

А.А. Филатов, А.С. Алексеев, М.О. Гурьянов, А.С. Голубев,
А.П. Митченко

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ КРУГЛЫХ ЛЕСОМАТЕРИАЛОВ В ШТАБЕЛЯХ

Введение. Благодаря постоянному развитию и совершенствованию технических средств появляются новые методы сбора и обработки данных. Это относится, в частности, к возможности применения беспилотных летательных аппаратов для учета лесоматериалов на складах.

В сфере лесного хозяйства сбор данных происходит несколькими способами. Их можно разделить на традиционные и инновационные. К традиционным относится ручной метод, заключающийся в выезде специалистов на склад хранения древесины с последующим инструментальным обмером штабелей. Инновационные методы подразумевают использование современного оборудования, позволяющего производить бесконтактное определение размеров и объемов.



Рис. 1. Классификация методов измерения объема круглых лесоматериалов по способу взаимодействия с объектом при измерении [Беляев и др., 2023]

Fig. 1. Methods of roundwood measurements by the type of contact with measured object [Belyaev et al., 2023]

Один из примеров более подробной классификации методов определения объемов лесоматериалов по способу взаимодействия с объектом в процессе измерения приведен на рис. 1.

Основным методом определения объема круглых лесоматериалов в Российской Федерации является групповой (геометрический)¹. При этом объем штабеля определяется преимущественно по правилу «полного ящика», подразумевающему, что вместо измерения объема штабеля неправильной формы, он условно принимается за прямоугольный параллелепипед (рис. 2). В этом случае складочный объем штабеля, включающий в себя объемы древесины, коры и пустот между лесоматериалами, определяется путем перемножения высоты, ширины и длины штабеля, с последующим переводом его в плотный объем, уже без учета коры и пустот, посредством умножения на коэффициент полноты [Митченко, 2022; Моисеев, 1970; Тюрин и др., 2006].

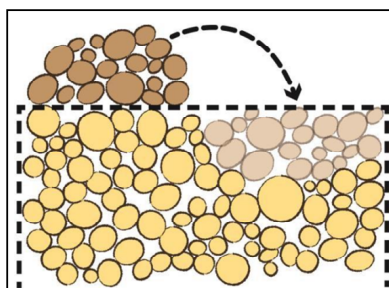


Рис. 2. Метод «полного ящика» при определении объемов штабелей круглых лесоматериалов (цит. по: [Курицын, 2018])

Fig. 2. The «full box» method for determining the volume of roundwood stacks (cited by [Kuricyn, 2018])

Указанный, относящийся к традиционным, метод измерения предполагает использование электронных тахеометров (импульсный метод) или мерных лент, рулонок, линеек, мерных крюков. Измерение линий лентой (рулеткой) сопровождается ошибками случайного характера, происходящими от неодинакового натяжения ленты, изменения температуры, невозможности установить шпильки (метки) точно в створе ленты, неровностей почвы и т. п. Относительная ошибка при измерении линии лентой колеб-

¹ ГОСТ 32714–2014 Лесоматериалы. Термины и определения. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/57821/>

лется от 0,2% в благоприятных условиях до 0,5% в неблагоприятных. Также к недостаткам традиционных методов измерений следует отнести возникающую в отдельных случаях необходимость нахождения исполнителей работ одновременно и на верху штабеля, и у его основания, что уже само по себе небезопасно. Данную проблему отчасти решает использование телескопических линеек, но сложность в оценке вертикальности положения линейки и соответствия ее нулевой отметки верхней части штабеля при нахождении измерителя у его основания, без контроля со стороны, тоже может становиться причиной возникновения погрешностей измерений.

Помимо вышеперечисленного, дополнительные сложности и препятствия создают захламленность приштабельных территорий, их труднодоступность, а в зимний период – еще и наличие снеготаносов. Особую трудность при измерении традиционным методом представляют штабеля, закрытые с двух сторон. В этом случае выполнять замеры высот вплотную к штабелю, как того требует методика, становится практически невозможно. По этой же причине весьма непросто измерять высоту через равные промежутки расстояний (секции), как того требует ГОСТ 2292–88 «Лесоматериалы круглые. Маркировка, сортировка, транспортирование, методы измерения и приемка»².

Говоря о переходе от складочного объема штабелей к плотному, необходимо отметить, что применение с этой целью метода диагоналей в рамках традиционных инструментальных способов также сопряжено с рядом сложностей. Так, диагонали могут быть безопасно и точно измерены только в нижнем слое штабеля – в пределах высоты вытянутой руки человека. На штабелях, которые имеют большую высоту, измерить диагонали и торцы по всей плоскости штабеля невозможно или опасно. Использование коэффициентов полндревесности, полученных из нижней части штабеля, может привести к ошибкам, поскольку разные части штабеля могут состоять из сортиментов разных диапазонов толщин с различной плотностью укладки: нижние бревна штабелей более плотно прилегают друг к другу под тяжестью бревен, лежащих выше.

Для устранения перечисленных выше сложностей в определении объемов и коэффициентов полндревесности штабелей круглых лесоматериалов могут быть использованы дистанционные методы, основными из которых являются:

а) Фотографический, основанный на цифровой фотограмметрии и предусматривающий измерение изображения штабеля и применение 2D-

² «Лесоматериалы круглые. Маркировка, сортировка, транспортирование, методы измерения и приемка». Москва, МКС 79.040. ОКСТУ 5307–5309. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901711463>

модели его торца. Масштаб модели при этом определяется с помощью эталона или измерения расстояния дополнительными датчиками. Складочный объем штабеля при фотографическом методе находится перемножением определенной по снимку площади торцевой поверхности на длину лесоматериалов. Коэффициент полндревесности определяется методом диагоналей или путем деления суммы площадей торцов лесоматериалов на всю площадь торца штабеля. Фотографический метод, кроме плоскостного моделирования, может применяться для подсчета количества лесоматериалов, а также для определения многих вспомогательных и производных величин [Афонин, 2022]. Необходимо отметить, что, в отличие от 3D-моделирования, плоскостное менее требовательно к вычислительным устройствам и скорости связи, поэтому часто используется в полевых условиях;

б) Электронно-оптический, при котором геометрическое определение объема лесоматериалов проводят с применением электронно-оптических средств [Моисеев, 1970; Афонин, 2022]³.

Инновационным на настоящий момент времени способом ведения мониторинга, учета и анализа леса является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Аэросъемка с промышленных дронов может охватить достаточно большую территорию, а возможность низкого полета и осмотра мест «закрытых штабелей» позволяет проводить исследования более качественно и детально.

Материалы и методика исследования. В рамках предлагаемого исследования был проведен анализ точности в определении размеров и объемов штабелей круглых лесоматериалов с применением БПЛА.

Для сбора данных были использованы сверхмалые БПЛА массой до 30 кг [Шаталов, 2016; Зубричев, 2019]. Съемка выполнялась в автоматическом (полет по заданному маршруту) и ручном режимах с перекрытием между кадрами не менее 80% в июле, августе и декабре 2022 г. квадрокоптерами DJI Phantom 4 PRO, Mavic Air2s и Mavic Air2, оснащенными цифровыми RGB-камерами. Высота полета во время съемки штабелей не превышала 50 м, что позволило получить снимки высокого качества. Технические характеристики использованных устройств приведены в табл. 1.

³ Распоряжение Правительства РФ от 11.02.2021 № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» // СПС «КонсультантПлюс».

Таблица 1

Технические характеристики устройств, использованных для сбора данных**Technical characteristics of the devices used for data collection**

Характеристики	DJI Phantom 4 PRO V1.0 с одностатотным геодезическим приемником Emlid Reach M+	Квадрокоптер DJI Mavic Air 2
Масса, г	1388	570
Максимальная скорость в 3 режимах	Режим S: 72 км/ч	Режим S: 69 км/ч
	Режим A: 58 км/ч	Режим A: 55 км/ч
	Режим P: 50 км/ч	Режим P: 48 км/ч
Максимальная высота полета	5000 м	5000 м
Максимальная скорость ветра	до 15 м/с 29–38 км/ч	до 15 м/с 29–38 км/ч
Максимальное время полета	Около 30 минут	34 минуты
Спутниковые системы позиционирования	GPS/ГЛОНАСС	GPS/ГЛОНАСС
Емкость аккумулятора, мАч	5870	5200
Напряжение, В	15,2	11,55
Матрица, камера	1” CMOS Число эффективных пикселей: 20 млн	2 дюйма CMOS Число эффективных пикселей: 48 Мп и 12 Мп
Объектив	Угол обзора: 84° Эквивалент формата 24мм Диафрагма: f/2.8–11 Фокус: от 1 м до ∞	Угол обзора: 84° Эквивалент формата 24 мм Диафрагма: f/2,8 Фокус: от 1 м до ∞
Диапазон рабочих температур	0...+40 °С	–10...40 °С
Передача видео	на 7 км (два канала) 4K/60 кадров/с	1080p: 10 км 4K/60 кадров/с
Распознавание препятствий, датчики	Спереди, сзади, по бокам: 3 штуки	Спереди, сзади, по бокам, сверху, снизу: 5 шт.
Максимальное расстояние полета, км	14	18,5

Дальнейшая стереофотограмметрическая обработка полученных изображений проводилась в специализированном программном обеспечении (ПО) (Agisoft Metashape Professional v.2.0.0, https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf), с помощью которого проводились оцифровка геометрии штабеля и создание его трехмерной модели, пример которой приведен на рис. 3, по следующим параметрам:

- Замерам оснований штабелей с двух сторон с учетом пустот, прокладок, особенностей укладки и микрорельефа;
- Замерам высот штабелей с двух сторон с учетом особенностей укладки и наличия пустот.

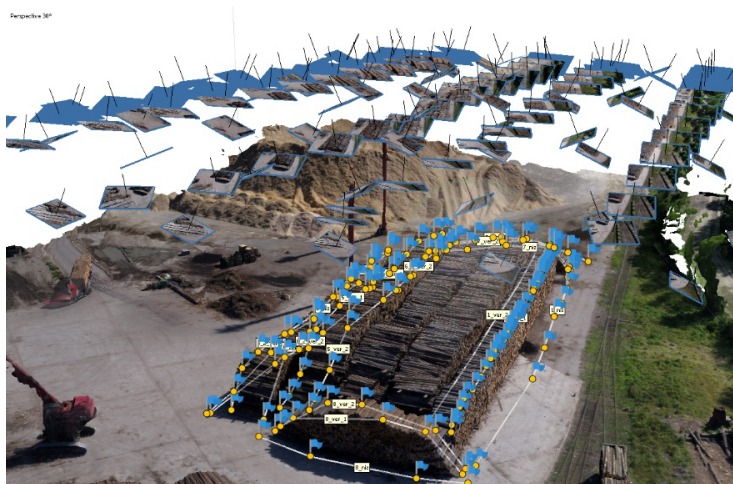


Рис. 3. Цифровая 3D модель штабеля с разрешением 5см/пикс

Fig. 3. Digital 3D model of the stack with a resolution of 5cm/pixels

Для оценки точности полученных данных были использованы результаты обмера штабелей с применением традиционных инструментальных технологий, включающих в себя обмер штабелей с применением тахеометров и мерных шестов с последующим вычислением складочных объемов методом полного ящика в соответствии со стандартами ГОСТ 32594-2013 «Лесоматериалы круглые. Методы измерений»⁴ и ОСТ 1343-79Е «Лесоматериалы круглые. Методы измерений».

⁴ ГОСТ 32594-2013 Лесоматериалы круглые. Методы измерений. URL: docs.cntd.ru/document/1200108364

териалы круглые. Геометрический метод определения объема и оценка качества лесоматериалов» [Митченко, 2022]⁵.

Всего в рамках предлагаемого исследования было обмерено 33 штабелей круглых лесоматериалов средним объемом 1400 м³.

Результаты исследования и обсуждение. Еще на полевом этапе было выявлено существенное расхождение во времени, требующемся на обмер штабелей традиционным инструментальным методом и с применением БПЛА. Инновационный подход позволяет существенно сократить трудозатраты за счет высокой степени автоматизации процесса сбора и обработки данных.

Еще одним преимуществом применения БПЛА является объем собираемых данных, выражающийся в большем числе получаемых замеров. Так, по профилю высот, получаемому в результате обработки снимков, могут быть определены высоты с шагом 10 см. Число инструментальных замеров высот с использованием тахеометров и мерных шестов почти на порядок меньше, что является причиной меньшей детальности профиля высот. При этом (рис. 4), данные, полученные с применением обоих рассмотренных методов, практически не различаются между собой.

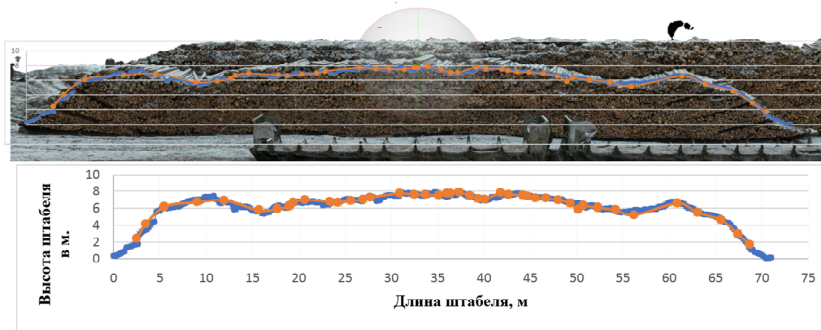


Рис. 4. Сравнение профиля высот штабеля, полученного с помощью тахеометрического хода и съемки с БПЛА

Fig. 4. Comparison of the stack height profile obtained using a total station and UAV survey

⁵ «Электронный фонд актуальных правовых и нормативно-технических документов» / Межгосударственный стандарт лесоматериалы круглые. Методы измерений. ГОСТ 32594–2013, МКС 79.040 (Дата введения: 2015-01-01). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108364>

Примечание. На графиках оранжевым цветом отмечен профиль высот, построенный по данным тахеометрического хода, синим – по результатам обработки снимков, полученных с БПЛА

В дальнейшем, для оценки точности полученных данных, был проведен их сравнительный анализ. С этой целью были рассчитаны расхождения в величинах показателей штабелей, определенных с применением БПЛА и на основании инструментальных замеров, как [Никифорчин, 2013]:

$$P_i = \frac{T_i - T_{\text{ист}}}{T_{\text{ист}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где T_i – значение показателя (складочный объем, средняя высота или длина штабеля i), полученное с применением БПЛА; $T_{\text{ист}}$ – принятое за истинное значение, полученное в результате непосредственных обмеров штабелей на основе метода полного ящика.

Здесь необходимо отметить, что результаты инструментальных замеров были приняты за истинные в силу проверенности данного метода. Вместе с тем, как отмечалось выше, его применение не гарантирует абсолютной точности получаемых данных.

При вычислении величин расхождений следует учитывать существование двух подходов, при которых полученные значения анализируются как с учетом знака, чтобы оценить возможную систематическую ошибку, так и в виде абсолютных значений, во избежание взаимного поглощения величин расхождений с противоположными знаками.

При анализе точности в первую очередь проводится выявление и последующее устранение путем повторных обмеров или, в случае их невозможности, удаления из ряда данных, грубых ошибок, превышающих тройную допустимую погрешность. Согласно ГОСТ 32594-2013 «Лесоматериалы круглые. Методы измерений»⁶, допустимые погрешности определения плотного объема партии бревен, измеренных групповыми методами, составляют $\pm 5\%$ с вероятностью 0,95⁶. Как видно из приведенных в табл. 2 данных, максимальное расхождение в объемах штабелей, определенных разными способами, не превышало тройную величину допустимой погрешности, что позволяет сделать вывод об отсутствии грубых ошибок.

Среднее арифметическое значение расхождений опытных и истинных значений, вычисленных с учетом знака, часто используется для оценки си-

⁶ ГОСТ 32594-2013 Лесоматериалы круглые. Методы измерений. URL: docs.cntd.ru/document/1200108364

стематической ошибки, позволяющей сделать выводы о наличии систематического завышения или занижения полученных результатов [Никифорчин, 2013]:

$$\sigma_{\text{сист}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}. \quad (2)$$

Если сравнить средние абсолютные величины расхождений в полученных разными методами размерных показателях штабелей (табл. 2), можно заметить, что наименьшими являются расхождения в их длинах, что связано со сравнительной простотой их определения. Большие средние абсолютные величины расхождений имеют высоты штабелей. Подобная зависимость может быть обусловлена как особенностями автоматической обработки изображений, полученных с помощью БПЛА, при которой учитываются высоты подкладок и возможные неровности поверхности земли, так и погрешностями использования мерного шеста, когда измеряющий, особенно в случае высоких штабелей, порой не может точно оценить местоположение верхней точки. Полученные расхождения в средних высотах и длинах штабелей в дальнейшем приводят к расхождениям в их складочных объемах.

Обратная зависимость наблюдается, если рассматривать средние величины расхождений, взятые с учетом знака. Наибольшая величина систематической ошибки была выявлена при измерении длин штабелей: данные, полученные с помощью БПЛА, были выше в среднем на 0,59%. Это может быть связано с особенностями использованного метода полного ящика, когда крайние части штабелей визуально переносятся на верхнюю часть их скатов, приближая форму боковой поверхности к прямоугольнику [Нагимов и др., 2021; Никифорчин, 2013; Курицын, 2014]. Для средних высот штабелей в целом наблюдается занижение на 0,29%.

Среднеквадратическое отклонение показывает отклонения величин расхождений от среднего под влиянием случайных факторов [Нагимов, 2020]:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2}{n - 1}}, \quad (3)$$

где P_i – расхождение в определенных разными способами складочных объемах штабелей круглых лесоматериалов, %; P_m – средняя для всего массива данных величина расхождения. В случае, если в ходе анализа данных было проведено вычисление и последующее исправление систематической ошибки, $P_m = 0$.

Величины вышеперечисленных статистических показателей расхождений между определенными разными методами размерами штабелей круглых лесоматериалов приведены в табл. 2, на основании которой можно сделать выводы о высокой степени схожести значений, полученных разными методами.

Таблица 2

Оценка точности определения размерных показателей штабелей круглых лесоматериалов с применением беспилотных летательных аппаратов

Evaluation of the accuracy of determining the dimensional parameters of round wood stacks using unmanned aerial vehicles

Статистический показатель	Размерный показатель штабеля		
	Средняя высота	Длина	Складочный объем
Максимальное абсолютное значение, %	5,72	3,55	5,04
Среднее абсолютное значение, %	2,21	0,92	2,22
Среднее значение (систематическая ошибка), %	-0,28	0,57	0,14
Среднеквадратическое отклонение (случайная ошибка), %	±2,85	±1,12	±2,65

Для анализа факторов, влияющих на точность определения складочных объемов штабелей круглых лесоматериалов, была рассмотрена зависимость величин расхождений в них от длин, средних высот и объемов. Проведенный корреляционный анализ выявил отсутствие достоверной зависимости между данными показателями. Так, коэффициенты корреляции составили соответственно 0,02, -0,27 и 0,19, величины р-критерия во всех случаях превысили пороговое значение в 0,05. Об отсутствии взаимосвязи свидетельствует также графическое представление (рис. 5).

Таким образом, можно сказать, что расхождения в складочных объемах штабелей круглых лесоматериалов носят случайный характер, не приводящий при этом к существенным ошибкам.

Одним из примеров возникновения случайных расхождений является наличие разрывов и пустот в штабелях, не видимых с земли или недоступных, согласно требованиям техники безопасности, для прямого измерения (рис. 6). В этом случае полученные в результате инструментальных замеров объемы будут завышать фактические значения.

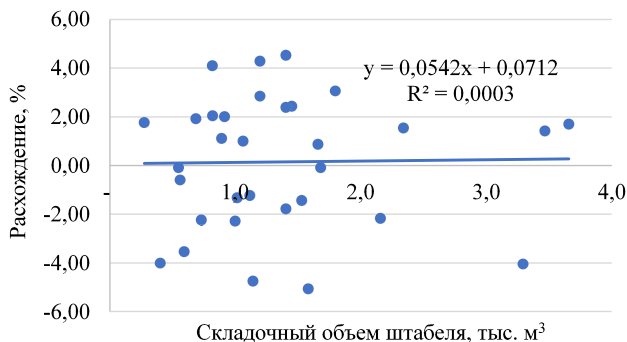


Рис. 5. Зависимость величины расхождения в объемах штабелей, найденных разными методами, от их складочного объема

Fig. 5. The dependence of the size of the discrepancy in the volumes of stacks found by different methods on their folding volume



Рис. 6. Разрывы и пустоты в штабелях круглых лесоматериалов

Fig. 6. Gaps and hollows inside roundwood stacks

Несмотря на это, можно сделать вывод о том, что замеры длин и высот штабелей круглых лесоматериалов, проведенные с применением БПЛА, их построенные методом фотометрии модели, а также определенные на их основе складочные объемы показали результаты, близкие к полученным в результате обмера штабелей с применением традиционных технологий.

При таксации штабелей круглых лесоматериалов больший интерес представляет не складочный объем, а плотный. В предлагаемом исследовании и для традиционной инструментальной технологии, и для основанной на применении БПЛА переход к последнему производился с использованием табличных коэффициентов полндревесности [Митченко, 2022;

Моисеев, 1970; Тюрин и др., 2006]. Поскольку для обеих рассматриваемых методик их значения были одинаковыми, величины расхождений в плотных объемах штабелей были равными расхождениям в складочных (табл. 2), из-за чего не требовали отдельного рассмотрения.

Вместе с тем дальнейшее совершенствование технологии обмера штабелей на основе применения фотограмметрии позволит проводить автоматическое определение фактических коэффициентов полндревесности посредством распознавания площадей торцов и их доли от боковой поверхности штабеля, как это реализовано в таких специализированных приложениях, как «SmartTimber» или «Timbeter» [Беляев и др., 2020].

Закключение. Проведенное исследование возможности применения беспилотных летательных аппаратов с последующим 3D-моделированием при учете штабелей круглых лесоматериалов показало, что полученные в результате величины размерных показателей, таких как высота и длина основания штабелей, а также их объемов не существенно отличаются от величин, определенных посредством непосредственных обмеров.

Так, на основании анализа обмеров 33 штабелей круглых лесоматериалов не было выявлено наличия грубых ошибок в их размерах, а величины систематических и случайных ошибок не превышали допустимых значений.

Рассмотренный метод продемонстрировал высокую производительность при измерении больших объемов леса, а также возможность без потери точности измерять закрытые и высокие, более 4 м, штабеля. При этом, помимо снижения трудозатрат на обмер штабелей, происходит обусловленное переходом от контактной работы с ними на дистанционное обследование снижение рисков для жизни и здоровья работников.

Дальнейшее исследование и совершенствование методики позволит повысить точность определения размеров и объемов штабелей, а также автоматизировать процесс вычисления коэффициентов их полндревесности. Но и на настоящем этапе можно сказать о высоком потенциале применения БПЛА при учете штабелей круглых лесоматериалов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Афонин Д.Н. Методики измерения объема круглых лесоматериалов // Бюллетень инновационных технологий. 2022. Т. 6, № 3(23). С. 19–22.
- Беляев Н., Куницкая О., Григорьева О. Развитие технологий измерения и учета круглых лесоматериалов. Ч. 1. // ЛесПромИнформ. 2023. № 2(172). С. 66–71.
- Беляев Н.Л., Сафаргалешева С.Ф. Новейшие технологии в таксации заготовленных лесоматериалов как элемент прецизионного лесного хозяйства // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2020. Т. 24, № 3. С. 18–25. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-18-25.

Бурмистров Н.И., Трусов Г.И., Гурьянов М.О. Сравнительный анализ различных методов определения коэффициентов полндревесности штабелей круглого леса хвойных пород // Актуальные вопросы лесного хозяйства: матер. V Междунар. молодежной науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 11–12 ноября 2021 года. СПб.: СПбГЛТУ, 2021. С. 199–201.

Зубричев Н.В. Беспилотные летательные аппараты: понятия, классификация, преимущества, способы применения в современной жизни // НАУКА и инновации в 21 веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сб. статей XIII Междунар. науч.-практ. конф.. В 2 ч. Пенза, 20 мая 2019 года. Том Ч. 1. Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. С. 75–78.

Курицын А.К. Измерение штабелей круглых лесоматериалов. [/ ООО «Лесэксперт», 2018, URL: http://les.expert/DOC/7-5_SDC_Measurement_of_round_wood_stacks_Guide.pdf (дата обращения: 07.05.2023).

Нагимов З.Я., Шевелина И.В., Нагимов В.З., Артемьева И.Н. Лесотаксационные измерения: учебное пособие / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург, 2021. 95 с.

Митченко А.П. Особенности определения и применения коэффициентов полндревесности // Бюллетень Ассоциации ЛЕСТЕХ. 2022. № 4(10). С. 24–26.

Моисеев В.С. Таксация леса: учеб. пособие для лесотехнических вузов. Л., 1970. 258 с.

Никифорчин И.В. Таксация леса: практикум для подготовки бакалавров по направлению 250100 «Лесное дело» : учеб. пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 160 с.

Нагимов З.Я., Зубова С.С., Сычугова О.В. и др. Таксация отдельного дерева: учеб. пособие / Уральский государственный лесотехнический университет. Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. 160 с.

Тюрин Н.А., Бессараб Г.А., Кочанов В.В. Использование электронных тахеометров при определении объемов штабелей круглых лесоматериалов // Лес-ПромИнформ. 2006. № 4(35). С. 76–80.

Шаталов Н.В. Особенности классификации БПЛА самолетного типа // Перспективы развития информационных технологий. 2016. № 29. С. 34–39.

References

Afonin D.N. Metodiki izmereniya ob"ema kruglyh lesomaterialov. *Byulleten' innovacionnyh tekhnologij*, 2022, vol. 6, no. 3(23), pp. 19–22. (In Russ.)

Belyaev N., Kunickaya O., Grigor'eva O. Razvitie tekhnologij izmereniya i ucheta kruglyh lesomaterialov. Ch. 1. *LesPromInform*, 2023, no. 2(172), pp. 66–71. (In Russ.)

Belyaev N.L., Safargalieva S.F. Novejshie tekhnologii v taksacii zagotovlennyh lesomaterialov kak element precizionnogo lesnogo hozyajstva. *Lesnoj vestnik. Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 18–25. DOI 10.18698/2542–1468-2020-3-18-25. (In Russ.)

Burmistrov N.I., Trusov G.I., Gur'yanov M.O. Sravnitel'nyj analiz razlichnyh metodov opredeleniya koefficientov polnodrevsnosti shtabelej kruglogo lesa hvoynyh porod. *Aktual'nye voprosy lesnogo hozyajstva* : materialy V Mezhdunar. molodezhnoj

nauch.-prakt. konf. St. Petersburg, 11–12 noyabrya 2021 goda. St. Petersburg: SPbGLTU, 2021, pp. 199–201. (In Russ.)

Kuritsyn A.K. Izmerenie shtabelej kruglyh lesomaterialov. ООО «Lesekspert», 2018, URL: http://les.expert/DOC/7-5_SDC_Measurement_of_roundwood_stacks_Guide.pdf (In Russ.)

Mitchenko A.P. Osobennosti opredeleniya i primeneniya koeffitsientov polnodrevesnosti. *Byulleten' Associacii LESTEKH*, 2022, no. 4(10), pp. 24–26. (In Russ.)

Moiseev V.S. Taksaciya lesa: uchebnoe posobie dlya lesotekhnicheskikh vuzov. L., 1970. 258 p. (In Russ.)

Nagimov Z.Ya., S.S. Zubova O.V. Sychugova et al. Taksaciya otdel'nogo dereva : uchebnoe posobie. Ural'skij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet. Ekaterinburg : UGLTU, 2020. 160 p. (In Russ.)

Nagimov Z.Ya., Shevelina I.V., Nagimov V.Z., Artem'eva I.N. Lesotaksacionnye izmereniya : uchebnoe posobie. Ministerstvo nauki i vysshego obrazovaniya Rossijskoj Federacii, Ural'skij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet. Ekaterinburg, 2021. 95 p. (In Russ.)

Nikiforchin I.V. Taksaciya lesa: praktikum dlya podgotovki bakalavrov po napravleniyu 250100 «Lesnoe delo» : ucheb. posobie. St. Petersburg: SPbGLTU, 2013. 160 p. (In Russ.)

Shatalov N.V. Osobennosti klassifikacii BPLA samoletnogo tipa. *Perspektivy razvitiya informacionnyh tekhnologij*, 2016, no. 29, pp. 34–39. (In Russ.)

Tyurin N.A., Bessarab G.A., Kochanov V.V. Ispol'zovanie elektronnyh taheometrov pri opredelenii ob'emov shtabelej kruglyh lesomaterialov. *LesPromInform*, 2006, no. 4(35), pp. 76–80. (In Russ.)

Zubrichev N.V. Bepilotnye letatel'nye apparaty: ponyatiya, klassifikaciya, premushchestva, sposoby primeneniya v sovremennoj zhizni. *NAUKA i innovacii v 21 veke: aktual'nye voprosy, otkrytiya i dostizheniya*: sb. statej XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. V 2 ch. Penza, 20 maya 2019 goda. Tom Chast' 1. Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.), 2019, pp. 75–78. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 03.06.2023

Филатов А.А., Алексеев А.С., Гурьянов М.О., Голубев А.С., Митченко А.П. Применение фотограмметрической съемки с беспилотных летательных аппаратов и трехмерного моделирования для определения объемов круглых лесоматериалов в штабелях // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2024. Вып. 247. С. 56–71. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.56-71

Проведено исследование точности группового учета круглых лесоматериалов в штабелях по специально разработанной методике, основанной на применении беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с последующим 3D-моделированием. Сравнение данных, полученных по предлагаемой инновационной методике, с результатами непосредственного обмера штабелей показало отсутствие существенных расхождений в них. При этом с помощью

методики, основанной на применении БПЛА, становится возможным снижение трудозатрат на обмер штабелей вместе с повышением точности получаемых результатов за счет учета особенностей рельефа и их укладки, а также измерения труднодоступных для непосредственного обследования участков. Применение БПЛА при групповом учете лесоматериалов имеет большую перспективу и представляет значительный практический интерес.

Ключевые слова: штабель, круглые лесоматериалы, объем лесоматериалов, беспилотные летательные аппараты, 3D-моделирование.

Philatov A.A., Alekseev A.S., Gurjanov M.O., Golubev A.S., Mitchenko A.P. Photogrammetric survey by UAV and 3D-modelling for determining of roundwood stacks volume. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 247, pp. 56–71 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.56-71

An accuracy of mass stocktaking in roundwood stacks with use of innovative method, based on 3D-modelling of results of UAV survey. Comparison of parameters, obtained by the innovative method with total measurements has shown the absence of any significant differences. At the same time, the methodology, based on UAV survey use, allows to reduce labor costs for stacks measurements, to take into account the terrain shape and folding gaps, to measure hard-to-reach areas, also getting actual proofable data on stacks geometry. The use of UAV in mass stocktaking of roundwood stacks is promising and is of great interest for practice.

Key words: stacks, roundwood, wood volume, UAV, 3D-modelling.

ФИЛАТОВ Антон Андреевич – аспирант кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 5830-0720, ORCID: 0000-0002-2061-2157, Scopus: 57329660800

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: anton.filatov.94@mail.ru

PHILATOV Anton A. – PhD student of the Department of Forest Inventory, Management and Geographical Information Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5830-0720, ORCID: 0000-0002-2061-2157, Scopus: 57329660800

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: anton.filatov.94@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Александр Сергеевич – заведующий кафедрой лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор географических наук, профессор. SPIN-код: 8115-9103, ORCID: 0000-0001-8795-2888, Scopus: 55892224800.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

ALEKSEEV Aleksandr S. – DSc (Geography), Professor, Head of the Department of Forest Inventory, Management and Geographical Information Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8115-9103, ORCID: 0000-0001-8795-2888, Scopus: 55892224800

194021, Institute per. 5. St. Petersburg, Russia. E-mail: a_s_alekseev@mail.ru

ГУРЬЯНОВ Михаил Олегович – доцент кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 2801-5477, ORCID: 0000-0003-3028-2881.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: m-bear2004@mail.ru

GURJANOV Mikhail O. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Forest Inventory, Management and Geographical Information Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 2801-5477, ORCID: 0000-0003-3028-2881.

194021, Institute per. 5. St. Petersburg, Russia. E-mail: m-bear2004@mail.ru

ГОЛУБЕВ Александр Сергеевич – старший преподаватель кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 7298-5699, ORCID: 0009-0004-1309-9457.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: holubeu87@gmail.com

GOLUBEV Aleksandr S. – Lecturer of the Department of Forest Inventory, Management and Geographical Information Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 7298-5699, ORCID: 0009-0004-1309-9457.

194021, Institute per. 5. St. Petersburg, Russia. E-mail: holubeu87@gmail.com

МИТЧЕНКО Андрей Петрович – заместитель генерального директора по качеству АО «Шмидт энд Олофсон», кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5363-9130. ORCID: 0009-0004-3612-8900.

197183, Сестрорецкая ул., д. 8А, пом. 18Н, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: sokachestvo@yandex.ru

MITCHENKO Andrey P. – PhD (Agricultural), Deputy of General Director for Quality at JSC «Schmidt and Olofson». SPIN-code: 5363-9130, ORCID: 0009-0004-3612-8900.

197183, Sestroretskaya str. 8A. Room 18H. St. Petersburg, Russia. E-mail: sokachestvo@yandex.ru