


Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>

УДК 630*581/*584



Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона

Александр В. Лебедев^{1,2}✉, alebedev@rgau-msha.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, 127434, Россия

²ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кологривский лес» имени М.Г. Сеницына», ул. Некрасова, 48, г. Кологрив, Костромская обл., 157440, Россия

В последние годы для сбора биометрических показателей деревьев разрабатывается специализированное программное обеспечение для смартфонов, в том числе с использованием встроенных датчиков LiDAR. Мобильные приложения для таксации деревьев и древостоев находятся еще только на начальном пути своего развития, поэтому требуется сопоставление получаемых с их использованием данных с данными измерений, полученными с применением традиционных методов. Для России технология определения таксационных показателей и картографирование деревьев с применением смартфона остается не апробированной. Поэтому целью исследования являлось изучение возможности использования смартфона (приложение Arboreal Forest) для определения таксационных показателей и картирования деревьев на примере старовозрастных аллеиных посадок. Исследование проводилось в старовозрастных аллеиных посадках липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) на территории бывшего Зоотехнического техникума, расположенного в пос. Екимцево Кологривского муниципального округа Костромской обл. Сбор данных проводился в июле 2023 года с применением 1) традиционного метода и 2) приложения Arboreal Forest. Точность полученных результатов соответствует требованиям к таксации, обозначенным в лесоустроительной инструкции. Для объекта исследования выявлено, что отклонение среднеквадратического диаметра, рассчитанного по данным Arboreal Forest (47,3 см), от данных измерений мерной вилкой (48,8 см) составило -3,1 % (-1,5 см), а суммы площадей поперечных сечений -6,18 % или -3,28 м². Также по сравнению с традиционным методом Arboreal Forest имеет тенденцию к занижению диаметров стволов (особенно для крупномерных деревьев) и, как следствие, площадей поперечных сечений. Структура ряда распределения деревьев по ступеням толщины Arboreal Forest в целом близка ряду распределения, полученному традиционным способом. В перспективе приложения для смартфонов могут стать эффективной альтернативой традиционным методам проведения перечислительной таксации и инвентаризации зеленых насаждений.

Ключевые слова: *подеревная инвентаризация, липа мелколистная, Tilia cordata* Mill., таксация, Arboreal Forest, iPhone LiDAR, смартфон

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


Благодарности: автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Лебедев, А. В. Инвентаризация древесных насаждений урбанизированных территорий с использованием смартфона / А. В. Лебедев // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 3 (51). – С. 56–70. – Библиогр.: с. 65–70 (35 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>.

Поступила 31.08.2023. Пересмотрена 29.10.2023. Принята 15.11.2023. Опубликовано онлайн 30.11.2023

Tree inventory in urban areas using smartphone

Aleksandr V. Lebedev^{1,2}✉, alebedev@rgau-msha.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>

¹Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, 127434, Russian Federation

²Kologrivsky Forest Nature Reserve, Nekrasova st., 48, Kologriv town, Kostroma region, 157440, Russian Federation

Abstract

In recent years, specialized software for smartphones has been developed to collect biometric indicators of trees, including the use of built-in LiDAR sensors. Mobile applications for the inventory of trees and forest stands are still at the initial stage of their development; therefore, it is necessary to compare the data obtained with their use with the measurement data obtained using traditional methods. For Russia, the technology for determining tree and stand indicators and mapping trees using a smartphone remains untested. Therefore, the aim of the study was to study the possibility of using a smartphone (Arboreal Forest application) to determine tree indicators and map trees using the example of old-growth alley plantings. The study was carried out in old-growth alley plantings of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) on the territory of the former Zootechnical College, located in the Ekimtsevo village, Kologrivsky District, Kostroma Region. Data collection was conducted in July 2023 using 1) the traditional method and 2) the Arboreal Forest application. The accuracy of the results obtained corresponds to the requirements for inventory indicated in the forest inventory instructions. For the object of study, it was revealed that the deviation of the quadratic mean diameter calculated according to the Arboreal Forest data (47.3 cm) from the measurement data with a caliper (48.8 cm) was -3.1% (-1.5 cm), and basal areas -6.18 % or -3.28 m². Also, compared to the traditional method, Arboreal Forest tends to underestimate trunk diameters (especially for large trees) and, as a result, basal areas. The structure of the tree distribution series by Arboreal Forest tree diameter distribution is generally close to the distribution series obtained by the traditional method. In the future, applications for smartphones can become an effective alternative to traditional methods of tree and stand inventory.

Keywords: *tree inventory, Tilia cordata* Mill., *stand inventory, Arboreal Forest, iPhone LiDAR, smartphone*

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF 23-76-01016, <https://rscf.ru/project/23-76-01016/>.

Acknowledgments: author thanks the reviewers for their contribution to the peer review.

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

For citation: Lebedev A. V. (2023). Tree inventory in urban areas using smartphone. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 3 (51), pp. 56-70 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.3/5>.

Received 31.08.2023. **Revised** 29.10.2023. **Accepted** 15.11.2023. **Published online** 30.11.2023.

Введение

Древесные зеленые насаждения относятся к важным составляющим элементам урбоэкосистем, выполняя широкий спектр функций: от снижения уровня загрязнений окружающей среды до повышения эстетичности антропогенных и природных

ландшафтов [1, 2, 3]. На объектах ландшафтной архитектуры особенно важно поддерживать в актуальном состоянии информацию о зеленых насаждениях с целью оперативного проведения мероприятий по уходу и восстановлению. В последние годы в России в качестве проблемы отмечается отсут-

ствии единых методик для инвентаризации зеленых насаждений, а также необходимость совершенствования существующих [2, 4, 5]. При этом получают распространение как в нашей стране, так и за рубежом методы инвентаризации, основанные на использовании ГИС-технологий, бесконтактных измерений [6, 7, 8].

В качестве альтернативы традиционным методам инвентаризации древесной растительности все более популярным становится использование наземного лазерного сканирования (LiDAR) [9, 10, 11]. Биометрические характеристики деревьев могут быть точно и автоматически оценены на основе трехмерных облаков точек, полученных с помощью наземного лазерного сканера [12, 13]. Вместе с тем высокая стоимость устройств LiDAR, их тяжесть и необходимость использования специализированного программного обеспечения ограничивает их массовое применение [14, 15]. В 2020 году Apple выпустила первые устройства iPad Pro 2020 и iPhone 12 Pro, оснащенные датчиками LiDAR, в то время как Android-смартфоны оснащались сенсорами глубины (ToF) [16]. Возможности LiDAR и ToF в дальнейшем были проверены экспериментально для различных объектов и условий.

Технология Google Tango на устройстве Lenovo Phab 2 Pro была рассмотрена применительно к измерению таксационных диаметров стволов деревьев. В Словакии на трех круговых тестовых участках с радиусом 12,62 м значение квадратного корня из среднеквадратической ошибки (*RMSE*) диаметров составило менее 2 см [17], а на участке со 121 деревом в южной части Финляндии – 0,73 см [18]. Возможности сенсора LiDAR iPad Pro проверялись для целей крупномасштабного 3-D картографирования архитектурных объектов [19]. На основании значений ошибок было выявлено качество, приемлемое для работы в масштабе 1:200. Оценка точности и возможностей LiDAR сканера iPad Pro 2020 и iPhone Pro 12 проводилась для крупных природных объектов на примере скалы в Дании (длина 130 м, средняя высота 10 м) [20]. Авторами была получена реалистичная 3-D модель с точностью до 10 см. В то же время сравнение точности измерений промышленных LiDAR сенсоров

со встроенными в смартфоны и планшеты показывает преимущество первых из них [21].

В последние годы для сбора биометрических показателей деревьев разрабатывается специализированное программное обеспечение для смартфонов, в том числе с использованием встроенных датчиков LiDAR [22, 23]. Преимуществами использования технологии инвентаризации отдельных деревьев и древостоев с использованием смартфона являются портативность, простота использования, а также отсутствие необходимости в глубоких знаниях пользователя в области лесной таксации [24]. К наиболее распространенным приложениям относятся: Trestima, Katam, ForestScanner и Arboreal Forest.

Приложение Trestima разработано в Финляндии и работает на базе операционной системы Android. Для таксации применяются изображения, которые были сделаны на разных локациях лесного участка. Все изображения обрабатываются в облаке Trestima, где по ним рассчитываются такие показатели как диаметры и высоты деревьев, площади поперечных сечений стволов, количество деревьев на 1 га, породный состав, распределение диаметров стволов по ступеням толщины и др. Результаты представляются пользователю в виде отчетов в формате Microsoft Office Excel или XML, которые содержат также сведения о стандартной ошибке и 95% доверительный интервал [24, 25].

Приложение Katam разработано в Швеции и работает на базе операционной системы Android. Пользователь получает информацию о таксационных характеристиках деревьев в результате анализа коротких видеороликов, снятых в лесу. Кроме того, приложение может анализировать изображения и видео, полученные с помощью беспилотного летательного аппарата, для определения высот деревьев [24].

Приложение ForestScanner разработано в Японии. Работает на устройствах Apple iPhone и iPad, оснащенных сенсором LiDAR. ForestScanner позволяет проводить измерения диаметров деревьев и оценивать их пространственное положение. В результате пользователь получает трехмерную модель нижних частей стволов деревьев, на которой отмечены таксационные диаметры [26].

Приложение Arboreal Forest разработано в Швеции. Так же, как и ForestScanner, работает только на устройствах Apple iPhone и iPad, оснащенных сенсором LiDAR. Пользователь может проводить измерения диаметров деревьев на круглых пробных площадях, линейных трансектах, а также пробных площадях произвольного размера. Кроме того, за счет применения встроенного LiDAR и геометрических методов имеется возможность автоматического измерения высот деревьев. После сбора данных приложение обрабатывает их и генерирует отчет с подробной таксационной характеристикой: средние диаметры и высоты, сумма площадей сечений, запас, депонирование углерода. Исходные данные (древесная порода, горизонтальные и вертикальные координаты, диаметр ствола и др.) сохраняются в формате JSON [24].

Использование приложений для смартфонов в целях получения биометрических характеристик деревьев может стать революционным решением в лесной таксации. А. Sandim et al. [24] на основании анализа работы приложений Trestima, Katam и Arboreal Forest отмечают, что точность получаемых данных зависит от характеристик рельефа, породного состава и возраста насаждений, их густоты. В ряде исследований указывается [24, 27, 28], что Arboreal Forest имеет хорошую точность определения таксационных показателей, не уступающую традиционным методам, хотя имеет тенденцию к занижению диаметров крупномерных деревьев.

Технология применения мобильных приложений для таксации деревьев и древостоев находится еще только на начальном пути своего развития, поэтому требуется сопоставление получаемых с их использованием данных с данными измерений, полученными с применением традиционных методов, для выявления возможных пределов ошибок. Для России технология определения таксационных показателей и картирования деревьев с применением смартфона остается не апробированной, а с учетом простоты использования и точности получаемых результатов стоит отдать предпочтение Arboreal Forest, которое разрабатывалось для лесов boreального пояса. Целью исследования являлось изучение возможности использования приложения для смартфона Arboreal Forest для определения такса-

ционных показателей и картирования деревьев на примере старовозрастных аллеиных посадок.

Материалы и методы

Место исследования. Исследование проводилось на территории бывшего Зоотехнического техникума, расположенного в пос. Екимцево Кологривского муниципального округа Костромской обл. (N58.827922, E44.258515, WGS 84). Объект входит в перечень объектов культурного наследия регионального значения Костромской области. В 1890-1900 годы от главного учебного корпуса Низшего сельскохозяйственно-технического училища имени Ф.В. Чижова в направлении с запада на восток была заложена тройная аллея из липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.), ставшая в дальнейшем символом учебного заведения (рис. 1). До закрытия техникума в 1987 году за аллеиными посадками осуществлялся постоянный уход, проводилась замена погибших деревьев. В настоящее время липовые аллеи сформированы перестойными деревьями, большинство из которых находится в неудовлетворительном состоянии, и пней порослью от погибших деревьев. Общая площадь составила 0,39 га.



Рисунок 2. Объект исследования (липовые аллеи бывшего Зоотехнического техникума)

Figure 2. Object of the study (linden alleys of the former Zootechnical College)

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Сбор данных. Сбор данных проводился в июле 2023 года с применением 1) традиционного метода и 2) приложения Arboreal Forest. При ис-

пользовании первого метода каждому дереву присваивался номер и измерялся диаметр ствола на высоте 1,3 м в двух взаимно перпендикулярных направлениях мерной вилкой Haglof Mantax Blue (с точностью до 0,1 см).

Процесс сбора данных с использованием Arboreal Forest (версия 3.24) производился в соответствии с инструкциями разработчика в режиме пробной площади произвольной конфигурации. Использованное мобильное устройство – Apple iPhone Pro 14. Максимальная дальность действия LiDAR составляет 5 м, а потенциальная плотность точек лазерного сканирования составляет 7225 на 1 м² при расстоянии 25 см и 150 точек при расстоянии 250 см [29].

Первым этапом являлось обозначение точки начала отсчета на местности, относительно которой определялось расстояние до деревьев. Для получения данных о диаметрах стволов необходимо подойти к каждому дереву и провести измерение приложением путем наведения камеры смартфона на дерево (на уровне высоты 1,3 м от поверхности почвы) с расстояния 0,3-1,0 м, которое зависит от размеров ствола (с увеличением толщины увеличивается расстояние съемки). Приложение с LiDAR сенсора получает облако точек, выполняется его сегментация с автоматическим распознаванием контура ствола и фиксацией значения диаметра измеряемого дерева (с точностью до 1 мм). Порода дерева вводится в ручном режиме (рис. 2). Координаты деревьев (горизонтальные и вертикальная) определялись автоматически по данным, получаемым со встроенного гироскопа, датчика LiDAR и системы спутниковой навигации. После завершения всех измерений полученные данные сохраняются в JSON файле и при наличии доступа к сети передачи данных импортируются в облачное хранилище.

Обработка данных. Данные из полевого журнала и отчета Arboreal Forest (измерения 283 деревьев) были организованы в таблицы Microsoft Office Excel, средствами которого проводился статистический анализ. При анализе данных значения диаметров и площадей поперечных сечений, полученных по результатам измерений Arboreal Forest,

сравнивались с результатами традиционного метода.

Для оценки сходства и различий между полученными двумя методами значениями таксационных показателей использовались различные метрики качества, выполнялся графический анализ и тестировались статистические гипотезы (о равенстве средних, о соответствии рядов распределения). Анализировались как значения диаметров и площадей поперечных сечений деревьев, так и распределения по ступеням толщины с градацией 4 см.



Рисунок 2. Интерфейс приложения Arboreal Forest в режиме измерения диаметров деревьев
Figure 2. Arboreal Forest application interface in tree diameter measurement mode

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Для оценки соответствия рассчитывались такие метрики, как коэффициент детерминации (R^2), квадратный корень из среднеквадратической ошибки (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE), смещение (Bias):

$$R^2 = \frac{\sum (d_i - \bar{d}_i)^2}{\sum (d_i^{ref} - \bar{d}_i)^2},$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (d_i - d_i^{ref})^2}{n}},$$

$$MAE = \frac{\sum |d_i - d_i^{ref}|}{n},$$

$$Bias = \sum \frac{d_i - d_i^{ref}}{n},$$

где d_i – диаметр, измеренный Arboreal Forest, см; d_i^{ref} – диаметр, измеренный мерной вилкой, см; \bar{d}_i – среднее значение диаметров, измеренных Arboreal Forest, см; n – количество измерений.

Для сравнения средних значений по выборкам применялся парный t-критерий Стьюдента. Сравнение рядов распределения выполнялось по

критерию Хи-квадрат Пирсона. Все статистические выводы сделаны при $p < 0,05$. Обработка числовых данных со статистическим анализом проводилась в Microsoft Office Excel 16.78, графических – в AutoCAD 2023 и Adobe Photoshop 2022 с учетом требований к составлению инвентаризационных планов.

Результаты и обсуждение

Результаты графического анализа представлены на рис. 3 и 4. Наблюдается высокое соответствие между диаметрами и площадями поперечных сечений, полученных в результате измерений, проведенных мерной вилкой и Arboreal Forest (рис. 2). На графиках рассеивания наложены прямые линии зависимости значений, измеренных Arboreal Forest, от полученных с помощью мерной вилки. Высокие значения коэффициентов детерминации (для диаметров $R^2 = 0,99$ и для площадей поперечных сечений $R^2 = 0,98$) указывают на согласованность значений в двух рассматриваемых выборках. Различия в средних значениях диаметров стволов ($t = 0,67$; $p = 0,50$) и площадей поперечных сечений ($t = 0,87$; $p = 0,39$), полученных двумя разными методами, являются статистически незначимыми.

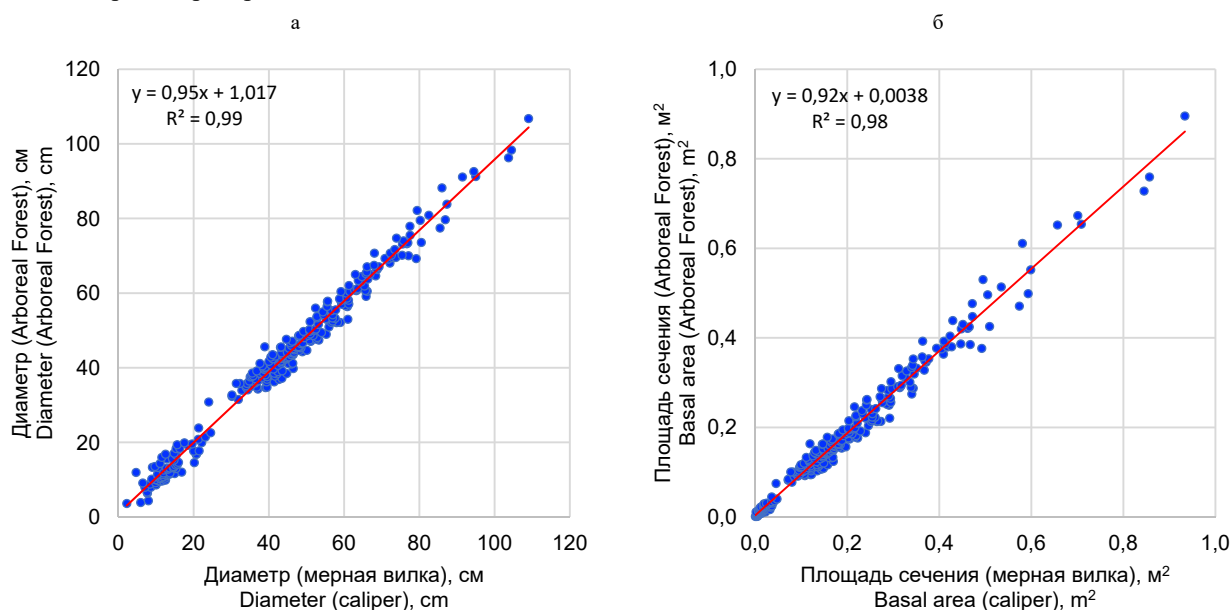


Рисунок 3. Соответствие между таксационными показателями по измерениям мерной вилкой и Arboreal Forest: а) диаметр на высоте груди, б) площадь поперечного сечения на высоте груди

Figure 3. Correspondence between tree indicators measured with a caliper and Arboreal Forest: a) diameter at breast height, b) basal area at breast height

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

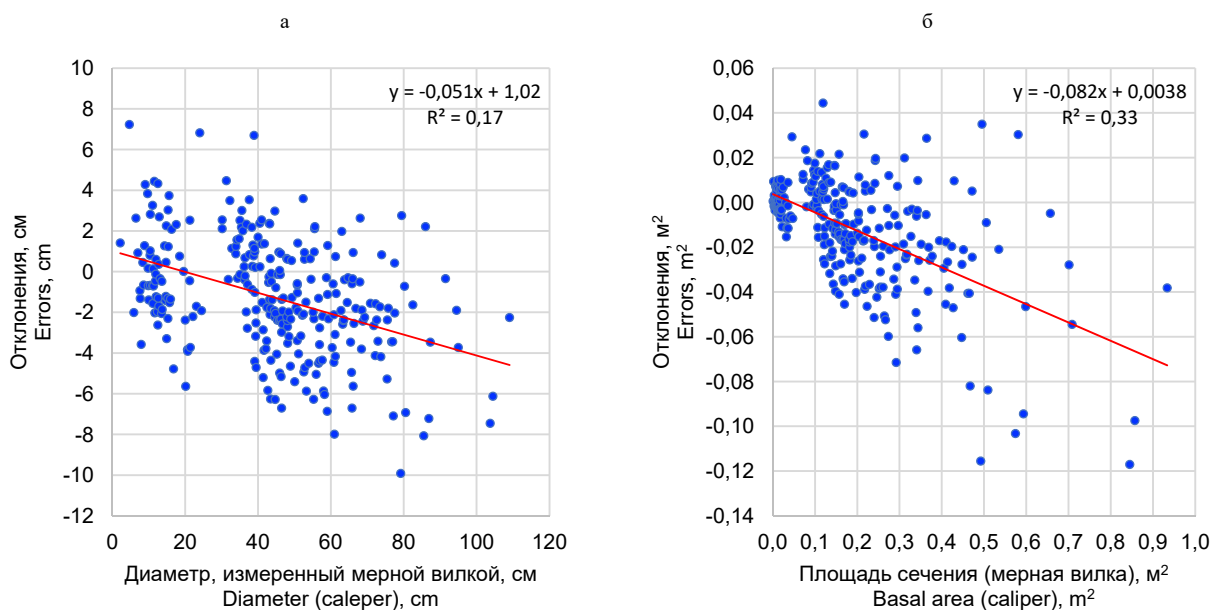


Рисунок 4. Отклонения таксационных показателей, определенных Arboreal Forest, от измеренных мерной вилкой: а) диаметр на высоте груди, б) площадь поперечного сечения на высоте груди
 Figure 4. Deviations of tree indicators determined by Arboreal Forest from those measured with a caliper: а) diameter at breast height, б) basal area at breast height

Источник: собственная композиция автора
 Source: author's composition

Таким образом, Arboreal Forest обеспечивает измерение таксационных показателей с высокой точностью, а отклонения от данных мерной вилки являются незначительными. Метрика RMSE для диаметров составила 3,03 см, для площадей поперечных сечений 0,026 м²; MAE для диаметров составила 2,41 см, для площадей поперечных сечений 0,018 м².

По сравнению с традиционным методом Arboreal Forest имеет тенденцию к занижению диаметров и, как следствие, площадей сечений, особенно для крупномерных деревьев (рис. 3), на что указывают отрицательные коэффициенты угловых коэффициентов линейных трендов. Но в целом эта зависимость является слабовыраженной: для диаметров коэффициент детерминации (R^2) составил 0,17 и для площадей поперечных сечений 0,32. На недооценку диаметров и площадей поперечных сечений приложением Arboreal Forest также указывает метрика Bias, которая для диаметров равна 1,22 см, а для площадей поперечных сечений - 0,012 м².

Отклонение среднеквадратического диаметра, рассчитанного по данным Arboreal Forest

(47,3 см), от данных измерений мерной вилкой (48,8 см) составило -3,1 % (-1,5 см), что соответствует требованиям к точности таксации, предъявляемых лесоустроительной инструкцией (для глазомерно-измерительного метода случайная ошибка $\pm 10\%$). Сумму площадей поперечных сечений деревьев Arboreal Forest занизил на 6,18 %, или 3,28 м².

Структура ряда распределения деревьев по ступеням толщины Arboreal Forest в целом близка ряду распределения, полученному традиционным способом (рис. 5). Значение статистики Хи-квадрат составило 21,29 при $p = 0,36$, следовательно, различия в рассматриваемых рядах распределения статистически незначимы. Для деревьев липы в исследуемых аллеях характерен бимодальный ряд распределения с вершинами в ступенях толщины 12 и 44 см. Левая часть ряда распределения с размахом варьирования диаметров от 2 до 26 см характеризует порослевые деревья, выросшие в результате гибели старовозрастных в последние 35 лет. Вторая часть ряда распределения с размахом варьирования диаметров от 30 до 110 см характери-

зуют высаженные в аллеях деревья в период до 1987 года.

Arboreal Forest незначительно переоценивает количество деревьев в ступенях толщины, близких к центральным. Например, для ступени толщины 12 см число деревьев по данным традиционного метода составило 26, а по данным Arboreal Forest –

29. Для ступени толщины 44 см число деревьев по данным традиционного метода составило 31, а по данным Arboreal Forest – 35. В правой части ряда распределения, характеризующего наиболее толстые деревья, Arboreal Forest имеет тенденцию незначительного занижения количества деревьев.

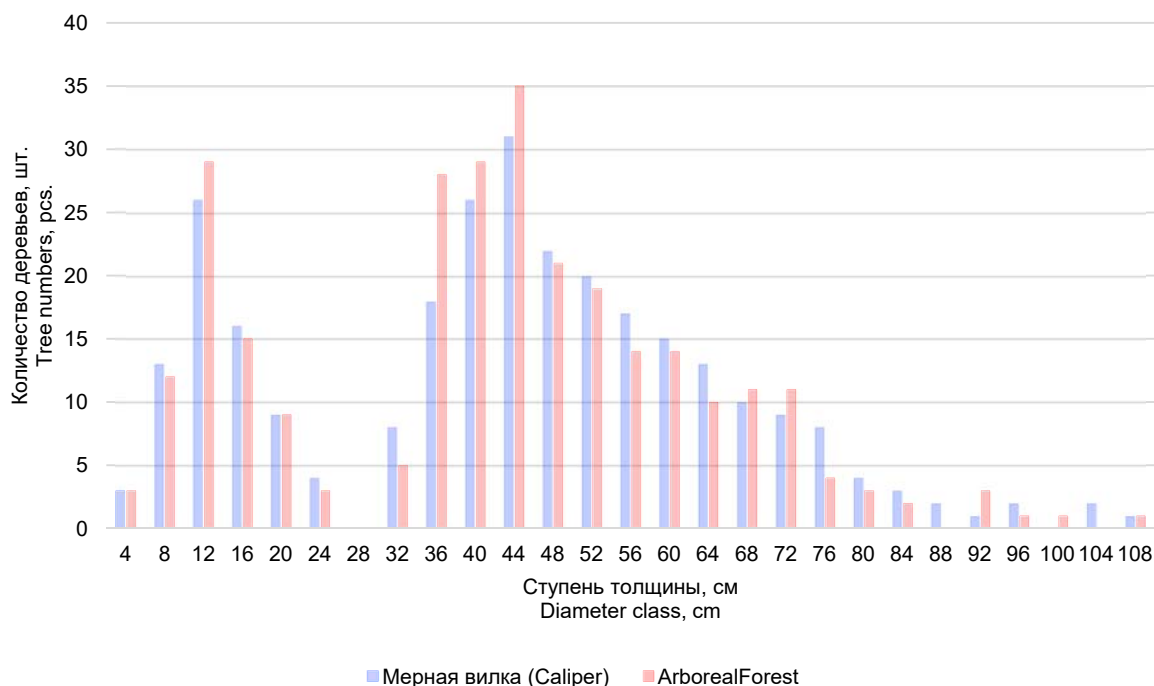


Рисунок 5. Распределения деревьев по ступеням толщины по результатам измерений мерной вилкой и Arboreal Forest

Figure 5. Trees diameter distributions by depth levels according to the results of measurements with a caliper and Arboreal Forest

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

На завершающем этапе по горизонтальным координатам стволов, выгруженным из отчета Arboreal Forest, был составлен опорный план пространственного расположения деревьев липы в аллеиных посадках (рис. 6). Аллея разделена на четыре зоны, отделенных друг от друга и отличающихся числом деревьев в ряду: 1) 9 деревьев (у главного учебного корпуса), 2) 11 деревьев, 3) 17 деревьев, 4) 27 деревьев (у парка). Расстояние между деревьями в ряду составило 3,0 м, между центральными рядами – 12,0 м и между двумя крайними рядами – 3,5 м. В регулярных садово-парковых насаждениях приложение позволяет с хорошей точностью определять шаг посадки между деревь-

ями: коэффициент вариации расстояния между соседними деревьями в ряду в каждой из четырех зон аллеи, а также между крайними рядами не превышает 5 %. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности использования Arboreal Forest при составлении планов подеревной инвентаризации зеленых насаждений населенных пунктов, а также при создании историко-опорных планов объектов озеленения, имеющих историческую и культурную ценность.

Последним критерием, по которому проводилось сопоставление традиционной методики и Arboreal Forest, являлось время, затраченное на проведение инвентаризационных работ одним че-

ловеком. На подеревную инвентаризацию, проведенную Arboreal Forest, было затрачено 75 минут, а традиционным способом – 148 минут. Использо-

вание приложения для смартфона позволило выполнить работы быстрее в два раза с незначительным снижением точности полученных результатов.

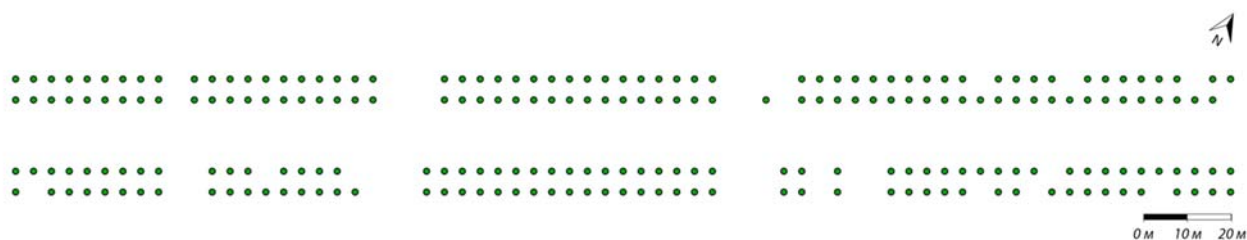


Рисунок 6. Опорный план пространственного расположения деревьев в аллейных посадках

Figure 6. Basic plan for the spatial arrangement of trees in alley

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

Первый опыт использования в России приложения для смартфона Arboreal Forest показал высокую точность получаемых таксационных показателей деревьев, и подтвердил возможность в два раза быстрее собирать данные полевых измерений перечислительным методом по сравнению с традиционной методикой. По сравнению с основными приложениями-конкурентами, использующими для измерений сенсор LiDAR смартфона, стоит отдать предпочтение Arboreal Forest. При этом стоимость смартфона с приложением будет в 2-3 раза ниже, чем приобретение современной электронной мерной вилки.

Кроме того, были выявлены недостатки использования Arboreal Forest в условиях России. 1) Приложение является платным (месячная подписка 2050 руб., недельная – 649 руб.), а в настоящее время имеются значительные ограничения на совершение покупок в AppStore российскими пользователями. 2) Для условий России представлен ограниченный перечень видов деревьев (сосна обыкновенная, ель обыкновенная, береза повислая, осина, ольха серая, береза пушистая, ольха черная, липа мелколистная), который не охватывает всего многообразия породного состава лесов страны. 3) При количестве измеряемых деревьев более 200 может наблюдаться аварийная остановка приложения (для используемой в исследовании версии). 4) Геопривязанные данные о таксационных показателях обследованных участков хранятся на серверах, расположенных за рубежом, а в условиях санкци-

онных ограничений они могут стать недоступными для пользователей из России. 5) Заложенные в приложение лесотаксационные нормативы не являются адаптированными к многообразным лесорастительным условиям нашей страны.

В России существует высокая потребность в актуальной информации о количественных и качественных характеристиках насаждений на землях лесного фонда и объектах озеленения, что требует разработки новых методов таксации для повышения скорости сбора, обработки и получения итоговых данных [30]. Создание российского приложения для таксации с использованием аппаратных и программных возможностей современных смартфонов и планшетов возможно при наличии соответствующего запроса со стороны бизнес-структур, профильных НИИ и ВУЗов, органов исполнительной власти в области лесного хозяйства. К потенциальным потребителям такого продукта относятся лесопользователи, сотрудники организаций, осуществляющих работы по таксации лесов и инвентаризации зеленых насаждений, ландшафтные архитекторы, научные работники.

При разработке отечественного приложения, аналогичного по набору базовых функций Arboreal Forest, необходимо устранить выявленных выше недостатков. Например, использование методов глубокого обучения позволяет автоматизировать процесс определения древесных пород по коре. Современные алгоритмы показывают точность до 90 % [31, 32]. Также в приложение должны быть

заложены региональные нормативы для вычисления объемов стволов, запасов и биомассы древостоев, выхода сортиментов, так как в разных почвенно-климатических условиях взаимосвязи между отдельными таксационными показателями проявляются по-своему [33].

Использование сенсора LiDAR в смартфонах и планшетах показывает хорошие результаты при решении многих задач [19, 20, 21, 34, 35], но так как подобные Arboreal Forest приложения находятся на начальном этапе своего развития, то требуется дальнейшая проверка получаемых результатов в лесах России разных лесорастительных зон и отличающихся происхождением, возрастом, густотой, типом леса и др. В перспективе этот метод может стать эффективной альтернативой традиционным методам проведения перечислительной таксации и инвентаризации зеленых насаждений.

Заключение

Впервые в России апробирована технология таксации и картирования деревьев с использованием смартфона, оснащенного сенсором LiDAR, на примере шведского приложения Arboreal Forest. Точность полученных результатов соответствует требованиям к таксации, обозначенным в лесоустроительной инструкции. Весь комплекс работ может быть выполнен одним человеком при временных затратах на проведение измерений в два раза меньше, чем по традиционной методике, и с

оперативным получением результатов непосредственно в полевых условиях в электронном формате. Для объекта исследования выявлено, что отклонение среднеквадратического диаметра, рассчитанного по данным Arboreal Forest (47,3 см), от данных измерений мерной вилкой (48,8 см) составило -3,1 % (-1,5 см), а суммы площадей поперечных сечений -6,18 % или -3,28 м². Также по сравнению с традиционным методом Arboreal Forest имеет тенденцию к занижению диаметров стволов (особенно для крупномерных деревьев) и, как следствие, площадей поперечных сечений. Структура ряда распределения деревьев по ступеням толщины Arboreal Forest в целом близка ряду распределения, полученному традиционным способом.

В перспективе приложения для смартфонов могут стать эффективной альтернативой традиционным методам проведения перечислительной таксации и инвентаризации зеленых насаждений, но, учитывая разнообразие лесорастительных условий, породного состава лесов России, требуется разработка приложения, адаптированного к таким условиям.

Список литературы

1. Васильева Е.А., Николаева О.Н., Трубина Л.К. Опыт подеревной инвентаризации и картографирования городских зеленых насаждений общего пользования. ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021; 27(3): 274-284. DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-274-284>.
2. Муллаярова П.И. О необходимости совершенствования методики инвентаризации городских зеленых насаждений. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017; 4(2): 180-185. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29197832>.
3. Lebedev A.V. Changes in the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in an urban environment in European Russia since 1862. Journal of Forestry Research. 2023; 34: 1279-1287. DOI: <https://doi.org/110.1007/s11676-022-01569-z>.
4. Черданцева О.А., Жукова Е.А. О важности создания единой методики инвентаризации зеленых насаждений исторических садов в Санкт-Петербурге. Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2018; 222: 6-22. DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.6-22>.
5. Муллаярова П.И. О модернизации существующей методики инвентаризации зеленых насаждений с учетом современных достижений аэрокосмических исследований и ГИС-технологий. Вестник СГУГиТ

(Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2018; 23(1): 132-141. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32834054>.

6. Злобин Д.В. Инвентаризация городских зеленых насаждений с использованием цифровых технологий. Экология: вчера, сегодня, завтра: Материалы всероссийской научно-практической конференции, Грозный, 30 октября 2019 года. Грозный: Общество с ограниченной ответственностью "АЛЕФ", 2019: 206-211. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41421672>.

7. Трубина Л.К., Николаева О.Н., Муллаярова П.И., Баранова Е.И. Инвентаризация городских зеленых насаждений средствами ГИС. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2017; 22(3): 107-118. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30037544>.

8. Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sensing of Environment*. 2014; 148: 70–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.018>.

9. Кабонен А.В., Иванова Н.В. Оценка биометрических характеристик деревьев по данным наземного lidar и разносезонной аэрофотосъемки в искусственных насаждениях. *Nature Conservation Research*. Заповедная наука. 2023; 8(1): 64-83. DOI: <https://doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.

10. 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 им. В.Р. Филиппова. 2023; 1(70): 134-140. DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.70.1.016>.

11. Proudman A., Ramezani M., Digumarti S.T., Chebrolu N., Fallon M. Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR. *Robotics and Autonomous Systems*. 2022; 157: 104240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104240>.

12. Ritter T., Schwarz M., Tockner A., Leisch F., Nothdurft A. Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. *Forests*. 2017; 8: 265. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8080265>.

13. Gollob C., Ritter T., Wassermann C., Nothdurft A. Influence of Scanner Position and Plot Size on the Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sens*. 2019; 11: 1602. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11131602>

14. Eitel J.U.H., Vierling L.A., Magney T.S. A lightweight, low cost autonomously operating terrestrial laser scanner for quantifying and monitoring ecosystem structural dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2013; 180: 86–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.012>.

15. Bunting P., Armston J., Lucas R.M., Clewley D. Sorted pulse data (SPD) library. Part I: A generic file format for LiDAR data from pulsed laser systems in terrestrial environments. *Computers and Geosciences*. 2013; 56: 197–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.019>.

16. Costantino D., Vozza 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; 5: 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>.

17. Tomašík J., Saloň Š., Tunák D., Chudý F., Kardoš M. Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2017; 141: 109-117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.015>.

18. Hyypä J., Virtanen J.-P., Jaakkola A., Yu X., Hyypä H., Liang X. Feasibility of Google Tango and Kinect for Crowdsourcing Forestry Information. *Forests*. 2018; 9(1): 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9010006>.

19. Spreafico A., Chiabrando F., Teppati Losè L., Giulio Tonolo F. The iPad Pro Built-in Lidar Sensor: 3D Rapid Mapping Tests and Quality Assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLIII-B1-2021. 2021; 43: 63–69. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>.

20. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports*. 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.

21. Vogt M., Rips A., Emmelmann C. Comparison of iPad Pro®'s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. *Technologies*. 2021; 9(2): 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9020025>.
22. Gollob C., Ritter T., Kraßnitzer R., Tockner A., Nothdurft A. Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing*. 2021; 13: 3129. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163129>.
23. Woo H., Kim I., Choi B. Computer Vision Techniques in Forest Inventory Assessment: Improving Accuracy of Tree Diameter Measurement Using Smartphone Camera and Photogrammetry. *Sensors and Materials*. 2021; 33(11): 3835–3845. DOI: <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3605>.
24. Sandim A., Amaro M., Silva M.E., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Lousada J.L., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests*. 2023; 14: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14081553>.
25. Pitkänen T.P., Rätty M., Hyvönen P., Korhonen K.T., Vauhkonen J. Using auxiliary data to rationalize smartphone-based pre-harvest forest mensuration. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2022; 95(2): 247–260. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab039>.
26. Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution*. 2023; 14: 1603–1609. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>.
27. Pace R., Masini E., Giuliarelli D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., De Angelis P., Calfapietra C. Tree Measurements in the Urban Environment: Insights from Traditional and Digital Field Instruments to Smartphone Applications. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF)*. 2022; 48 (2): 113-123. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>.
28. Lindberg L. Forest data acquisition with the application Arboreal Forest: A study about measurement precision, accuracy and efficiency. Umeå, 2020: 54. Режим доступа: https://stud.epsilon.slu.se/15456/7/lindberg_1_200331.pdf
29. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Sci Rep*. 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.
30. Роувинен Т. Трестима – цифровые фотографии для таксации леса. *Сибирский лесной журнал*. 2014; 5: 69-76. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22740162>.
31. Carpentier M., Giguère P., Gaudreault J. Tree Species Identification from Bark Images Using Convolutional Neural Networks. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Madrid, Spain. 2018; 1075-1081. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593514>.
32. Robert M., Dallaire P., Giguère P. Tree bark re-identification using a deep-learning feature descriptor. *17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV)*, Ottawa, ON, Canada. 2020; 25-32. DOI: <https://doi.org/10.1109/CRV50864.2020.00012>.
33. Шевелев С.Л. Состояние и перспективы совершенствования нормативной базы таксации товарной структуры древостоев Сибири. *Лесная таксация и лесоустройство*. 2008; 1(39): 101-105. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21196651>.
34. Kottner S., Thali M.J., Gascho D. Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. *Forensic Imaging*. 2023; 32: 200535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535>.
35. Monsalve A., Yager E.M., Tonina D. Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. *Journal of Ecohydraulics*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705357.2023.2204087>.

References

1. Vasileva E.A., Nikolaeva O.N., Trubina L.K. Opyt poderevnoy inventarizacii i kartografirovaniya gorodskih zelenyh nasazhdenij obshchego pol'zovaniya. [A case-study of tree inventory and mapping of public green spaces]. InterCarto. InterGIS. 2021; 27(3): 274-284. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-3-27-274-284>.
2. Mullaiarova P.I. O neobходимosti sovershenstvovaniya metodiki inventarizacii gorodskih zelenyh nasazhdenij. [On the necessity of improving of technique for urban green space inventory]. Interekspo Geo-Sibir. 2017; 4(2): 180-185. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29197832>.
3. Lebedev A.V. Changes in the growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands in an urban environment in European Russia since 1862. Journal of Forestry Research. 2023; 34: 1279-1287. DOI: <https://doi.org/110.1007/s11676-022-01569-z>.
4. Cherdanceva O.A., Zhukova E.A. O vazhnosti sozdaniya edinoj metodiki inventarizacii zelenyh nasazhdenij istoricheskikh sadov v Sankt-Peterburge. [On the importance of creating the common methodology for green spaces inventory of historical gardens in St. Petersburg]. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii. 2018; 222: 6-22. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.21266/2079-4304.2018.222.6-22>.
5. Mullayarova P.I. O modernizacii sushchestvuyushchej metodiki inventarizacii zelenyh nasazhdenij s uchetom sovremennyh dostizhenij aerokosmicheskikh issledovaniy i GIS-tekhnologij. [On modernization of current methods of urban green spaces inventory taking into account the achievements of remote sensing and geographic information system]. Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij) = Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT). 2018; 23(1):132-141. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32834054>.
6. Zlobin D.V. Inventarizaciya gorodskih zelenyh nasazhdenij s ispol'zovaniem cifrovyyh tekhnologij. [Inventory of city green plants using digital technologies]. In: Ekologiya: vchera, segodnya, zavtra: Materialy vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Groznyj, 30 oktyabrya 2019 goda. Groznyj, Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "ALEF". 2019: 206-211. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41421672>.
7. Trubina L.K., Nikolaeva O.N., Mullayarova P.I., Baranova E.I. Inventarizaciya gorodskih zelenyh nasazhdenij sredstvami GIS. [GIS-based inventory of urban green spaces]. Vestnik SGUGiT (Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologij) = Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT). 2017; 22(3): 107-118. (in Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30037544>.
8. Alonzo M., Bookhagen B., Roberts D.A. Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. Remote Sensing of Environment. 2014; 148: 70–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.018>.
9. Kabonen A.V., Ivanova N.V. Ocenka biometricheskikh harakteristik derev'ev po dannym nazemnogo lidar i raznosezonnogo aerofotos'emki v iskusstvennyh nasazhdeniyah. [Tree attribute assessment in urban greenwood using ground-based lidar and multiseasonal aerial photography data]. Nature Conservation Research. 2023; 8(1): 64–83. (in Russ.). DOI: <https://dx.doi.org/10.24189/ncr.2023.005>.
10. 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 osnovnyh nasazhdeniyah. [Study of the possibility of using a ground-based mobile laser scanner to determine the height and diameter of trees in pine plantations]. Vestnik Buryatskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii im. V.R. Filippova. 2023; 1(70): 134-140. (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34655/bgsha.2023.70.1.016>.
11. Proudman A., Ramezani M., Digumarti S.T., Chebrolo N., Fallon M. Towards real-time forest inventory using handheld LiDAR. Robotics and Autonomous Systems. 2022; 157: 104240. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104240>.
12. Ritter T., Schwarz M., Tockner A., Leisch F., Nothdurft A. Automatic mapping of forest stands based on three-dimensional point clouds derived from terrestrial laser-scanning. Forests. 2017; 8: 265. DOI: <https://doi.org/10.3390/f8080265>.
13. Gollob C., Ritter T., Wassermann C., Nothdurft A. Influence of Scanner Position and Plot Size on the

Accuracy of Tree Detection and Diameter Estimation Using Terrestrial Laser Scanning on Forest Inventory Plots. *Remote Sens.* 2019; 11: 1602. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11131602>

14. Eitel J.U.H., Vierling L.A., Magney T.S. A lightweight, low cost autonomously operating terrestrial laser scanner for quantifying and monitoring ecosystem structural dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2013; 180: 86–96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.05.012>.

15. Bunting P., Armston J., Lucas R.M., Clewley D. Sorted pulse data (SPD) library. Part I: A generic file format for LiDAR data from pulsed laser systems in terrestrial environments. *Computers and Geosciences.* 2013; 56: 197–206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.01.019>.

16. Costantino D., Vozza 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; 5: 63. DOI: <https://doi.org/10.3390/asi5040063>.

17. Tomašík J., Saloň Š., Tunák D., Chudý F., Kardoš M. Tango in forests – An initial experience of the use of the new Google technology in connection with forest inventory tasks. *Computers and Electronics in Agriculture.* 2017; 141: 109–117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.015>.

18. Hyypä J., Virtanen J.-P., Jaakkola A., Yu X., Hyypä H., Liang X. Feasibility of Google Tango and Kinect for Crowdsourcing Forestry Information. *Forests.* 2018; 9(1): 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/f9010006>.

19. Spreafico A., Chiabrando F., Teppati Losè L., Giulio Tonolo F. The iPad Pro Built-in Lidar Sensor: 3D Rapid Mapping Tests and Quality Assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLIII-B1-2021.* 2021; 43: 63–69. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-63-2021>.

20. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences. *Scientific Reports.* 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.

21. Vogt M., Rips A., Emmelmann C. Comparison of iPad Pro[®]'s LiDAR and TrueDepth Capabilities with an Industrial 3D Scanning Solution. *Technologies.* 2021; 9(2): 25. DOI: <https://doi.org/10.3390/technologies9020025>.

22. Gollob C., Ritter T., Kraßnitzer R., Tockner A., Nothdurft A. Measurement of Forest Inventory Parameters with Apple iPad Pro and Integrated LiDAR Technology. *Remote Sensing.* 2021; 13: 3129. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163129>.

23. Woo H., Kim I., Choi B. Computer Vision Techniques in Forest Inventory Assessment: Improving Accuracy of Tree Diameter Measurement Using Smartphone Camera and Photogrammetry. *Sensors and Materials.* 2021; 33(11): 3835–3845. DOI: <https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3605>.

24. Sandim A., Amaro M., Silva M.E., Cunha J., Morais S., Marques A., Ferreira A., Lousada J.L., Fonseca T. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests.* 2023; 14: 1553. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14081553>.

25. Pitkänen T.P., Rätty M., Hyvönen P., Korhonen K.T., Vauhkonen J. Using auxiliary data to rationalize smartphone-based pre-harvest forest mensuration. *Forestry: An International Journal of Forest Research.* 2022; 95(2): 247–260. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpab039>.

26. Tatsumi S., Yamaguchi K., Furuya N. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution.* 2023; 14: 1603–1609. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>.

27. Pace R., Masini E., Giuliarelli D., Biagiola L., Tomao A., Guidolotti G., Agrimi M., Portoghesi L., De Angelis P., Calfapietra C. Tree Measurements in the Urban Environment: Insights from Traditional and Digital Field Instruments to Smartphone Applications. *Arboriculture & Urban Forestry (AUF).* 2022; 48 (2): 113–123. DOI: <https://doi.org/10.48044/jauf.2022.009>.

28. Lindberg L. Forest data acquisition with the application Arboreal Forest: A study about measurement precision, accuracy and efficiency. Umeå, 2020: 54. (in Sweden). URL: https://stud.epsilon.slu.se/15456/7/lindberg_l_200331.pdf

29. Luetzenburg G., Kroon A., Bjørk A.A. Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in

Geosciences. Sci Rep. 2021; 11: 22221. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9>.

30. Rouvinen T. Trestima - цифровые фотографии для таксации леса. [Trestima - digital photographs for forest inventory]. Siberian Journal of Forest Science. 2014; 5: 69-76. (in Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22740162>.

31. Carpentier M., Giguère P., Gaudreault J. Tree Species Identification from Bark Images Using Convolutional Neural Networks. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Madrid, Spain. 2018; 1075-1081. DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593514>.

32. Robert M., Dallaire P., Giguère P. Tree bark re-identification using a deep-learning feature descriptor. 17th Conference on Computer and Robot Vision (CRV), Ottawa, ON, Canada. 2020; 25-32. DOI: <https://doi.org/10.1109/CRV50864.2020.00012>.

33. Shevelev S.L. Sostoyanie i perspektivy sovershenstvovaniya normativnoj bazy taksacii tovarnoj struktury drevostoev sibirii [State and perspectives of the normative base improvement for inventorying the merchantable structure of Siberian tree stands]. Lesnaya taksaciya i lesoustrojstvo; 2008; 1(39): 101-105. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21196651>.

34. Kottner S., Thali M.J., Gascho D. Using the iPhone's LiDAR technology to capture 3D forensic data at crime and crash scenes. Forensic Imaging. 2023; 32: 200535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fri.2023.200535>.

35. Monsalve A., Yager E.M., Tonina D. Evaluating Apple iPhone LiDAR measurements of topography and roughness elements in coarse bedded streams. Journal of Ecohydraulics. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/24705357.2023.2204087>.

Сведения об авторе

✉ *Лебедев Александр Вячеславович* – кандидат с.-х. наук, доцент кафедры землеустройства и лесоводства, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», ул. Тимирязевская, 49, г. Москва, Российская Федерация, 127434; научный сотрудник, ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кологривский лес» имени М.Г. Сеницына», ул. Некрасова, 48, г. Кологрив, Костромская обл., Российская Федерация, 157440, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru

Information about the author

✉ *Aleksandr V. Lebedev* – Cand. Sci. (Agric.), Associate Professor of the Department of Land Organization and Forestry, *Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya str., 49, Moscow city, Russian Federation, 127434; Researcher, Kologrivsky Forest Nature Reserve, Nekrasova st., 48, Kologriv town, Kostroma region, Russian Federation, 157440*, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8939-942X>, e-mail: alebedev@rgau-msha.ru

✉ – Для контактов | Corresponding author