasan S., Popescu S.C., Eriksson M., Sheridan R.D., Ku N.W. Terrestrial Laser Scanning as an Effective Tool to Retrieve Tree Level Height, Crown Width, and Stem Diameter // *Remote Sens*, 2015, no. 7, pp. 1877–1896. <https://doi.org/10.3390/rs70201877>
- [34] Tarsha Kurdi F., Gharineiat Z., Lewandowicz E., Shan J. Modeling the Geometry of Tree Trunks Using LiDAR Data // *Forests*, 2024, no. 15, p. 368.  
<https://doi.org/10.3390/f15020368>

## Сведения об авторах

**Дубенок Николай Николаевич** — д-р с.-х. наук, профессор, академик РАН, зав. кафедрой сельскохозяйственных мелиораций, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), [ndubenok@mail.ru](mailto:ndubenok@mail.ru)

**Лебедев Александр Вячеславович** — д-р с.-х. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru)

**Гостев Владимир Викторович** — ассистент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева» (РГАУ–МСХА имени К.А. Тимирязева), [vgostev@rgau-msha.ru](mailto:vgostev@rgau-msha.ru)

Поступила в редакцию 06.05.2025.

Одобрено после рецензирования 28.11.2025.

Принята к публикации 18.02.2026.

## ARBOREAL FOREST MOBILE APPLICATION FOR SPRUCE STANDS INVENTORY

**N.N. Dubenok, A.V. Lebedev, V.V. Gostev**

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya st., 127550, Moscow, Russia

[v.gostev@rgau-msha.ru](mailto:v.gostev@rgau-msha.ru)

In recent years, international forestry practices have seen widespread adoption of smartphone applications and modern sensor-based methods for forest stand inventory. The aim of this study is to evaluate the accuracy of inventory indicators for spruce stands obtained using a smartphone equipped with a LiDAR sensor, demonstrated through the Arboreal Forest application. The research focuses on pure spruce stands in Kostroma Region, analyzed across four temporary sample plots. Tree measurements were conducted using traditional methods (calipers) and the Arboreal Forest app. Data analysis employed graphical methods and quality metric calculations. The results indicate strong agreement between diameter and basal area values obtained via Arboreal Forest and caliper measurements. Consistency in diameter class distributions, determined using calipers and the Arboreal Forest app, was confirmed by the Kolmogorov-Smirnov test ( $p = 0,05$ ) across all sample plots. The deviation of the mean diameter calculated using Arboreal Forest from caliper-based measurements did not exceed  $\pm 3,1$  %, while deviations for basal area and stand volume remained within  $\pm 6$  %. These margins align with the accuracy requirements of visual-measurement inventory methods.

**Keywords:** smartphone, iPhone LiDAR, Arboreal Forest, inventory indicators, spruce stands, Kostroma Region

**Suggested citation:** Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. *Ispol'zovanie mobil'nogo prilozheniya Arboreal Forest dlya taksatsii elovykh drevostoev* [Arboreal Forest mobile application for spruce stands inventory]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2026, vol. 30, no. 2, pp. 18–30. DOI: 10.17816/2542-1468-2026-2-18-30

## References

- [1] Petrovskaya A.A., Mokhov S.P. *Opreделение razmerno-kachestvennykh pokazateley drevesostoya s primeneniem dronov i metodov nazemnogo lazernogo skanirovaniya* [Determination of dimensional and qualitative indicators of forest stand using drones and terrestrial laser scanning methods]. *Trudy BGTU. Seriya 1: Lesnoe khozyaystvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых resursov* [Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Environmental Management and Processing of Renewable Resources], 2024, no. 1 (276), pp. 120–124. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-16
- [2] Krutov T.Yu., Terekhov V.I., Yakubov A.R. *Podkhody k razrabotke metoda avtomatizirovannoy poderevnoy tsifrovoy taksatsii lokal'nogo uchastka lesa s primeneniem vozdushnykh i nazemnykh lidarov* [Approaches to development of the method of automated digital valuation of the forest local area single trees with air-based and land-based LiDARs application]. *Iskusstvennyy intellekt v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya i obrabotki dannykh: sb. statey*

- Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii [Artificial Intelligence in Automated Control Systems and Data Processing: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference], in 2 vol., Moscow, April 27–28, 2022, vol. 1. Moscow: Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 2022, pp. 68–72.
- [3] Kedrov A.V., Malta M. *Lesoustroystvo s ispol'zovaniem tekhnologiy LiDAR* [Forest inventory with using technology LiDAR]. Geoinformatsionnoe obespechenie prostranstvennogo razvitiya Permskogo kraia: Sbornik nauchnykh trudov. Vypusk 8 [Geoinformation Support for Spatial Development of Perm Krai: Collection of Scientific Papers. Volume Issue 8]. Perm: Perm State National Research University, 2015, pp. 34–40.
- [4] Kovyazin V.F., Pas'ko O.A., Lepikhina O.Yu., Trushnikov V.E. *Otsenka tochnosti inventarizatsii lesnykh zemel' s primeneniem vozdushnogo lazernogo skanirovaniya* [Accuracy assessment of forest land inventory using airborne laser scanning]. Geodeziya i kartografiya [Geodesy and Cartography], 2022, v. 83, no. 6, pp. 54–63. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-984-6-54-63
- [5] Govyadin I.K., Chubinskiy A.N., Alekseev A.S. *Metod izmereniya diametrov derev'ev na osnove tekhnologiy iskusstvennogo intellekta* [Method for measuring tree diameters based on artificial intelligence technologies]. Izvestiya Sankt-Petersburgskoy lesotekhnicheskoy akademii [Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Academy], 2024, no. 249, pp. 177–194. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.249.177-194
- [6] Ustinov S.M., Mitrofanov E.M., Ustinov M.V. *Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya nazemnogo mobil'nogo lazernogo skanera dlya opredeleniya vysot i diametrov derev'ev v sosnovykh nasazhdeniyakh* [Study on the possibility of using a terrestrial mobile laser scanner for determining tree heights and diameters in pine stands]. Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov], 2023, no. 1(70), pp. 134–140. DOI: 10.34655/bgsha.2023.70.1.016
- [7] Bazezew M.N., Hussin Y.A., Kloosterman E.H. Integrating airborne LiDAR and terrestrial laser scanner forest parameters for accurate above-ground biomass/carbon estimation in Ayer Hitam tropical forest, Malaysia. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, no. 73(5), pp. 638–652. DOI: 73. 638-652. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.026>
- [8] Newnham G.J., Armston J.D., Calders K., Disney M.I., Lovell J.L., Schaaf C.B., Strahler A.H. Terrestrial Laser Scanning for Plot-Scale Forest Measurement. *Current Forestry Reports*, 2015, no. 1 (4), pp. 239–251. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0025-5>
- [9] Liang X., Kankare V., Hyyppä J., Wang Y., Kukko A., Haggrèn H., Yu X., Kaartinen H., Jaakkola A., Guan F., Holopainen M., 2016. Vastaranta Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, no. 115, pp. 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006>
- [10] Pace R., Masini E., Giulirelli D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., Angelis P. D., Calfapietra C. Tree measurements in the urban environment: insights from traditional and digital field instruments to smartphone applications. *Arboric. Urban For.*, 2022, no. 48, pp. 113–123. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>
- [11] Panagiotidis D., Abdollahnejad A., Slavik M. 3D point cloud fusion from UAV and TLS to assess temperate managed forest structures. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, no. 112 (7), article 102917. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102917>
- [12] Lebedev A.V. *Inventarizatsiya drevesnykh nasazhdeniy urbanizirovannykh territoriy s ispol'zovaniem smartfona* [Inventory of tree plantings in urbanized areas using a smartphone]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2023, v. 13, no. 3(51), pp. 56–70. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5
- [13] Costantino D., Voza G., Pepe M., Alfio V.S. Smartphone LiDAR Technologies for Surveying and Reality Modelling in Urban Scenarios: Evaluation Methods, Performance and Challenges. *Applied System Innovation*, 2022, no. 5, p. 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>
- [14] Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR equipped iPhone and iPad. *Methods Ecol. Evol.*, 2022, no. 14, pp. 1603–1609. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>
- [15] Sandim A. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests*, 2023, no. 14(8), p. 1553. <https://doi.org/10.3390/f14081553>
- [16] Ucar Z., Eker R., Bilici E., Akay A. Evaluating the Use of Smartphone Applications for Log Stacks Volume Measurement in Turkish Forestry Practices. *Croatian J. of Forest Engineering*, 2024, no. 45 (2). pp. 263–276. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2398>
- [17] Noah A Howie A., De Stefano A. Measuring Tree Diameter Using LiDAR Equipped iPad: An Evaluation of Forest Scanner and Arboreal Forest Applications. *Forest Science*, 2024, v. 70, iss. 4, pp. 304–310. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxae017>
- [18] Ryzhova N.V., Shutov V.V., Korenev I.A., Malyshev V.A., Lebedev O.Yu. *Morfologiya shishek i produktivnost' eli v Kostromskoy oblasti* [Cone morphology and productivity of spruce in the Kostroma region]. *Lesovedenie* [Forest Science], 2003, no. 5, pp. 61–64.
- [19] Lebedev A.V., Gemonov A.V., Seliverstov A.M. *Fenotipicheskaya struktura i raznoobrazie populyatsiy eli zapovednika «Kologrivskiy les»* [Phenotypic structure and diversity of spruce populations in the «Kologrivsky Les» Nature Reserve]. *Prirodoustroystvo* [Environmental Engineering], 2022, no. 1, pp. 109–116. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-109-116
- [20] Dubenok N.N., Lebedev A.V., Chistyakov S.A. *Khod rosta drevostoyev v yelovykh tipakh lesa zapovednika «Kologrivskiy les»* [Growth Dynamics of Forest Stands in Spruce Forest Types of the «Kologrivsky Forest» Nature Reserve]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* [Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy Named After V.R. Filippov], 2023, no. 1(70), pp. 81–90. <https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.70.1.011>

- [21] Borz S. A., Toaza J.M., Proto A.R. Accuracy of two LiDAR-based augmented reality apps in breast height diameter measurement. *Ecological Informatics*, 2024, v. 81, p. 102550. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102550>
- [22] Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. *Model' obrazuyushchey drevesnogo stvola sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.), proizrastayushchey v Kostromskoy oblasti* [Generatrix model of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) tree trunk growing in the Kostroma region]. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Journal], 2023, v. 13, no. 4.1(52), pp. 5–22. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/3
- [23] Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gostev V.V. *Obrazuyushchaya, forma i ob'em stvolov derev'ev eli Kostromskoy oblasti* [Generatrix, shape and volume of tree trunks of spruce in the Kostroma region]. *Khvoynye boreal'noy zony* [Conifers of the Boreal Zone], 2024, v. 42, no. 4, pp. 23–32. DOI: 10.53374/1993-0135-2024-4-23-32
- [24] Ogana F.N., Itam E.S., Osho J.S.A. Modeling diameter distributions of Gmelina arborea plantation in Omo Forest Reserve, Nigeria with Johnson's SB. *J. of Sustainable Forestry*, 2017, no. 2 (36), pp. 121–133. <https://doi.org/10.1080/10549811.2016.1263575>
- [25] Pogoda P. Ochał W., Orzeł S. Modeling Diameter Distribution of Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) Stands in Poland. *Forests*, 2019, no. 10, id 412. <https://doi.org/10.3390/f10050412>
- [26] Ahamed A., Foye J., Poudel S., Trieschman E.J. Fike Measuring Tree Diameter with Photogrammetry Using Mobile Phone Cameras. *Forests*, 2023, no. 14, p. 2027. <https://doi.org/10.3390/f14102027>
- [27] Figorilli S., Tocci F., Vasta S., Sperandio G., Violino S., Gallo P., Ripa C., Costa C., Colle G., Saba E. P., Ortenzi L. Precision forestry: an open-source IoT digital caliper and app to simplify tree diameter measurements. *J. of Forestry Research*, 2024, no. 35, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s11676-024-01784-w>
- [28] Holcomb A., Tong L., Keshav S. Robust Single-Image Tree Diameter Estimation with Mobile Phones. *Remote Sens*, 2023, no. 15, p. 772. <https://doi.org/10.3390/rs15030772>
- [29] Henning J.G., Radtke P.J. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science*, 2006, no. 52 (1), pp. 67–80.
- [30] Liu G., Wang J., Dong P., Chen Y., Liu Z. Estimating individual tree height and diameter at breast height (DBH) from terrestrial laser scanning (TLS) data at plot level. *Forests*, 2018, no. 9 (7), article 398. <https://doi.org/10.3390/f907039>
- [31] Shaytura S.V., Shaytura N.S., Mitrofanov E.M., Mukhin A.S., Ustinov S.M. *Primenenie nazemnykh lazernykh skanerov dlya monitoringa lesa* [Application of terrestrial laser scanners for forest monitoring]. *Prirodoustroystvo* [Prirodoustroystvo], 2024, no. 3, pp. 124–132. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-124-132
- [32] Liu C., Xing Y., Duanmu J., Tian X. Evaluating Different Methods for Estimating Diameter at Breast Height from Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sens.*, 2018, no. 10, p. 513. <https://doi.org/10.3390/rs10040513>
- [33] Srinivasan S., Popescu S.C., Eriksson M., Sheridan R.D., Ku N.W. Terrestrial Laser Scanning as an Effective Tool to Retrieve Tree Level Height, Crown Width, and Stem Diameter. *Remote Sens*, 2015, no. 7, pp. 1877–1896. <https://doi.org/10.3390/rs70201877>
- [34] Tarsha Kurdi F., Gharineiat Z., Lewandowicz E., Shan J. Modeling the Geometry of Tree Trunks Using LiDAR Data. *Forests*, 2024, no. 15, p. 368. <https://doi.org/10.3390/f15020368>

*This research was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 23-76-01016), <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>*

## Authors' information

**Dubenok Nikolay Nikolaevich** — Dr. Sci. (Agriculture), Professor, Academician of RAS, Head of the Department of Agricultural Reclamation of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, [ndubenok@mail.ru](mailto:ndubenok@mail.ru)

**Lebedev Aleksandr Viacheslavovich** — Dr. Sci. (Agriculture), Associate Professor of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, [alebedev@rgau-msha.ru](mailto:alebedev@rgau-msha.ru)

**Gostev Vladimir Viktorovich** — Assistant of the Department of Land Organization and Forestry of the Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, [vgostev@rgau-msha.ru](mailto:vgostev@rgau-msha.ru)

Received 06.05.2025.

Approved after review 28.11.2025.

Accepted for publication 18.02.2026.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest