

УДК 630.587+502.3:679.78+681.3.069
Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17

Для цитирования: Инновационный учебно-научный центр мониторинга лесных ресурсов Сибири на основе лазерной и микроволновой аэрокосмической съемки / И. М. Данилин, В. А. Лапко, А. А. Кузнецов и др. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 1. С. 8–17. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17.

For citation: Danilin I. M., Lapko V. A., Kuznetsov A. A. et al. [Innovative educational and research center for monitoring forest resources of Siberia based on laser and microwave aerospace imaging]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 1, P. 8–17. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-8-17.

Инновационный учебно-научный центр мониторинга лесных ресурсов Сибири на основе лазерной и микроволновой аэрокосмической съемки

И. М. Данилин^{*1,3}, В. А. Лапко^{1,2}, А. А. Кузнецов¹, И. А. Бабий^{1,3}, А. О. Вайсман^{1,3}

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

²Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/44

³Институт леса имени В. Н. Сукачева СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 50/28

*E-mail: danilin@ksc.krasn.ru

Обсуждаются возможности создания на базе кафедры космических средств и технологии Сибирского государственного университета науки и технологий имени М. Ф. Решетнева инновационного учебно-научного центра мониторинга лесных ресурсов Сибири с целью подготовки инженерных кадров высшей квалификации и проведения перспективных научных исследований в области мониторинга, моделирования, прогнозирования и управления лесными ресурсами. Предлагаются методические решения и алгоритмы трехмерного моделирования структуры и динамики леса по данным лазерного сканирования, цифровой аэро- и космической съемки. Эти методы способствуют оперативному мониторингу и позволяют значительно снизить стоимости по контролю состояния и использования лесных ресурсов на огромной территории Сибири. Данные дистанционного зондирования представляются в виде геотрансформированной базы данных и цифровой фотокарты, совместимых в форматах с системами автоматизированного проектирования и основными геоинформационными системами – ArcView, ArcINFO, MapINFO. Инновационный центр мониторинга будет использован для оперативного государственного контроля и мониторинга лесопользования, состояния лесных земель, лесоустройства и инвентаризации лесов; решения задач экологии и природопользования, геоэкологии; формирования кадастра лесных ресурсов; аэрокосмических методов исследования природных ресурсов и территорий, информационных технологий. Решение данных задач позволит осуществлять подготовку специалистов высокой и высшей квалификации. Специалистами центра планируется создавать информационные технологии дистанционного зондирования природных объектов с целью импортозамещения зарубежных программных продуктов. Основные научные направления создаваемого центра: разработка и исследование методики системного анализа многомерных данных дистанционного зондирования большого объема на основе непараметрических алгоритмов принятия решений и технологий параллельных вычислений; проверка гипотез о распределениях данных дистанционного зондирования большого объема, основанных на непараметрических алгоритмах распознавания образов ядерного типа; обнаружение компактных групп данных дистанционного зондирования большого объема, соответствующих одно-модальным фрагментам совместной плотности вероятности многомерных случайных величин.

Ключевые слова: инновационные методы дистанционного зондирования лесов, программные средства, моделирование, подготовка инженерных кадров высшей квалификации, Сибирь, Красноярский край.

Innovative educational and research center for monitoring forest resources of Siberia based on laser and microwave aerospace imaging

I. M. Danilin^{*1,3}, V. A. Lapko^{1,2}, A. A. Kuznetsov¹, I. A. Babiy^{1,3}, A. O. Vaysman^{1,3}

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Institute of Computational Modelling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Sukachev Institute of Forest SB RAS
50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

*E-mail: danilin@ksc.krasn.ru

The possibilities of creating an innovative educational and scientific center for monitoring forest resources in Siberia on the basis of the Department of Space Facilities and Technologies of the Siberian State University of Science and Technology named after Mikhail Fedorovich Reshetnev are discussed, with the aim of training highly qualified engineering personnel and conducting promising scientific research in the field of monitoring, modeling, forecasting and management of forest resources. Methodological solutions and algorithms for three-dimensional modeling of forest structure and dynamics based on laser scanning data, digital aerial and space photography are proposed. These methods contribute to operational monitoring and can significantly reduce the cost of monitoring the condition and use of forest resources over the vast territory of Siberia. Remote sensing data is presented in the form of a geotransformed database and digital photo map, compatible in formats with computer-aided design systems and with the main geographic information systems – ArcView, ArcINFO, MapINFO. The innovative monitoring center will be used for operational state control and monitoring of forest management, the state of forest lands, forest management and forest inventory, solving problems of ecology and environmental management, geoecology, formation of a forest resource inventory, aerospace methods for studying natural resources and territories, information technology. Solving these problems will allow for the training of highly qualified specialists. The center's specialists plan to create information technologies for remote sensing of natural objects with the aim of import substitution of foreign software products. The main scientific directions of the created center: development and research of methods for system analysis of large-scale multidimensional remote sensing data based on nonparametric decision-making algorithms and parallel computing technologies; testing hypotheses about the distributions of large-volume remote sensing data based on nonparametric nuclear-type pattern recognition algorithms; detection of compact groups of large-volume remote sensing data corresponding to unimodal fragments of the joint probability density of multivariate random variables.

Keywords: innovative methods of remote sensing of forests, software, modeling, training of highly qualified engineering personnel, Siberia, Krasnoyarsk Krai.

Введение

Важнейшим компонентом биосферы и источником ресурсов являются леса, своевременная обеспеченность информацией о состоянии которых позволяет осуществлять устойчивое управление лесами, контроль и охрану окружающей среды, исследования в области глобальных изменений биосферы и климата. Необходимость мониторинга обширных лесных территорий Сибири позволяет рассматривать дистанционные методы в качестве приоритетных источников информации о состоянии и динамике лесов, что определяет актуальность развития соответствующих методов обработки получаемых данных. Использование методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) обеспечивает достаточный уровень достоверности данных о состоянии лесного покрова, в том числе для измерения ключевых характеристик лесной биомассы. Находят применение такие методы ДЗЗ, как наземное (TLiDAR) и воздушное лазерное сканирование (LiDAR), цифровая аэросъемка с воздушных летательных аппаратов, в том числе беспилотных авиационных систем (БАС), спутниковые снимки. Использование инновационных аэрокосми-

ческих методов зондирования земных покровов (лазерной, микроволновой аэро- и космической съемки, спутникового геопозиционирования) обеспечивают принципиально новые возможности для мониторинга лесных ресурсов на обширных просторах Сибири. Высокая эффективность импульсной лазерной локации в сочетании с субметровым пространственным разрешением микроволновой аэро- и космической съемки, непараметрические методы распознавания образов позволяют разработать эффективную систему оценки фактического состояния лесов. Трехмерное моделирование лесной растительности является первоочередной задачей при построении лесных ландшафтных сцен, так как именно качественные модели растительности отвечают за реалистичную визуализацию трехмерных сцен участков леса. Кроме того, математическое моделирование растительности по данным лазерного сканирования позволяет рассчитывать достоверные и высокоточные параметры биомассы и морфометрические показатели структуры насаждений [1–11].

Современные методы комплексного анализа данных дистанционного зондирования являются основой создания региональных геоинформационных систем, обеспечивающих оперативность получения требуемой информации и поддержку принятия управленческих решений. Повышение эффективности обработки больших массивов данных дистанционного зондирования на основе непараметрических систем обработки информации является актуальной задачей и обеспечивает импортозамещение зарубежных программных продуктов. Их применение позволит значительно повысить точность и оперативность решения задач поддержки принятия решений по данным дистанционного зондирования. Предполагается создать методы комплексного анализа данных дистанционного зондирования, которые станут основой решения важнейших задач освоения природных ресурсов Севера и Сибири, связанных с исследованием пространственно-временной динамики состояний лесных массивов [12–17].

1. Обоснование создания центра

Разработка и внедрение в практику такого высокоэффективного комплекса мониторинга лесов и лесопользования на территории Сибири является крайне актуальной задачей, поскольку информация данных лесоустройства в значительной степени устарела (30 и более лет) и не отражает реального состояния лесов в связи с вырубками и пожарами. Традиционные методы инвентаризации лесных ресурсов на сегодняшний день не эффективны и не обеспечивают требуемой точности, а также высокзатратны по стоимости и времени выполнения [2–5; 9; 18] (рис. 1, 2).

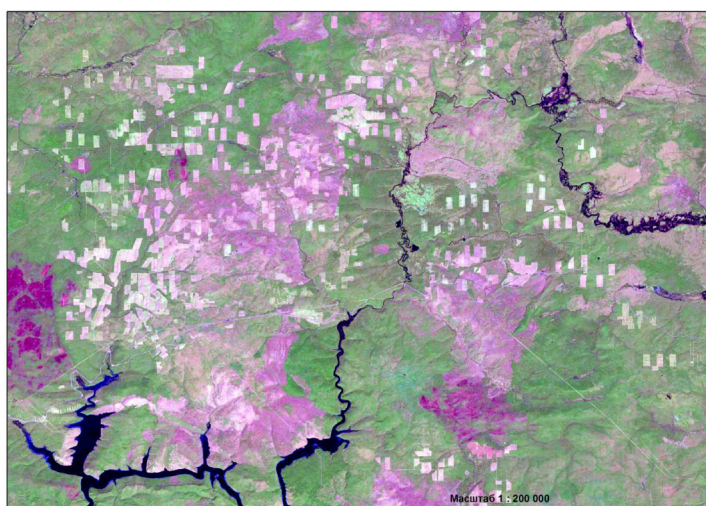


Рис. 1. Вырубки арендной территории Лесосибирского ЛДК № 1 (Богучанский и Кежемский районы Красноярского края). Спутниковый снимок Landsat-8TM, 2022 г.

Fig. 1. Deforestation of the leased territory of Lesosibirsk LDK No. 1 (Boguchansky and Kezhemsky districts of Krasnoyarsk Krai). Landsat-8TM satellite image, 2022

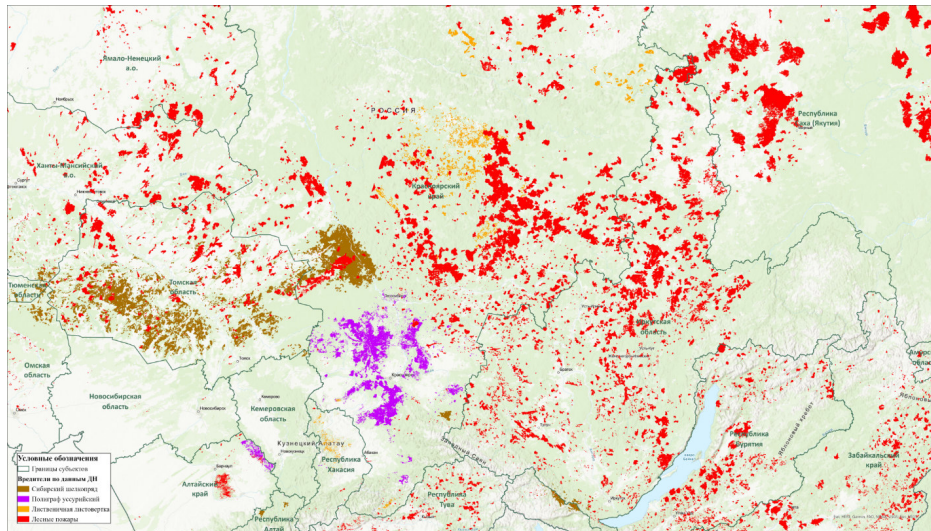


Рис. 2. Нарушенность лесов Сибири лесными пожарами и вспышками массового размножения насекомых-вредителей

Fig. 2. Disturbance of Siberian forests by forest fires and outbreaks of insect pests' mass reproduction

Целью проекта является создание инновационного учебно-научного центра для подготовки инженерных кадров высшей квалификации, проведение перспективных научных исследований в области разработки новых методов дистанционного зондирования лесов и других природных ресурсов, разработка комплекса объективного и высокоточного контроля и мониторинга состояния лесных ресурсов и лесопользования в Сибири на основе интегрирования лазерной и микроволновой аэро- и космической съемки и спутникового геопозиционирования, которые являются основой принципиально новой системы мониторинга, моделирования, прогнозирования и управления лесными ресурсами [19; 20].

Предлагаемый интегрированный мультисенсорный подход, инновационный математический и программный аппарат позволяют быстро и точно определять количественные и качественные характеристики лесов.

Предлагаемые методические решения и алгоритмы трехмерного моделирования структуры и динамики леса по данным лазерного сканирования, цифровой аэро- и космической съемки являются пионерными, способствующими более эффективному оперативному и значительно (в 2 и более раза) менее затратному по стоимости и ресурсам контролю и мониторингу состояния и использования лесных ресурсов на огромной территории Сибири [21–24].

При использовании метода достигается гораздо более высокая точность лазерных и микроволновых определений биометрических и таксационных показателей деревьев и древостоев, чем при традиционных наземных лесоинвентаризационных работах. Данные лазерной локализации и микроволнового сканирования представляются в виде геотрансформированной (введенной в систему реальных географических координат) базы данных и цифровой фотокарты, совместимых в форматах с системами автоматизированного проектирования (САПР) и основными геоинформационными системами – ArcView, ArcINFO, MapINFO (рис. 3).

2. Перспективы центра

Разработка и внедрение комплекса в практику дистанционного мониторинга лесопользования на региональном уровне позволит обеспечить оперативное получение актуальных достоверных и высокоточных данных о состоянии лесных ресурсов, обеспечит надежную информационную основу для контроля результатов хозяйственной деятельности в использовании лесов, существенно повысит экономическую и экологическую эффективность управления в сфере лесопользования [25–27].

Создание и работу инновационного учебно-научного центра предлагается осуществлять в рамках направлений региональной технологической платформы Красноярского края «Инновационные технологии комплексного использования лесных ресурсов» при тесном сотрудничестве и кооперации с институтами Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», Министерством природных ресурсов и экологии Красноярского края, Министерством лесного хозяйства Красноярского края, предприятиями лесного комплекса Сибири.

Проект соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в РФ, критическим технологиям (согласно Перечню, в Указе Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899): 04 – Информационно-телекоммуникационные системы; 06 – Рациональное природопользование. Технологии оценки ресурсов и прогнозирования состояния литосферы и биосферы. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния природной среды. Коды и наименования рубрик ГРНТИ: 25.00.34; 36.23.25; 36.29.33; 68.00.00; 68.47.31; 68.47.33; 89.57.15; 89.57.45.

Области коммерческого использования результатов проекта: оперативный государственный контроль и мониторинг лесопользования и состояния лесных земель, лесное хозяйство, лесоустройство и инвентаризация лесов, экология и природопользование, геоэкология, формирование кадастра лесных ресурсов, аэрокосмические методы исследования природных ресурсов и территорий, информационные технологии, образование и подготовка специалистов высокой и высшей квалификации.

Научный задел, уровень практической реализации. Разработан приборный комплекс и технологии дистанционного зондирования леса на основе импульсных лазерных и микроволновых аэро- и космических сенсоров высокого разрешения: DJI Matrice 300 RTK, RIEGL RiCOPTER VUX-1, Leica ALS 60+RCD 30 (60 MP 6 мкм) + NovAtel OEM 5 GPS/ГЛОНАСС, WorldView-2, GeoEye-2, Radarsat II.

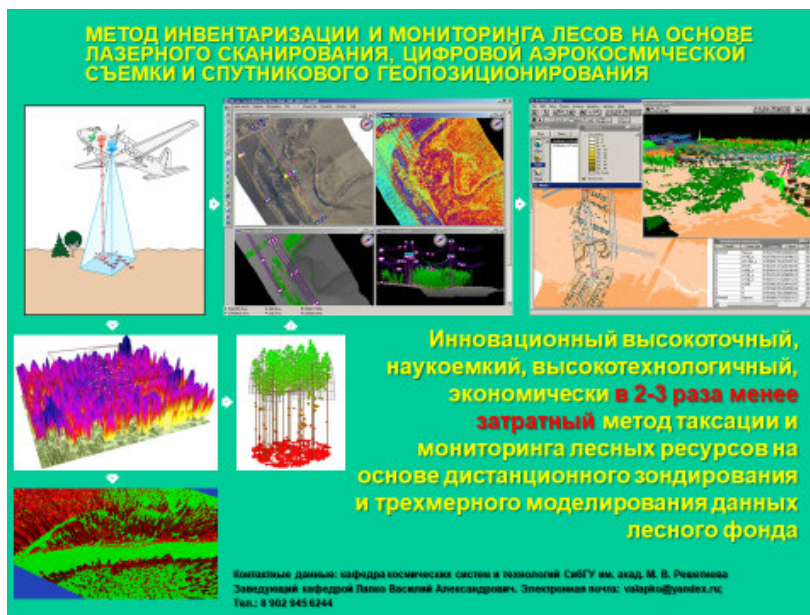


Рис. 3. Метод инвентаризации и мониторинга лесов на основе лазерного сканирования, цифровой аэрокосмической съемки и спутникового геопозиционирования

Fig. 3. Method of forest inventory and monitoring based on laser scanning, digital aerospace photography and satellite geopositioning

Разработаны методы и программные продукты для оценки структуры леса по данным лазерной, микроволновой и цифровой аэро- и космической съемки, цифровые модели земной поверхности и лесного покрова районов Красноярского края. Выполнено трехмерное цифровое картографирование лесных территорий Красноярского края в масштабах М 1:200000 и крупнее

для целей государственного контроля, детальной инвентаризации и мониторинга лесных ресурсов, в том числе с использованием беспилотных авиационных систем (рис. 4).

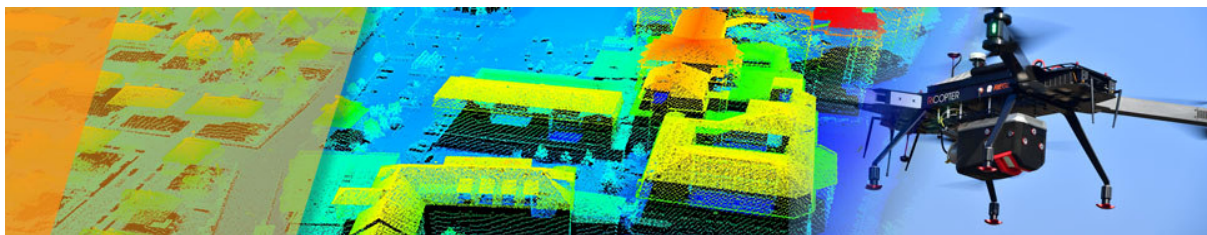


Рис. 4. Беспилотные авиационные системы лазерного сканирования и аэросъемки, используемые в проекте

Fig. 4. Unmanned aircraft laser scanning and aerial photography systems used in the project

Качественный и количественный состав исполнителей проекта. В составе исполнителей проекта 5 докторов наук, профессоров, 5 кандидатов наук, 3 аспиранта (СибГУ, ФИЦ КНЦ СО РАН), 2 инженера-испытателя, 5 магистров и 5 бакалавров кафедры КСТ СибГУ им. М. Ф. Решетнева.

Основные ожидаемые результаты. По теме проекта осуществляется подготовка кадров высшей квалификации (магистры, кандидаты и доктора наук), опубликовано более 30 научных статей в рецензируемых российских и международных журналах, 5 монографий, 3 учебных пособия, получено 3 патента РФ. Реализация проекта позволит внедрить технологический и программный комплекс в систему мониторинга лесных ресурсов и лесного хозяйства Красноярского края и других регионов Сибири, подготовить высококвалифицированные кадры, создать не менее 30 дополнительных высокотехнологичных рабочих мест, привлечь инвестиции в объеме не менее 150 млн рублей в год, за счет средств арендаторов лесных участков, лесо- и природопользователей.

Формы внедрения и защиты интеллектуальной собственности: технология – 1; опытный образец – 1; авторские свидетельства – 3; патенты – 3; свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ – 5; учебно-методические издания – 3; статьи в рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК, РИНЦ, RSCI, Scopus, WoS (Q 1–3) – 15.

Планируемый бюджет проекта: ~ 50 млн руб. в год (2024–2028 гг.). Научные руководители проекта: Лапко Василий Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой космических систем и технологий СибГУ имени академика М. Ф. Решетнева; Данилин Игорь Михайлович, доктор сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник лаборатории таксации и лесопользования Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, профессор кафедры космических систем и технологий СибГУ имени М. Ф. Решетнева.

Заключение

В результате реализации проекта будет достигнута значительная экономия бюджетных средств за счет снижения затрат на проведение работ по государственному контролю лесопользования и инвентаризации лесов. Будет гарантированно обеспечены более высокая точность определения запасов древесины, снижение ошибки результатов определений в 3–4 раза, увеличение поступлений в местные и региональные бюджеты за пользование лесом на 20–25 % за счет получения актуальных и достоверных учетных данных о состоянии лесов.

Библиографические ссылки

1. Госьков Е. А., Воробьева Т. А., Воробьев И. Б. Лазерное сканирование в исследовании структуры древостоев верхней границы леса на южном Урале // Леса России и хозяйство в них. 2022. № 2. С. 4–10.

2. Данилин А. И., Данилин И. М. Свищев Д. А. Зондирование лесного покрова высокочастотными импульсными лазерами и цифровыми аэро- и космическими фотоаппаратами сверхвысокого разрешения: опыт применения в Сибири // Вестник СибГАУ. 2013. № 5 (51). С. 85–89.
3. Данилин И. М., Соколов В. А., Целитан И. А. О возможностях лазерной локации для целей лесной таксации // Актуальные проблемы развития лесного комплекса : материалы Междунар. науч.-технич. конф. (01 декабря 2020 г., г. Вологда) / Вологодский гос. ун-т. Вологда, 2020. С. 1–5.
4. Данилин И. М., Фаворская М. Н. Описание программных модулей использования данных лазерной локации и цифровой аэрофотосъемки лесных территорий // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 62–73.
5. Данилин И. М., Целитан И. А. Алгоритмы обработки данных лазерного сканирования и автоматизированного определения таксационных параметров лесных насаждений // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : материалы VI Междунар. конф. (10–13 сентября 2019 г., г. Красноярск). Красноярск : Сиб. фед. ун-т, 2019. С. 86–91.
6. Развитие и применение информационных технологий исследования природных ресурсов территорий Сибири на основе данных дистанционного зондирования : монография / И. В. Зеньков, С. Т. Им, А. В. Лапко и др. Красноярск : СибГАУ, 2017. 280 с.
7. Ткачева А. А., Данилин И. М. Использование данных лазерного сканирования в моделировании лесных ландшафтных сцен // Журнал СФУ. Серия «Техника и технологии». 2017. Т. 10, № 6. С. 727–740.
8. Усольцев В. А., Цепордей И. С., Данилин И. М. Модели фитомассы деревьев березы и осины для дистанционного зондирования в климатических градиентах Евразии // Лесоведение. 2022. № 5. С. 451–460.
9. Babiy I. A., Im S. T., Kharuk V. I. Estimating aboveground forest biomass using radar methods // Contemporary Problems of Ecology. 2022. Vol. 15. P. 433–448.
10. Blackburn R. C., Buscaglia R., Meador A. J. C. Mixtures of airborne lidar-based approaches improve predictions of forest structure // Canadian Journal of Forest Research. 2021. Vol. 51, No. 8. P. 36.
11. Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends / N. C. Coops, P. Tompalski, T. R. H. Goodbody et al. // Remote Sensing of Environment. 2021. Vol. 260, Iss. 3. P. 112477.
12. Лапко А. В., Лапко В. А. Непараметрические алгоритмы оценивания состояний природных объектов // Автометрия. 2018. Т. 54, № 5. С. 33–39.
13. Непараметрический алгоритм выделения классов, соответствующих одномодальным фрагментам плотности вероятности многомерных случайных величин / А. В. Лапко, В. А. Лапко, С. Т. Им и др. // Автометрия. 2019. Т. 55, № 3. С. 22–30.
14. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объема и его применение / И. В. Зеньков, А. В. Лапко, В. А. Лапко и др. // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 2. С. 253–260.
15. Методика последовательного формирования набора компонент многомерной случайной величины с использованием непараметрического алгоритма распознавания образов / И. В. Зеньков, А. В. Лапко, В. А. Лапко и др. // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 6. С. 926–933.
16. Lapko A. V., Lapko V. A., Tuboltsev V. P. Nonparametric System for Automatic Classification of Large-Scale Statistical Data // Pattern Recognition and Image Analysis. 2023. Vol. 33, No. 3. P. 576–583.
17. Лапко А. В., Лапко В. А. Ядерные оценки плотности вероятности и их применение : монография. Красноярск : СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021. 308 с.
18. Danilin I. M., Medvedev E. M. Technology for monitoring and inventory of forest resources based on laser location, digital aerial photography and satellite geopositioning // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technology. 2011. Vol. 4, No. 3. P. 326–336.

19. An improved area-based approach for estimating plot-level tree DBH from airborne LiDAR data / Z. Zhang, T. Wang, A. K. Skidmore et al. // *Forest Ecosystems*. 2023. Vol. 10. Article 100089. 10 p.
20. Zhou K., Cao L., Shen X., Wang G. Novel spectral indices for enhanced estimations of 3-dimensional flavonoid contents for *Ginkgo* plantations using UAV-borne LiDAR and hyperspectral data // *Remote Sensing of Environment*. 2023. Vol. 229. Article 113882.
21. Dong P., Chen Q. *LiDAR remote sensing and applications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018, 200 p.
22. Henn K. A., Peduzzi A. Biomass estimation of urban forests using LiDAR and high-resolution aerial imagery in Athens-Clarke County, GA // *Forests*. 2023 Vol. 14, Iss. 5. Article 1064. 23 p.
23. A simple and integrated approach for fire severity assessment using bi-temporal airborne LiDAR data / T. Hu, Q. Ma, Y. Su. et al. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019. Vol. 78, Iss. 1. P. 25–38.
24. Parra A., Simard M. Evaluation of tree-growth rate in the Laurentides Wildlife Reserve using GEDI and airborne-LiDAR data // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, Iss. 22. Article 5352. 18 p.
25. TerraScan – Software for LiDAR Data Processing and 3D Vector Data Creation. Helsinki: Terrasolid, 2019. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.terrasolid.com/products/terrascanpage.php#tsuav> (дата обращения: 23.10.2023).
26. Demonstrating the transferability of forest inventory attribute models derived using airborne laser scanning data / P. Tompalski, J. C. White, N. C. Coops, M. A. Wulder // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 227. P. 110–124.
27. Improving generalized models of forest structure in complex forest types using area- and voxel-based approaches from lidar / A. A. Whelan, J. B. Cannon, S. W. Bigelow et al. // *Remote Sensing of Environment*. 2023. Vol. 284. Article 113362.

References

1. Gos'kov E. A., Vorob'eva T. S., Vorob'ev I. B. [Laser scanning in the study of the structure of forest stands of the upper forest boundary in the southern Urals]. *Lesa Rossii i khozyaystvo v nikh*. 2022, No. 2, P. 4–10 (In Russ.).
2. Danilin A. I., Danilin I. M., Svishev D. A. [Scanning of forest cover with high-frequency pulsed lasers and ultra-high-resolution digital aero- and space-based cameras: experience of application in Siberia]. *Vestnik SibGAU*. 2013, No. 5 (51), P. 85–89 (In Russ.).
3. Danilin I. M., Sokolov V. A., Tselitan I. A. [On the possibilities of laser ranging for forest inventory purposes] *Aktual'nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunarodnoy nauchno.-tekhnicheskoy konferentsii* [Current problems in the development of the forestry complex: Proceedings of the International Scientific-technical conference]. Vologda, 2020, 5 p. (In Russ.).
4. Danilin I. M., Favorskaya M. N. [Description of software modules for using laser ranging data and digital aerial photography of forest areas] *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2013, No. 2, P. 62–73 (In Russ.).
5. Danilin I. M., Tselitan I. A. [Algorithms for processing laser scanning data and automated determination of taxation parameters of forest plantations]. *Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: Materialy VI mezhdunarodnoy konferentsii, Krasnoyarsk* [Regional problems of remote sensing of the Earth: Proceedings of the VI International Conference]. 2019, Krasnoyarsk, P. 86–91 (In Russ.).
6. Zenkov I. V., Im S. T., Lapko A. V. et al. *Razvitie i primeneniye informatsionnykh tekhnologiy issledovaniya prirodnikh resursov territoriy Sibiri na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya* [Development and application of information technologies for studying the natural resources of Siberian territories based on remote sensing data]. Krasnoyarsk, SibGAU Publ., 2017, 280 p. (In Russ.).

7. Tkacheva A. A., Danilin I. M. [Using laser scanning data in modeling forest landscape scenes]. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii*. 2017, Vol. 10, No. 6, P. 727–740 (In Russ.).
8. Usolt'sev V. A., Tsepordey I. S., Danilin I. M. [Birch and aspen tree phytomass models for remote sensing across climate gradients in Eurasia]. *Lesovedenie*. 2022, No. 5, P. 451–460 (In Russ.).
9. Babi'y I. A., Im S. T., Kharuk V. I. Estimating aboveground forest biomass using radar methods. *Contemporary Problems of Ecology*. 2022, Vol. 15, P. 433–448.
10. Blackburn R. C., Buscaglia R., Meador A. J. C. Mixtures of airborne lidar-based approaches improve predictions of forest structure. *Canadian Journal of Forest Research*. 2021, Vol. 51, No. 8, 36 p.
11. Coops N. C., Tompalski P., Goodbody T. R. H. et al. Modelling lidar-derived estimates of forest attributes over space and time: A review of approaches and future trends. *Remote Sensing of Environment*. 2021, Vol. 260, Iss. 3, Article 112477.
12. Lapko A. V., Lapko V. A. Nonparametric algorithms for estimating the states of natural objects. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018, Vol. 54, No. 5, P. 451–456.
13. Lapko A. V., Lapko V. A., Im S. T. et al. Nonparametric algorithm of identification of classes corresponding to single-mode fragments of the probability density of multidimensional random variables. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2019, Vol. 55, No. 3, P. 230–236.
14. Zenkov I. V., Lapko A. V., Lapko V. A. et al. A nonparametric algorithm for automatic classification of large multivariate statistical data sets and its application. *Computer Optics*. 2021, Vol. 45, No 2, P. 253–260.
15. Zenkov I. V., Lapko A. V., Lapko V. A. et al. A method of sequentially generating a set of components of a multidimensional random variable using a nonparametric pattern recognition algorithm. *Computer Optics*. 2021, Vol. 45, No. 6, P. 926–933.
16. Lapko A. V., Lapko V. A., Tuboltsev V. P. Nonparametric System for Automatic Classification of Large-Scale Statistical Data. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2023, Vol. 33, No. 3, P. 576–583.
17. Lapko A. V., Lapko V. A. *Yadernye ocenki plotnosti veroyatnosti i ih primeneniye* [Kernel probability density estimates and their applications]. Krasnoyarsk, SibGU Publ., 2021, 308 p. (In Russ.).
18. Danilin I. M., Medvedev E. M. Technology for monitoring and inventory of forest resources based on laser location, digital aerial photography and satellite geopositioning. *Journal SFU Engineering & Technology*. 2011, Vol. 4, No. 3, P. 326–336.
19. Zhang Z., Wang T., Skidmore A. K. et al. An improved area-based approach for estimating plot-level tree DBH from airborne LiDAR data. *Forest Ecosystems*. 2023, Vol. 10, Article 100089, 10 p.
20. Zhou K., Cao L., Shen X., Wang G. Novel spectral indices for enhanced estimations of 3-dimentional flavonoid contents for *Ginkgo* plantations using UAV-borne LiDAR and hyperspectral data. *Remote Sensing of Environment*. 2023, Vol. 229, Article 113882.
21. Dong P., Chen Q. LiDAR remote sensing and applications. *Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group*. 2018, 200 p.
22. Henn K. A., Peduzzi A. Biomass estimation of urban forests using LiDAR and high-resolution aerial imagery in Athens-Clarke County, GA. *Forests*. 2023, Vol. 14, Iss. 5, Article 1064, 23 p.
23. Hu T., Ma Q., Su. Y. et al. A simple and integrated approach for fire severity assessment using bi-temporal airborne LiDAR data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2019, Vol. 78, Iss. 1, P. 25–38.
24. Parra A., Simard M. Evaluation of tree-growth rate in the Laurentides Wildlife Reserve using GEDI and airborne-LiDAR data. *Remote Sensing*. 2023, Vol. 15, Iss. 22, Article 5352, 18 p.
25. TerraScan – Software for LiDAR Data Processing and 3D Vector Data Creation. [Helsinki: Terrasolid, 2019]. Available at: <http://www.terrasolid.com/products/terrascanpage.php#tsuav> (accessed: 23.10.2023).

26. Tompalski P., White J. C., Coops N. C., Wulder M. A. Demonstrating the transferability of forest inventory attribute models derived using airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*. 2019, Vol. 227, P. 110–124.
27. Whelan A. A., Cannon J. B., Bigelow S. W. et al. Improving generalized models of forest structure in complex forest types using area- and voxel-based approaches from lidar. *Remote Sensing of Environment*. 2023, Vol. 284, Article 113362.

© Данилин И. М., Лапко В. А., Кузнецов А. А., Бабий И. А., Вайсман А. О., 2024

Данилин Игорь Михайлович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры космических средств и технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: danilin@ksc.krasn.ru.

Лапко Василий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры космических средств и технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Институт вычислительного моделирования ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: valapko@yandex.ru.

Кузнецов Александр Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры прикладной математики; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: kuznetsov@mail.sibsau.ru.

Бабий Игорь Андреевич – инженер кафедры космических средств и технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: babiyia@mail.sibsau.ru.

Вайсман Александр Олегович – аспирант кафедры космических средств и технологий; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева, Институт леса им. В. Н. Сукачева ФИЦ КНЦ СО РАН. E-mail: sashavaismman1337@gmail.com.

Danilin Igor Mikhailovich – Dr. Sc., Professor of the Department of Space Facilities and Technologies; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Sukachev Institute of Forest SB RAS. E-mail: danilin@ksc.krasn.ru.

Lapko Vasily Aleksandrovich – Dr. Sc., Professor of the Department of Space Facilities and Technologies; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Institute of Computational Modelling SB RAS. E-mail: valapko@yandex.ru.

Kuznetsov Alexander Alekseevich – Dr. Sc., Professor of the Department of Applied Mathematics; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: kuznetsov@mail.sibsau.ru.

Babiy Igor Andreevich – Engineer of the Department of Space Facilities and Technologies; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Sukachev Institute of Forest SB RAS. E-mail: babiyia@mail.sibsau.ru.

Vaisman Alexander Olegovich – Postgraduate student of the Department of Space Facilities and Technologies; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Sukachev Institute of Forest SB RAS. E-mail: sashavaismman1337@gmail.com.
