

УДК 630*522:630*587.5

Е. А. Шульга, И. В. Толкач, С. С. Цай

Белорусский государственный технологический университет

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ НЕСОМКНУВШИХСЯ ЛЕСНЫХ КУЛЬТУР
ПО МАТЕРИАЛАМ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ**

В Республике Беларусь леса играют важную роль, поэтому лесовосстановление является приоритетной задачей. Для контроля качества лесных культур проводятся обследования, требующие финансовых и трудовых затрат. В связи с этим актуальны исследования по определению состояния лесных культур с использованием новых методов. Целью исследования является оценка эффективности лидарной съемки для мониторинга несомкнувшихся лесных культур ели. Использовались материалы зимней лидарной съемки участка площадью 1,5 га, выполненной лидаром Zenmuse L2, установленным на дроне DJI Matrice 300 RTK. Для обработки данных использовано программное обеспечение SAGA GIS. Этапы обработки включали удаление шумов, классификацию точек, построение цифровых моделей земли и полога культур, определение количества вершин деревьев. Количество деревьев оценивалось автоматизировано и методом визуального анализа. Точность определения количества деревьев составила около 93%. Анализ высот проводился разными способами. Разница между сглаженными и несглаженными моделями высот составила 0,67 м. В связи с этим требуется проведение дальнейших исследований, которые смогут повысить точность определения высот деревьев. Лидарная съемка позволяет определять высоту и густоту насаждения, выявлять проблемные участки и оценивать влияние различных факторов на развитие лесных культур. Применение лидарной съемки является перспективным способом повышения эффективности лесохозяйственной деятельности.

Ключевые слова: лидарная съемка, лесные культуры, высота деревьев, густота деревьев, облако точек, цифровая модель высот.

Для цитирования: Шульга Е. А., Толкач И. В., Цай С. С. Оценка состояния несомкнувшихся лесных культур по материалам лидарной съемки // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 2 (294). С. 14–19.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-2.

E. A. Shulga, I. V. Tolkach, S. S. Tsai

Belarusian State Technological University

**ASSESSMENT OF THE CONDITION OF UNCLOSED FOREST
CROPS BASED ON LIDAR SURVEY DATA**

Forests play an important role in the Republic of Belarus, so reforestation is a priority. In order to control the quality of forest crops, surveys are carried out, which require financial and labor costs. In this regard, the research on determining the condition of forest crops using new methods is relevant. The aim of the study is to assess the effectiveness of lidar survey for monitoring of unbroken spruce forest crops. The materials of winter lidar survey of 1.5 ha area were used. The survey was carried out by Zenmuse L2 lidar mounted on DJI Matrice 300 RTK drone. SAGA GIS software was used for data processing. Processing stages included noise removal, point classification, construction of digital models of land and crop canopy, and determination of the number of tree tops. The estimation of the number of trees was controlled automatically and by visual analysis. The accuracy of tree number estimation was about 93%. Elevations were analyzed in different ways. The difference between smoothed and non-smoothed height models was 0.67 meters. Therefore, further research is required to improve the accuracy of tree height determination. Lidar survey allows to determine height, density, identify problem areas and assess the influence of various factors on the development of forest crops. The use of lidar imagery is a promising way to improve the efficiency of forest management.

Keywords: lidar survey, forest crops, tree height, tree density, point cloud, digital elevation model.

For citation: Shulga E. A., Tolkach I. V., Tsai S. S. Assessment of the condition of unclosed forest crops based on lidar survey data. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 2 (294), pp. 14–19 (In Russian).

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-2.

Введение. В Республике Беларусь леса являются одним из важнейших национальных богатств и основных возобновляемых ресурсов. Леса занимают значительную часть территории Беларуси и играют важную экологическую и социально-экономическую роль в развитии страны.

Одной из главных задач лесного хозяйства является своевременное и качественное воспроизводство лесов на землях лесного фонда. В связи с этим в Республике Беларусь проводятся большие лесовосстановительные работы, в основе которых производство лесных культур. Лесные культуры представляют собой лесные насаждения, созданные посевом или посадкой. За последние 5 лет в Республике Беларусь было создано около 182 тыс. га лесных культур. В стране имеются все условия для выращивания качественных лесов, начиная с заготовки и переработки лесосеменного сырья, хранения семян лесных растений, выращивания стандартного посадочного материала, проведения мероприятий по лесовосстановлению и лесоразведению, заканчивая уходом за лесными насаждениями и вводом их в категорию ценных лесных насаждений [1–3].

В соответствии с требованиями действующих нормативов для осуществления контроля качества выполненных работ по созданию лесных культур, оценки состояния созданных насаждений и принятия своевременных мер по устранению недостатков проводится обследование лесных культур. Обследования включают в себя техническую приемку работ по созданию лесных культур и оказанию мер содействия естественному возобновлению, а также инвентаризацию лесных культур первого и третьего года выращивания, инвентаризацию участков лесных культур с целью перевода их в покрытые лесом земли [4].

При проведении обследований на участках лесных культур закладываются пробные площади в форме прямоугольника или учетных отрезков с целью контроля приживаемости, а также других важных таксационных показателей, которые в совокупности характеризуют их состояние и качество. Учет деревьев производят отдельно по породам и происхождению.

При проведении технической приемки работ по созданию лесных культур на пробных площадях устанавливаются такие показатели, как площадь, на которой осуществлялась посадка лесных растений, и количество высаженных лесных растений. Количество высаженных лесных растений на пробной площади определяется путем сплошного перечета растений. При инвентаризации лесных культур на первом и третьем году их выращивания основными показателями являются приживаемость и количество естественного возобновления культивируемых пород при их наличии. Также при установлении

приживаемости производят сплошной перечень посадочных мест с сохранившимися лесными растениями в рядах лесных культур.

При проведении работ по инвентаризации участков лесных культур с целью перевода их в покрытые лесом земли основными показателями являются средняя высота деревьев главной породы, количество деревьев и состав лесного насаждения. Количество деревьев и состав лесного насаждения определяют по результатам сплошного перечета на пробной площади. Среднюю высоту устанавливают по результатам измерения высоты каждого десятого дерева. Также допускается вариант определения средней высоты главной породы на пробной площади путем измерения высоты каждого дерева [4].

В ходе лесоустроительных работ выполняется обследование лесных культур, созданных после предыдущего лесоустройства, с охватом до 10% их площади (но не менее 30 га лесных культур на лесничество при их наличии). Пробные площади закладываются в местах, наиболее характерных для всего участка лесных культур, с учетом доли по площади участка. Однако это не позволяет охватить всю территорию созданных лесных культур, что может приводить к ошибкам в оценке показателей их качества [5–7].

Обследования по оценке качества лесных культур могут проводиться на любом этапе выращивания. Лесные культуры до перевода в покрытые лесом земли, а зачастую и некоторое время после этого в большинстве случаев обладают только потенциальным качеством. Основным показателем, определяющим качество лесных культур, является приживаемость (сохранность) или количество жизнеспособных растений главной породы [8].

Мониторинг состояния лесных культур – важный вопрос для устойчивого управления лесами, который требует финансовых и трудовых затрат. Поэтому исследования по определению состояния лесных культур с использованием новых методов имеют весомое значение для эффективного управления лесами.

Оценка состояния несомкнувшихся лесных культур по материалам лидарной съемки представляет собой перспективное направление в лесном хозяйстве. Лидарная съемка дает возможность получать высокоточные трехмерные данные о структуре лесных насаждений, что позволяет оценивать состояние и развитие молодых лесных культур.

Основная часть. Целью исследования является оценка эффективности применения лидарной съемки для мониторинга состояния несомкнувшихся лесных культур, определения основных показателей, которые можно получить по материалам лазерного сканирования, а также их точности.

Объектами исследования выбраны несомкнувшиеся лесные культуры ели на территории

Червенского лесхоза. При создании лесных культур ширина междурядий составляла 2,0 м, шаг посадки соблюдался 1,5 м. Густота созданных лесных культур составляла 3333 тыс. шт./га.

В исследовании использованы материалы зимней лидарной съемки несомкнувшихся лесных культур ели на площади 5,9 га (квартал 1, выдел 54 Гребенецкого лесничества Червенского лесхоза). Высота съемки составила 90 м. Съемка выполнена лидаром Zenmuse L2, установленным на дроне DJI Matrice 300 RTK. Максимальная высота съемки Zenmuse L2 достигает 120 м. Также лидар поддерживает пять возвратов, захватывает больше точек на поверхности и проникает сквозь более густую растительность [9]. В результате было получено облако точек с плотностью около 920 точек на 1 м². С целью сокращения объема работ исследование производили на участке площадью 1,5 га. Облако точек лазерного сканирования участка несомкнувшихся лесных культур Червенского лесхоза представлено на рис. 1.

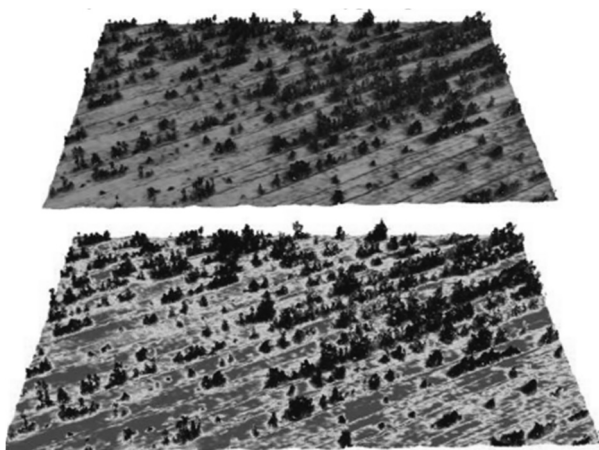


Рис. 1. Облако точек лазерного сканирования участка несомкнувшихся лесных культур

В качестве программного обеспечения для обработки данных лазерного сканирования использована географическая информационная система SAGA (System for Automated Geo-Scientific Analysis), являющаяся свободно распространяемым программным обеспечением (ПО) с открытым исходным кодом и обеспечивающая возможность редактирования пространственных данных. Благодаря совместной с Laserdata GmbH разработке, SAGA позволяет не только визуализировать, но и анализировать данные облака точек. Есть возможности для проведения классификации без обучения, выборки данных по заданному признаку, интерполяции с учетом количества зарегистрированных импульсов и диапазонов их значений [10]. Обработка данных лазерной съемки выполнена в несколько этапов.

На первом этапе удалены имеющиеся шумы и выбросы, находящиеся высоко над по-

логом леса или глубоко под землей, путем селектирования точек, имеющих высоты, значительно отличающиеся от средних высот поверхности земли и полога древостоя. Оставшиеся точки классифицировались средствами программного обеспечения SAGA GIS по поверхности земли [11–13].

На следующем этапе была построена цифровая модель поверхности земли с размером ячеек 0,2×0,2 м с бороздами, образовавшимися при создании лесных культур (рис. 2). Цифровая модель земли была сглажена с использованием фильтра Гаусса.



Рис. 2. Формирование растровой цифровой модели рельефа

Формирование растровой цифровой модели поверхности полога культур произведена аналогичным способом (рис. 3). Данные также были сглажены фильтром Гаусса с целью удаления лишних пикселей, попавших на отдельные ветви [14, 15].

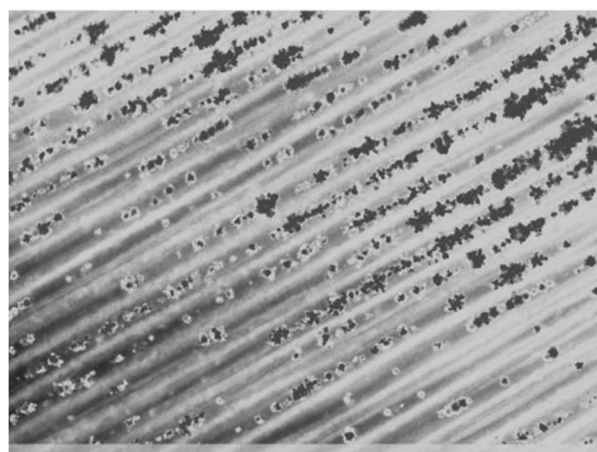


Рис. 3. Формирование растровой цифровой модели поверхности полога древостоя

После формирования цифровых моделей было определено количество вершин деревьев культур методом локальных максимумов. В результате некоторые точки попали на отвалы

борозд. С целью уменьшения ошибки произведена неконтролируемая классификация изображения на основе атрибутивных данных яркостей спектральных каналов и высотных отметок. Результат классификации представлен на рис. 4.

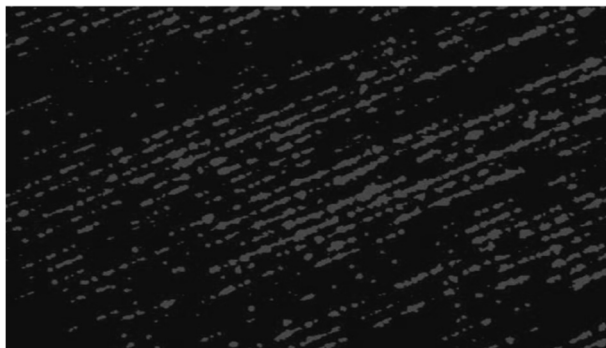


Рис. 4. Результат классификации

По результатам классификации был построен векторный полигональный слой с буферной зоной в 1 пиксель. По границам данных зон вырезаны точки, попадающие на вершины крон (рис. 5). Полученный векторный точечный слой позволяет выявить отдельные деревья лесных культур, что является важным показателем их приживаемости и роста.

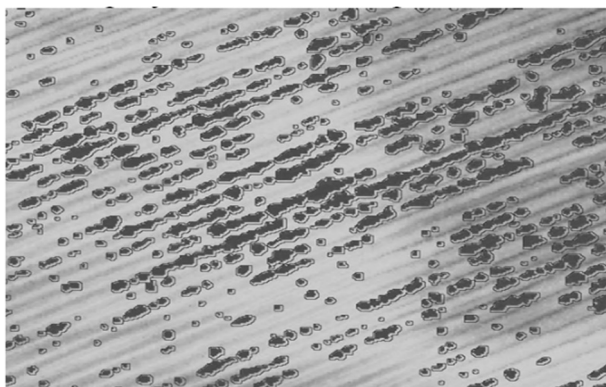


Рис. 5. Формирование векторного слоя культур

Для контроля автоматизированной оценки количества деревьев по цифровой модели произведен визуальный подсчет количества деревьев на исходном облаке точек.

Анализ результатов показал, что автоматизированным способом всего получено 2195 вершин деревьев, не попали на вершину кроны 239 точек, ошибочно определена 71 точка. Это составило примерно 10,9% неучтенных и около 3,2% ошибочных значений от общего числа. В среднем ошибка составила около 7%. Несмотря на выявленные погрешности, общая точность определения количества деревьев с использованием предложенной методики является достаточно высокой и составляет 93%.

При оценке высот было апробировано несколько вариантов определения данного показателя с последующим сравнением результатов. В первом варианте высота была определена по цифровой модели высот, полученной как разность цифровой модели полого древостоя и цифровой модели рельефа, сглаженной фильтром Гаусса с размером ячеек 0,2×0,2 м. Распределение деревьев по высотам, полученным по данной цифровой модели, приведено на рис. 6.

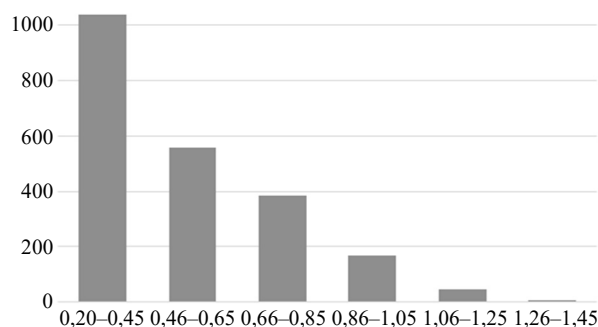


Рис. 6. Распределение деревьев по высоте

При определении высот по сглаженным моделям наблюдалось значительное занижение значений. В связи с этим был рассмотрен вариант определения высот без сглаживания. Для этого была построена цифровая модель высот с размером ячеек 0,05×0,05 м без сглаживания.

При сравнении высот, полученных по сглаженной цифровой модели с размером ячеек 0,2×0,2 м и несглаженной с размером 0,05×0,05 м, наблюдались значительные расхождения, в среднем 0,67 м. График зависимости высот представлен на рис. 7.

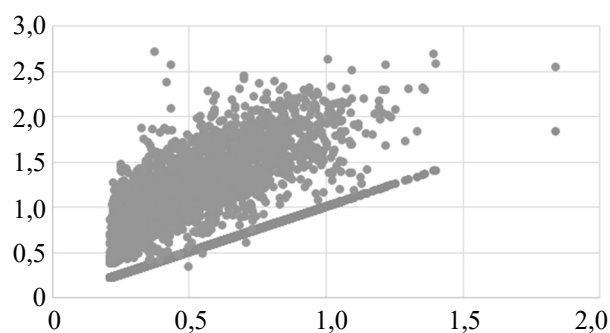


Рис. 7. График зависимости высот

Анализ результатов определения высот несомкнувшихся лесных культур по материалам лидарной съемки показал значительные отклонения оценки данного показателя. В связи с этим требуется проведение дальнейших исследований и усовершенствование методики оценки высот деревьев с использованием растровой цифровой модели.

Заключение. Согласно результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1) по материалам лидарной съемки можно определить такие параметры, как высоту культур, густоту, что позволяет выявить участки с неудовлетворительным ростом, угнетенные растения, а также оценить влияние различных факторов (почвенных, климатических) на приживаемость и развитие лесных культур;

2) несмотря на некоторую погрешность при определении количества деревьев по данным лидарной съемки, связанную с неучтенными и ошибочно определенными деревьями, общая точность оценки густоты несомкнувшихся лесных культур достаточно высокая и составляет 93%;

3) определение высот с использованием растровой цифровой модели с различными ячейками раstra дает значительное отклонение. В связи с этим требуется проведение дальнейших исследований, которые смогут повысить точность определения высот деревьев.

Использование лидарной съемки для оценки состояния несомкнувшихся лесных культур позволяет повысить эффективность лесохозяйственных мероприятий, своевременно выявить проблемные участки и принять меры по улучшению их состояния, что в конечном итоге способствует повышению продуктивности лесов и снижению экономических потерь. Важным аспектом является возможность объединения материалов лидарной съемки с другими источниками информации, такими как данные дистанционного зондирования Земли. Это позволяет проводить комплексный анализ факторов, влияющих на состояние лесных культур.

В заключение можно сказать, что использование лидарной съемки для оценки состояния несомкнувшихся лесных культур является инновационным и перспективным подходом, который обеспечивает снижение экономических и временных затрат, повышение эффективности обследования лесных культур и улучшение их состояния.

Список литературы

1. Лесные культуры: метод. указания / сост.: Н. И. Якимов, В. К. Гвоздев. Минск: БГТУ, 2019. 58 с.
2. Якимов Н. И., Гвоздев В. К., Носников В. В. Лесные культуры и защитное лесоразведение: учеб. пособие. В 2 ч. Ч. 1. Минск: БГТУ, 2019. 145 с.
3. Лесовосстановление // М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. URL: <https://mlh.gov.by/ministry/our-main-activities/lesnoe-khozyaystvo/lesovosstanovlenie/> (дата обращения: 11.03.2025).
4. Правила лесовосстановления и лесоразведения: ТКП 7667–2022 (33090). М.: Стандарты, 2022. 25 с.
5. Инструкция о порядке организации и содержании лесоустроительных работ, составе лесоустроительной документации и авторском надзоре за реализацией лесоустроительных проектов. Минск, 2017. 32 с.
6. Штукин С. С. Совершенствование организации работ по созданию лесов в Беларуси // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во. 2004. Вып. XII. С. 88–96.
7. Цай С. С., Ильчук М. А. Использование беспилотных летательных аппаратов для целей лесного хозяйства // Лесное хозяйство: материалы 87-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 17 фев. 2023 г. Минск, 2023. С. 448–450.
8. Оценка качества несомкнувшихся лесных культур в подзоне дубово-темнохвойных лесов / Е. В. Чурило [и др.] // Лесное хозяйство: материалы 88-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 24 янв. – 16 фев. 2024 г. Минск, 2024. С. 536–539.
9. Подвес с камерой DJI Zenmuse-12 // DJI-Минск. URL: <https://dji-minsk.by/catalog/ronin-series/podves-s-kameroy-dji-zenmuse-12/> (дата обращения: 11.03.2025).
10. Толкач И. В., Шульга Е. А. Определение высот и диаметров крон деревьев по данным лидарной съемки // Труды БГТУ. Сер. I, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 15–21. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-2.
11. Шульга Е. А. Построение цифровой модели высот по данным лазерного сканирования // Сб. науч. работ 74-й науч.-техн. конф. учащихся, студентов и магистрантов, Минск, 17–22 апр. 2023 г. Минск, 2023. С. 22–24.
12. Шульга Е. А., Толкач И. В. Распределение облака точек лидарной съемки в пологе и под пологом древостоев // Лесное хозяйство: материалы 87-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 31 янв. – 17 фев. 2023 г. Минск, 2023. С. 478–481.
13. Открытая настольная ГИС SAGA – общая характеристика // GIS-Lab. URL: <https://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> (дата обращения: 11.03.2025).
14. Jain Ramesh, Kasturi Rangachar, Brian G. Schunck. Machinevision. Tampa: McGraw-Hill Inc., 1995. 549 p.
15. Shih Frank Y. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. NY: WILEY, 2010. 537 p.

References

1. *Lesnyye kul'tury* [Forest crops]. Comp.: N. I. Yakimov, V. K. Gvozdev. Minsk, BSTU Publ., 2019. 58 p. (In Russian).

2. Yakimov N. I., Gvozdev V. K., Nosnikov V. V. *Lesnyye kul'tury i zashchitnoye lesorazvedeniye* [Forest crops and protective afforestation]. In 2 parts. Part 1. Minsk, BSTU Publ., 2019. 145 p. (In Russian).
3. Reforestation. Available at: <https://mlh.gov.by/ministry/our-main-activities/lesnoe-khozyaystvo/leso-voostanovlenie/> (accessed 11.03.2025) (In Russian).
4. ТКР 7667–2022 (33090). Forest restoration and afforestation rules. Moscow, Standarty Publ., 2022. 25 p. (In Russian).
5. Instruksiya o poryadke organizatsii i sodержanii lesoustroitel'nykh rabot, sostave lesoustroitel'noy dokumentatsii i avtorskom nadzore za realizatsiyey lesoustroitel'nykh proyektov [Instructions on the procedure for organizing and maintaining forest management works, the composition of forest management documentation and author's supervision of the implementation of forest management projects]. Minsk, 2017. 32 p. (In Russian).
6. Shtukin S. S. Improving the organization of forest creation works in Belarus. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series I, Forestry, 2004, issue XII, pp. 88–96 (In Russian).
7. Tsai S. S., Ilyuchik M. A. Use of unmanned aerial vehicles for forestry purposes. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: materials of the 87th scientific and technical conference of professors, research workers and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 448–450 (In Russian).
8. Churilo E. V., Kib E. K., Pimenova Zh. Yu., Teglenkov E. A., Pomaz G. M. Assessment of the quality of open forest plantations in the oak-dark coniferous forest subzone. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 88-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: materials of the 88th scientific and technical conference of professors, research workers and graduate students]. Minsk, 2024, pp. 536–539 (In Russian).
9. DJI Zenmuse-12 camera gimbal. Available at: <https://dji-minsk.by/catalog/ronin-series/podves-s-kameroy-dji-zenmuse-12/> (accessed 11.03.2025) (In Russian).
10. Tolkach I. V., Shulga E. A. Determination of heights and diameters of tree crowns based on lidar survey data. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2024, no. 1 (276), pp. 15–21. DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-2 (In Russian).
11. Shulga E. A. Construction of a digital elevation model based on laser scanning data. *Sbornik nauchnykh rabot 74-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii uchashchikhsya, studentov i magistrantov* [Collection of scientific works of the 74th scientific and technical conference of students, undergraduates and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 22–24 (In Russian).
12. Shulga E. A., Tolkach I. V. Distribution of the lidar survey point cloud in the canopy and under the canopy of tree stands. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 87-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: materials of the 87th scientific and technical conference of professors, research workers and graduate students]. Minsk, 2023, pp. 478–481 (In Russian).
13. Open desktop GIS SAGA – general characteristics. Available at: <https://gis-lab.info/qa/saga-intro.html> (accessed 11.03.2025) (In Russian).
14. Jain Ramesh, Kasturi Rangachar, Brian G. Schunck. Machinevision. Tampa, McGraw-Hill Publ., 1995. 549 p.
15. Shih Frank Y. Image processing and pattern recognition: fundamentals and techniques. NY, WILEY Publ., 2010. 537 p.

Информация об авторах

Шульга Екатерина Александровна – аспирант кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: shulga@belstu.by

Толкач Игорь Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Цай Сергей Сергеевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tsai@belstu.by

Information about the authors

Shulga Ekaterina Alexandrovna – PhD student, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shulga@belstu.by

Tolkach Igor Vladimirovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: i.tolkach@belstu.by

Tsai Siarhey Siarheevich – PhD (Agriculture), Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tsai@belstu.by

Поступила 15.03.2025