

Разработка методики определения объёмов лесоматериалов с использованием беспилотного воздушного судна

Р. А. Алешко, К. В. Шошина, В. В. Березовский,
И. С. Васендина, Р. А. Воронцов, Т. О. Десятова

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова
Архангельск, 163002, Россия
E-mail: r.aleshko@gmail.com*

На основе методов обработки цифровых изображений разработана методика, относящаяся к области учёта объёмов лесоматериалов на складах лесозаготовительных и деревоперерабатывающих предприятий. Подход к определению объёма сыпучих и штабелей круглых лесоматериалов с использованием беспилотного воздушного судна (БВС) состоит из этапов, на которых выполняется цифровая аэрофотосъёмка с БВС территории размещения лесоматериалов, фотограмметрическая обработка данных цифровой аэрофотосъёмки с БВС, построение трёхмерной модели объектов интереса, определение складочных и плотных объёмов лесоматериалов. Результат методики — повышение скорости и точности определения объёмов сыпучих и штабелей круглых лесоматериалов. Пользователями представленной методики становятся лесопромышленные предприятия, выполняющие регулярную инвентаризацию складов лесоматериалов, органы власти и ведомства с целью государственного контроля, а также кредитные организации, которые могут достоверно оценить финансовое состояние организации, запросившей кредитные средства. Всем перечисленным пользователям разработанная методика даст возможность получать оперативную и точную информацию об объёмах лесоматериалов на территории их складирования. Это, в свою очередь, позволит снизить затраты на проведение процедуры оценки объёмов лесоматериалов, сделать процедуру контроля более независимой и прозрачной.

Ключевые слова: лесоматериалы, брёвна, штабель, сыпучие, объём, беспилотное воздушное судно, методика

Одобрена к печати: 17.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-111-120

Введение

Международная торговля лесоматериалами развивается весьма динамично. По данным ФАО (Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН, *англ.* Food and Agriculture Organization — FAO), объёмы мирового экспорта круглого леса за последнее десятилетие в количественном выражении возросли на 8 млн м³. Этому способствовали постоянный рост мирового потребления пиломатериалов в различных секторах экономики и возрастание значимости древесины как натурального, экологически чистого универсального материала.

Международная торговля необработанной древесиной сегодня развивается в условиях растущих объёмов её потребления. Ведущими экспортёрами круглого леса в мире выступают Россия, Новая Зеландия, США, а главными импортёрами необработанной древесины — Китай, Австрия, Германия. Основным фактором увеличения объёмов международной торговли в настоящее время стал рост потребления древесины в мире, и в ближайшие несколько лет эта тенденция на мировом рынке сохранится.

В большинстве научных работ (Алешко и др., 2017; Богданов и др., 2018; Сухих, 2005; Aleshko et al., 2015; Bibikov et al., 2018; Boori et al., 2020; Bychkov et al., 2022; Franklin, 2001; Kazanskiy et al., 2020; Plotnikov et al., 2018; Terekhin, 2021; Wulder, Franklin, 2006) основное внимание уделяется применению данных дистанционного зондирования для определения параметров лесных ресурсов «на корню». Однако не меньшую актуальность имеет задача оценки объёма лесоматериалов, размещённых после рубки на складах лесозаготовительных предприятий (Беляев, Куницкая, 2022).

В Российской Федерации объём круглого сортимента определяется поштучно измерением диаметра и длины каждого сортимента или группой — по параметрам пачки, пакета или транспортной ёмкости — непосредственным обмером их совокупности, по фотографии, при помощи электронно-оптических средств, взвешиванием или погружением в воду. Для перевода полученного складочного объёма штабеля в «плотный» объём (без коры и пустот) применяют коэффициент полнодревесности по таблицам (ГОСТ..., 2015). Также вычисляется складочный объём, занимаемый лесоматериалом при хранении на складах и перевозке.

Для определения объёмов по таблицам объёмов круглого леса достаточно двух измерений: длины бревна и его диаметра в верхнем отрезе без коры, не требуется ни разваливание штабеля, ни окорка брёвен. Благодаря данным преимуществам этот метод, хотя и даёт менее точные результаты, но всё же нашёл широкое применение в практике лесного хозяйства России.

При определении объёма брёвен с помощью таблиц объёмов круглого леса диаметр комля не принимается во внимание, так как древесина нижних частей брёвен, превышающих по толщине диаметр тонких верхних концов, поступает в отходы при распиловке на доски или применении их в бревенчатых постройках. При пользовании таблицами для определения объёма сортиментов круглого леса измеряют длину бревна и диаметр верхнего торца без коры, а затем на пересечении горизонтальной и вертикальной строк находят нужный объём. Для сильносбежистых брёвен эти таблицы преуменьшают объёмы, для малосбежистых — преувеличивают, но при больших партиях круглого леса, разнообразного по сбегу, как это обычно и бывает в практике лесного производства, погрешность в сумме объёмов становится приемлемой для учёта.

Однако методы измерений не стоят на месте и развиваются, являя собой как модификации уже известных подходов, так и сочетания двух и более методов, появляющихся под влиянием следования наибольшей экономической целесообразности и повышения эффективности учётных работ.

Авторы исследования разработали методику определения объёмов лесной продукции, представленных как в виде штабелей круглых лесоматериалов, так и в виде куч щепы, коры или опилка, с использованием беспилотного воздушного судна (БВС).

Методика

Для сбора данных цифровой аэрофотосъёмки объектов исследования применялся БВС роторного типа DJI Mavic Mini (рис. 1).



Рис. 1. Беспилотный аппарат DJI Mavic Mini



Рис. 2. Беспилотный аппарат в защитном кейсе

Беспилотный аппарат данной серии характеризуется малым весом, при этом хорошей стабилизацией полёта и съёмки даже при значительных порывах ветра.

Наиболее важными характеристиками дрона в контексте решаемых задач:

- вес — 249 г;
- размеры — 55×160×202 мм;
- максимальная скорость — 65 км/ч;
- максимальное время полёта — 30 мин;
- дальность полёта — 2000 м;
- максимальная высота — 3000 м;
- рабочий диапазон частот — 2,400–2,4835 ГГц;
- разрешение камеры — 12 Мп;
- частота кадров — 24/25/30/48/50/60 кадров/с;
- тип стабилизатора — трёхосевой;
- максимальное разрешение изображения — 4000×3000 пикселей;
- максимальный объём карты памяти — 256 ГБ.

Аппарат был дополнительно укомплектован защитным кейсом (*рис. 2*, см. с. 112) для удобства транспортировки. Кроме того, в отсутствие подходящих площадок для взлёта и посадки её успешно заменяет защитный кейс в закрытом состоянии. БВС способен выполнять полёт в автономном, заранее заданном режиме под контролем оператора.

Разработанная методика определения объемов лесоматериалов с использованием БВС включает следующие этапы.

1. Выполнение цифровой фотосъёмки с борта БВС.

Среди требований к БВС нужно выделить наличие бортовой системы спутниковой навигации, а также цифровой фотокамеры.

Цифровая фотосъёмка с борта БВС может выполняться с использованием различных камер на разной высоте в зависимости от требуемой детальности измерений. К примеру, цифровая камера с размером матрицы 12 мегапикселей на высоте 30 м над уровнем земной поверхности позволит сформировать цифровую модель местности (модель высот) детальностью до 1 см/пиксель.

Цифровая фотосъёмка с борта БВС осуществляется в надир либо под малым углом к земной поверхности.

Камера регулярно, с заранее заданным интервалом выполняет цифровую фотосъёмку территории размещения штабелей круглых лесоматериалов. Частота съёмки должна позволять сформировать перекрытия между кадрами. Интервал фотосъёмки выбирается исходя из высоты БВС и характеристик цифровой камеры. Рекомендуемая величина перекрытий между кадрами — не менее 50 %.

Ввиду наличия на борту БВС спутниковой системы навигации для каждого полученного цифрового снимка имеется информация о географических координатах и высоте БВС в момент съёмки.

При необходимости данные спутниковой системы навигации могут быть уточнены с использованием методов дифференциальной коррекции глобальных навигационных спутниковых систем и других перспективных технологий.

2. Автоматизированная фотограмметрическая обработка данных цифровой фотосъёмки с БВС с использованием специализированного программного обеспечения (например, Agisoft Metashape). Результатом фотограмметрической обработки становится цифровая модель поверхности (значения высот относительно уровня моря) — ЦМП_{у.м.} и ортофотоплан территории (*рис. 3, 4*, см. 114).

3. Фиксируются точки на уровне земной поверхности (площадка, дорога, открытый грунт и др.), на которой отсутствуют какие-либо объекты, с использованием специализированного геоинформационного программного обеспечения (например, QGIS, ArcGIS) на визуализированном изображении ЦМП_{у.м.} (*рис. 5*, см. с. 114).



Рис. 3. Ортофотоплан территории

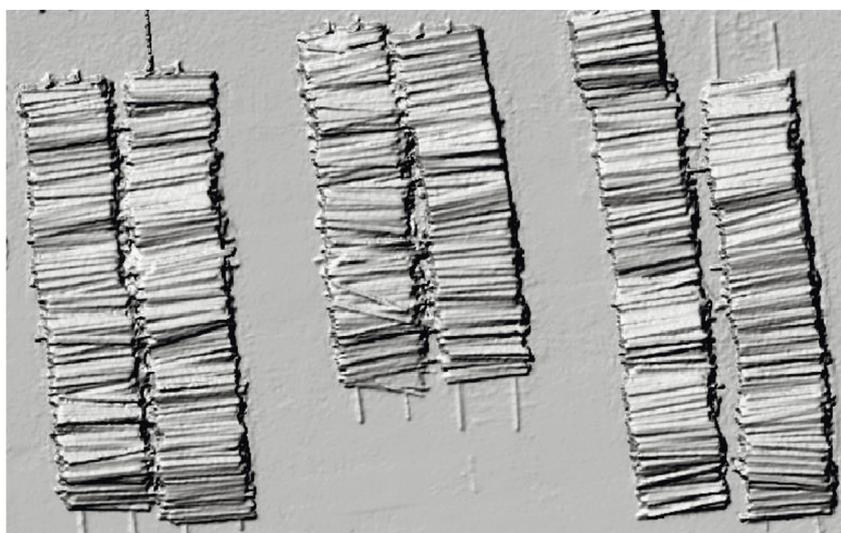


Рис. 4. Цифровая модель поверхности



Рис. 5. Точки на уровне земной поверхности

4. Проводится интерполяция значений высоты в точках, отмеченных в предыдущем пункте, с использованием специализированного геоинформационного программного обеспечения (например, QGIS, ArcGIS). Результат выполнения данного этапа — цифровая модель рельефа, т. е. модель поверхности земли без учёта объектов, размещённых на ней.

5. Из значений пикселей ЦМП_{у.м.} вычитаются значения пикселей ЦМР с использованием специализированного геоинформационного программного обеспечения (например, QGIS, ArcGIS), в результате чего получается цифровая модель поверхности (значения высот относительно уровня поверхности земли) — ЦМП_{п.з.}:

$$\text{ЦМП}_{\text{у.м.}} - \text{ЦМР} = \text{ЦМП}_{\text{п.з.}}$$

6. С использованием специализированного геоинформационного программного обеспечения (например, QGIS, ArcGIS) на ЦМП_{п.з.} фиксируются контуры штабелей круглых лесоматериалов и автоматически рассчитывается их складочный объём суммированием произведений площади отдельных пикселей на их высоту в рамках контура:

$$V_f = S_p h_p n,$$

где V_f — складочный объём штабеля круглых лесоматериалов; S_p — площадь отдельного пикселя; h_p — высота, присвоенная отдельному пикселю в рамках ЦМП_{у.м.}; n — количество пикселей в рамках контура.

7. Рассчитывается плотный объём умножением складочного объёма на коэффициент полндревесности в соответствии с (ГОСТ..., 2015) (таблица):

$$V_d = V_f K_{\text{п.}}$$

Коэффициенты полндревесности штабелей брёвен при длине круглых лесоматериалов 3 м и более

Порода	Коэффициент полндревесности лесоматериалов $K_{\text{п.}}$ в зависимости от длины сортимента				
	3 м	4 м	5 м	6 м	7 м
Ель, пихта	0,673	0,665	0,660	0,655	0,651
Сосна	0,660	0,655	0,652	0,650	0,648
Лиственница	0,645	0,640	0,637	0,635	0,633
Берёза, осина	0,670	0,663	0,660	0,656	0,652

Коэффициенты полндревесности могут рассчитываться и утверждаться локальными нормативными актами лесопромышленного предприятия.

Результаты

Результатом выполнения описанной методики становится подробный план размещения штабелей круглых (рис. 6, см. с. 116) или куч сыпучих (рис. 7, см. с. 116) лесоматериалов с указанием их объёмов на складе или терминале лесопромышленного предприятия.

Обсуждение

Традиционным подходом к измерению объёмов круглых лесоматериалов является метод, описанный в п. 6.1 «Групповой метод определения объёма брёвен в штабеле, сформированном на складе (на земле)» Межгосударственного стандарта 32594-2013 (ГОСТ..., 2015).

Определение объёма круглых лесоматериалов геометрическим методом проводят отдельно для каждого штабеля брёвен. Для определения объёма (м^3) штабеля брёвен геометрическим методом сначала измеряют складочный объём штабеля.



Рис. 6. Пример рассчитанных объёмов круглых лесоматериалов

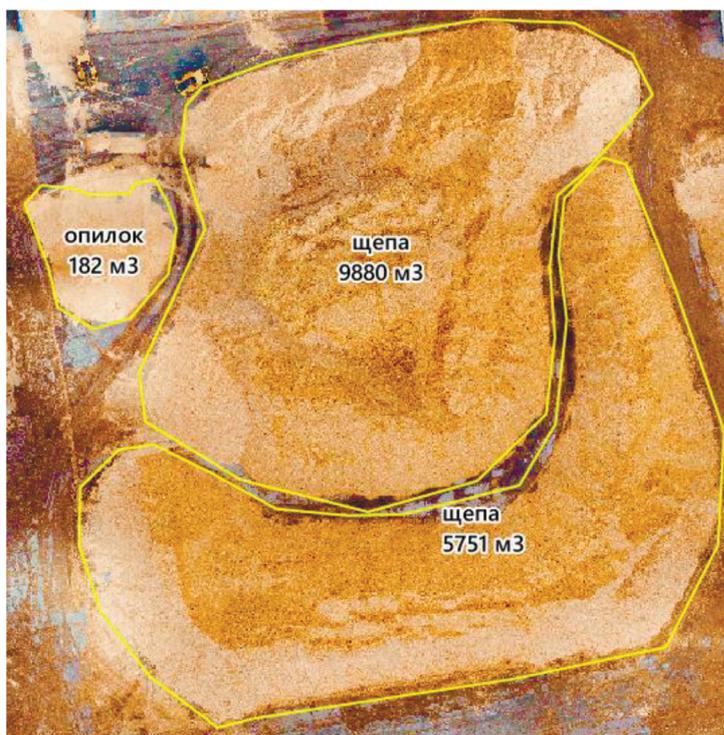


Рис. 7. Пример рассчитанных объёмов сыпучих лесоматериалов

Складочный объём штабеля брёвен — это объём, вычисленный по результатам измерения его высоты, ширины и длины. Он включает объём древесины, объём коры (при наличии) и объём пустот между брёвнами штабеля.

Складочный объём штабеля брёвен V_c (м³), сформированного на складе, вычисляют по формуле:

$$V_c = HBL,$$

где H — высота штабеля (м); B — ширина штабеля (м); L — длина штабеля (м).

Измерение высоты штабеля проводят по секциям.

Торцевую сторону штабеля делят на n одинаковых частей (секций) длиной не более 3 м. Высоту секции h (м) измеряют посередине каждой секции с обеих торцевых сторон штабеля с округлением результата до второго знака после запятой. Толщину подштабельных подкладок и прокладок из измеренной высоты исключают. Высоту штабеля определяют как среднеарифметическое значение высоты всех секций штабеля по формуле:

$$H = \left[\sum_{i=1}^n h_{i_{\text{п}}} / n + \sum_{i=1}^n h_{i_{\text{з}}} / n \right] / 2,$$

где $h_{i_{\text{п}}}$ — высота i -й секции с торцевой передней стороны (м); i — число секций; $h_{i_{\text{з}}}$ — высота i -й секции с торцевой задней стороны (м).

Ширину штабеля B , сформированного на складе, принимают равной номинальной длине сортиментов, установленной в технических документах или в договорах на поставку (без припусков). В случае если в штабель уложены брёвна разных номинальных длин, средняя длина штабеля вычисляется как средняя величина номинальных длин, взвешенных через число брёвен соответствующих номинальных длин. Ширину штабеля B измеряют в метрах с округлением результата до второго знака после запятой.

Длину штабеля, сформированного на складе, измеряют вдоль обеих (передней и задней) торцевых сторон штабеля с вычислением среднего значения. Для этого с каждой стороны штабеля измеряют длину оснований по крайним брёвнам нижнего ряда и длину штабеля по крайним брёвнам верхнего ряда. Среднее значение длины штабеля вычисляют по формуле:

$$L = \frac{L_1 + L'_1 + L_2 + L'_2}{4},$$

где L_1 — длина штабеля по основанию вдоль торцевой передней стороны (м); L'_1 — длина штабеля по верхнему ряду вдоль торцевой передней стороны (м); L_2 — длина штабеля по основанию вдоль торцевой задней стороны (м); L'_2 — длина штабеля по верхнему ряду вдоль торцевой задней стороны (м).

Длину штабеля, измеренную в метрах, округляют до второго знака после запятой. Для перевода полученного складочного объёма штабеля на складе (на земле) в «плотный» объём (без коры и пустот) умножают значение складочного объёма на соответствующий коэффициент полноты по *таблице*.

Представленный выше традиционный подход имеет ряд недостатков, связанных с высокой погрешностью «ручных» измерений, влиянием человеческого фактора, зачастую искусственно введённых ограничений самой методики (например, промежутки для измерений в 3 м).

Очевидным преимуществом разработанной новой методики с применением БВС представляется высокая скорость и точность определения объёмов лесоматериалов, а также объективность производимых измерений.

Кроме того, среди достоинств методики можно выделить:

- отсутствие необходимости регистрации и согласования полёта (БВС массой менее 250 г);
- малые размеры аппарата и кейса для перевозки;
- скорость выполнения съёмки — до 40 000 м² за 20 мин;
- не требуется наличие дополнительного наземного оборудования и точек привязки;
- не требуется высокая квалификация оператора (выполнение съёмки по заранее заданному маршруту);
- возможность выполнения съёмки при неблагоприятных погодных условиях (ветер до 8 м/с, небольшой дождь/снег).

Заключение

Разработанная методика востребована широким кругом пользователей. Перечислим некоторых их них.

В первую очередь это лесопромышленные предприятия, выполняющие инвентаризацию складов: непосредственно вблизи делянки (нижние склады), в логистических узлах (верхние склады), на территории предприятия (терминалы)

Во-вторых — органы власти с целью государственного контроля. В России на Федеральное агентство лесного хозяйства (Рослесхоз) возложены функции по надзору в сфере приёмки, перевозки, переработки и хранения древесины, учёта древесины и сделок с ней. Обязательные требования в сфере оборота древесины в отношении контролируемых лиц включают в том числе учётно-техническое направление, т. е. определение характеристик древесины, учёт изменения характеристик для формирования информации о древесине при организации процессов.

Лесоматериалы отражаются участниками оборота древесины помимо ЕГАИС (Единая государственная автоматизированная информационная система) учёта древесины ещё в бухгалтерском и налоговом учёте. Точность, достоверность учёта формирует представление собственника древесины и государства не только о физических потоках древесины, но и об экономических аспектах деятельности со всеми сопутствующими рисками.

Также заинтересованы в результатах исследования кредитные организации. В частности, банки в ходе проведения залоговых операций могут достоверно оценить финансовое состояние организации, запросившей кредитные средства.

Таким образом, разработанная методика поможет как лесопользователям, так и контролирующим ведомствам получать оперативную и точную информацию об объёмах лесоматериалов на территории их складирования. Это, в свою очередь, позволит снизить затраты на проведение оценки объёмов лесоматериалов, сделать процедуру контроля более независимой и прозрачной.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Правительства Архангельской обл., проект № 22-11-20025.

Литература

1. Алешко Р.А., Алексеева А.А., Шошина К.В. и др. Разработка методики актуализации информации о лесном участке с использованием снимков со спутников и малых БПЛА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 87–99. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99.
2. Беляев Н.Л., Куницкая О.А. Современные технологии оптического группового учета круглых лесоматериалов // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й научно-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов. 2022. С. 50–53.
3. Богданов А.П., Карпов А.А., Демина Н.А., Алешко Р.А. Совершенствование мониторинга лесов путем использования облачных технологий как элемента устойчивого лесоуправления // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 89–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100.
4. ГОСТ 32594-2013. Лесоматериалы круглые. Методы измерений. М.: Стандартинформ, 2015. 37 с.
5. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
6. Aleshko R. A., Guriev A. T., Shoshina K. V., Schenikov V. S. Development of methodology for visualization and processing of geospatial data // Scientific Visualization. 2015. V. 7. No. 1. P. 20–29.
7. Bibikov S. A., Kazanskiy N. L., Fursov V. A. Vegetation type recognition in hyperspectral images using a conjugacy indicator // Computer Optics. 2018. V. 42. No. 5. P. 846–854. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-846-854.
8. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V. Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series // Computer Optics. 2020. V. 44. No. 3. P. 409–419. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-635.
9. Bychkov I. V., Ruzhnikov G. M., Fedorov R. K. et al. Classification of Sentinel-2 satellite images of the Baikal Natural Territory // Computer Optics. 2022. V. 46. No. 1. P. 90–96. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1022.
10. Franklin S. E. Remote Sensing for Sustainable Forest Management. Boca Raton: CRC Press, 2001. 424 p.
11. Kazanskiy N. L., Skidanov R. V., Nikonorov A. V., Doskolovich L. L. Intelligent video systems for unmanned aerial vehicles based on diffractive optics and deep learning // Proc. SPIE. 2020. V. 11516. Article 115161Q. DOI: 10.1117/12.2566468.

12. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Bartalev S. A. Identification of dynamically homogeneous areas with time series segmentation of remote sensing data // *Computer Optics*. 2018. V. 42. No. 3. P. 447–456. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-447-456.
13. Terekhin E. A. Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series // *Computer Optics*. 2021. V. 45. No. 2. P. 245–252. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
14. *Wulder M. A., Franklin S. E. Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern: Remote Sensing and GIS Approaches*. Boca Raton: CRC Press, 2006. 246 p.

Development of a methodology to determine the volume of timber using an unmanned aerial vehicle

R. A. Aleshko, K. V. Shoshina, V. V. Berezovsky,
I. S. Vasendina, R. A. Vorontsov, T. O. Desyatova

Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk 163002, Russia
E-mail: r.aleshko@gmail.com

The developed methodology relates to the field of accounting for the volume of timber in the warehouses of logging and wood processing enterprises based on digital image processing methods. The approach to determining the volume of bulk and stacks of round timber using an unmanned aerial vehicle (UAV) consists of the following stages: digital aerial photography from UAV of the area where timber is located; photogrammetric processing of digital aerial photography data from UAV; construction of a three-dimensional model of objects of interest; determination of storage and dense volumes timber. The technique is aimed at increasing the speed and accuracy of determining the volumes of bulk and stacks of round timber. The users of the presented methodology are timber industry enterprises that perform regular inventory of timber warehouses, state control authorities and departments, as well as credit institutions that can reliably assess the financial condition of an organization that requests credit. The developed methodology will enable all listed users to receive prompt and accurate information on the volumes of timber on the territory of their storage. This will reduce the cost of timber volume assessment and make the control procedure more independent and transparent.

Keywords: timber, logs, pile, bulk, volume, unmanned aerial vehicle, methodology

Accepted: 17.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-111-120

References

1. Aleshko R. A., Alekseeva A. A., Shoshina K. V. et al., Development of the methodology to update the information on a forest area using satellite imagery and small UAVs, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 5, pp. 87–99 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-87-99.
2. Belyaev N. L., Kunitskaya O. A., Modern technologies for optical group accounting of round timber, *Lesnaya inzheneriya, materialovedenie i dizain: materialy 86-i nauchno-tekhnicheskoj konferentsii professor-sko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* (Forest Engineering, Materials Science and Design: Proc. 86th Scientific and Technical Conf. Faculty, Researchers and PhD Students), 2022, pp. 50–53 (in Russian).
3. Bogdanov A. P., Karpov A. A., Demina N. A., Aleshko R. A., Improving forest monitoring by using cloud technologies as an element of sustainable forest management, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 89–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-89-100.
4. *GOST 32594-2013. Lesomaterialy kruglye. Metody izmerenii* (Roundtimber. Methods of measurement), Moscow: Standartinform, 2015, 37 p. (in Russian).

5. Sukhikh V. I., *Aerokosmicheskie metody v lesnom khozyaistve i landshaftnom stroitelstve* (Aerospace methods in forestry and landscape construction), Yoshkar-Ola: MarGTU, 2005, 392 p. (in Russian).
6. Aleshko R. A., Guriev A. T., Shoshina K. V., Schenikov V. S., Development of methodology for visualization and processing of geospatial data, *Scientific Visualization*, 2015, Vol. 7, No. 1, pp. 20–29.
7. Bibikov S. A., Kazanskiy N. L., Fursov V. A., Vegetation type recognition in hyperspectral images using a conjugacy indicator, *Computer Optics*, 2018, Vol. 42, No. 5, pp. 846–854, DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-846-854.
8. Boori M. S., Choudhary K., Kupriyanov A. V., Crop growth monitoring through Sentinel and Landsat data based NDVI time-series, *Computer Optics*, 2020, Vol. 44, No. 3, pp. 409–419, DOI: 10.18287/2412-6179-CO-635.
9. Bychkov I. V., Ruzhnikov G. M., Fedorov R. K. et al., Classification of Sentinel-2 satellite images of the Baikal Natural Territory, *Computer Optics*, 2022, Vol. 46, No. 1, pp. 90–96, DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1022.
10. Franklin S. E., *Remote Sensing for Sustainable Forest Management*, Boca Raton: CRC Press, 2001, 424 p.
11. Kazanskiy N. L., Skidanov R. V., Nikonorov A. V., Doskolovich L. L., Intelligent video systems for unmanned aerial vehicles based on diffractive optics and deep learning, *Proc. SPIE*, 2020, Vol. 11516, Article 115161Q, DOI: 10.1117/12.2566468.
12. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Bartalev S. A., Identification of dynamically homogeneous areas with time series segmentation of remote sensing data, *Computer Optics*, 2018, Vol. 42, No. 3, pp. 447–456, DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-3-447-456.
13. Terekhin E. A., Indication of long-term changes in the vegetation of abandoned agricultural lands for the forest-steppe zone using NDVI time series, *Computer Optics*, 2021, Vol. 45, No. 2, pp. 245–252, DOI: 10.18287/2412-6179-CO-797.
14. Wulder M. A., Franklin S. E., *Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern: Remote Sensing and GIS Approaches*, Boca Raton: CRC Press, 2006, 246 p.