

Information about authors

Roman V. Mikhailishchev – lead engineer of the botanical garden of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira str., 19, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3035-2010>, e-mail: rmichaliszczew@gmail.com.

Viktor V. Valdayskikh – Cand. Sci. (biol.), director of the botanical garden of Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira str., 19, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9440-8522>, e-mail: v_vald@mail.ru.

Elena P. Artemyeva – Cand. Sci. (biol.), lead engineer of the botanical garden, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Mira str., 19, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; associate professor of natural sciences department, Ural State University of Railway Transport, Kolmogorova str., 66, Yekaterinburg, 620034, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0937-460X>, e-mail: EAtemeva@usurt.ru.



Верификация данных дистанционного зондирования Земли с целью определения надземной фитомассы насаждений в Воронежской области

Василий А. Славский¹✉, slavskiyva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6579-0344>

Дарья А. Литовченко¹, timashchuk90@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

Анна В. Иванова¹✉, anna_iv_1989@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3972-4378>

Максим В. Ларионов², m.larionow2014@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0834-2462>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ)», Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация

Развитие методов дистанционного зондирования Земли, нейросетевых технологий, создание моделей машинного обучения и т.д., позволят разработать новые алгоритмы, показатели и критерии, которые существенно повысят эффективность лесного мониторинга и способствуют снижению финансовых издержек. Основой для выполнения работы являлась верификация данных спутниковых снимков сверхвысокого и высокого разрешения по материалам натурного обследования, проводимого на постоянных пробных площадях в Воронежской области. Сформированные элементы обучающих выборок с использованием нейросетевого классификатора, позволяют в автоматизированном режиме с высокой степенью точности определить таксационные показатели насаждения на основе данных ДЗЗ. При верификации количества надземной фитомассы, рассчитанной по данным ДЗЗ и материалам натурного обследования, выявлено значительное сходство представленных результатов. В 67 % случаев средние значения фитомассы, определенные разными методами, достоверно не отличались друг от друга (на уровне значимости $p < 0,05$). Достоверные различия были обнаружены в лиственных насаждениях с высокой горизонтальной сомкнутостью полога, наличием второго яруса и обильной подпологовой растительностью. В результате работы заложена теоретическая основа для дальнейших исследований при проведении дистанционного мониторинга в области охраны, защиты и воспроизводства лесов. Материал работы полезен в выстраивании многопрофильной практической работы в сферах восстановления биологического разнообразия фитоценозов, а также обеспечения целостности и экологической стабильности лесов при современных трендах углеродных циклов и климатических изменений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лесной мониторинг, верификация данных ДЗЗ, состояние насаждений, оценка фитомассы, низкоуглеродное развитие, модели машинного обучения

Финансирование: Выполнение данной научно-исследовательской работы является этапом Государственного контракта Федерального агентства лесного хозяйства № 0373100032224000014 на тему «Разработка комплекса научно обоснованных мер регулирования по обеспечению низкоуглеродного развития лесного хозяйства в целях достижения показателей стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов».

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Верификация данных дистанционного зондирования Земли с целью определения надземной фитомассы насаждений в Воронежской области / В. А. Славский, Д. А. Литовченко, А. В. Иванова, М. В. Ларионов // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 4 (56). – С. 63-84. – Библиогр.: с. 80-83 (22 назв.) – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/5>.

Поступила 05.11.2024. *Пересмотрена* 7.11.2024. *Принята* 14.12.2024. *Опубликована онлайн* 27.12.2024

Article

Verification of Earth remote sensing data in order to determine the aboveground phytomass of plantings in the Voronezh Region

Vasily A. Slavskiy¹✉, slavskiyva@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-6579-0344>

Daria A. Litovchenko¹, timashchuk90@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

Anna V. Ivanova¹✉, anna_iv_1989@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-3972-4378>

Maxim V. Larionov², m.larionow2014@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-0834-2462>

¹*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazeva str., Voronezh, 394087, Russian Federation*

²*Russian Biotechnological University (ROSBIOTECH), 11, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125080, Russian Federation*

Abstract

The development of Earth remote sensing methods, neural network technologies, creation of machine learning models, etc. will allow developing new algorithms, indicators and criteria that will significantly increase the efficiency of forest monitoring and help reduce financial costs. The basis for the work was the verification of ultra-high- and high-resolution satellite imagery data based on in-situ survey materials conducted on permanent test plots in the Voronezh region. The generated elements of training samples using a neural network classifier allow for automated, highly accurate determination of forest stand taxation indicators based on remote sensing data. When verifying the amount of aboveground phytomass calculated based on remote sensing data and in-situ survey materials, significant similarity of the presented results was revealed. In 67% of cases, the average phytomass values determined by different methods did not differ significantly from each other (at a significance level of $p < 0.05$). Reliable differences were found in deciduous stands with high horizontal canopy density, the presence of a second tier and abundant understory vegetation. As a result of the work, a theoretical basis was laid for further research in conducting remote monitoring in the field of forest conservation, protection and reproduction. The material of the work is useful in building multidisciplinary practical work in the areas of restoration of biological diversity of phytocenoses, as well as ensuring the integrity and ecological stability of forests, under modern trends in carbon cycles and climate changes.

Keywords: *remote sensing, forestry monitoring, verification of remote sensing data, planting condition, phytomass assessment, low-carbon development, machine learning models*

Funding: The implementation of this research work is a stage of the State Contract of the Federal Forestry Agency No. 0373100032224000014 on the topic of “Development of a set of scientifically based regulatory measures to ensure low-carbon development of forestry in order to achieve the indicators of the strategy for the socio-economic development of the Russian Federation with a low level of greenhouse gas emissions.”

Acknowledgments: The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of the article.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Slavskiy V. A., Litovchenko D. A., Ivanova A. V., Larionov M. V. (2024) Verification of Earth remote sensing data in order to determine the aboveground phytomass of plantings in the Voronezh Region. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 4(56), pp. 63-84 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.4/5>.

Received 05.11.2024. *Revised* 07.11.2024 *Accepted* 14.12.2024. *Published online* 27.12.2024.

Введение

Создаваемая в настоящее время в Российской Федерации сеть мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов в экосистемах предусматривает широкий спектр изучения климатических, почвенных и лесорастительных особенностей. Однако проводимые стационарные исследования, прежде всего, ориентированы на выполнение наземных работ и проведение трудоемкого натурного обследования. При этом, поддержание актуальности информации о состоянии лесного фонда – главное условие эффективного управления лесохозяйственной отраслью. Кроме того, по объемам накопления углерода в виде биомассы лесной растительности мы можем судить о состоянии и динамике образуемых ею экосистем и о трендах в изменениях современных ландшафтов. Всё это требует планомерного внедрения научных разработок, технологических и практико-ориентированных решений, а также использования современных методов, не уступающих мировому уровню в области автоматизации и цифровизации лесной отрасли.

В рамках реализации действующей Стратегии развития лесного комплекса РФ на период до 2030 года¹ предполагается осуществление ряда мер по развитию цифровых технологий и их внедрению в лесном хозяйстве. Согласно «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации»², на период ближайших лет приоритетами научно-технологического развития России должны стать направления, позволяющие обеспечить получение научных и научно-технических результатов

на основе интенсивного перехода к передовым цифровым и информационно-коммуникационным технологиям, в т.ч. дистанционному зондированию Земли (ДЗЗ). Необходимо ориентироваться на широкое внедрение дистанционных методов, базирующихся на использовании искусственного интеллекта, что позволит существенно сократить объемы работ и снизить затраты на получение актуальной информации о состоянии и структуре лесного фонда [1-3].

Проведение дистанционного мониторинга углеродного цикла в лесах позволит предоставить необходимые данные о поглощении и эмиссии парниковых газов, а также снизить неопределённость оценок запаса углерода, что необходимо для оптимизации и выработки региональных мер в целях достижения критериев, приведенных в Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года³. Управление углеродными циклами в фитоценозах и ландшафтах может решать многие практические задачи настоящего и будущего.

Следует отметить, что количественные оценки запаса древесины сырастущего леса, накапливаемой фитомассы и депонирования углерода варьируют в широких пределах, отличаясь крайне высокой степенью неопределенности из-за использования в качестве информационной базы быстроустаревающих таксационных данных⁴ [4-6]. Необходимо проведение исследований, позволяющих оперативно оценить запасы живой и мертвой

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11 февраля 2021 года № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573658653>.

² Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1305071057>.

³ Распоряжение Правительства РФ от 29.10.2021 № 3052-р «Об утверждении стратегии социально-экономического развития РФ с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_399657.

⁴ Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 05.07.2011 г. № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902289183>.

древесины, что предусматривает постоянную актуализацию данных. Поэтому, крайне важно сформировать эффективный методический подход выполнения лесоучетных работ с элементами автоматизации, позволяющий верифицировать данные ДЗЗ на основании данных наземного обследования лесных участков, в целях оценки количества фитомассы на лесных участках.

Современные возможности и потенциал развития методов дистанционного зондирования Земли способны в значительной степени восполнить имеющиеся пробелы в информации о лесах, необходимой для оценки углерода на обширной территории [7]. При этом, наиболее целесообразным представляется использование методических подходов, предполагающих тесную интеграцию методов ДЗЗ, наземных измерений их качественных и количественных характеристик, а также математических моделей их структуры и динамики.

Важным вопросом является региональная дифференцированность задач, поставленных перед лесохозяйственными службами, с целью определения необходимого уровня технического и технологического сопровождения, что позволит не только повысить эффективность их работы, но и снизить при этом материальные издержки. Развитие методов дистанционного зондирования Земли, нейросетевых технологий, создание моделей машинного обучения и т.д., позволят разработать новые алгоритмы, показатели и критерии, которые существенно повысят эффективность лесного мониторинга и способствуют снижению финансовых издержек.

В связи с вышесказанным, актуальность применения систем дистанционного мониторинга и результатов верификации материалов ДЗЗ на основе моделей машинного обучения в целях оценки количества фитомассы в лесах Российской Федерации невозможно переоценить, что делает поставленную задачу одной из важнейших в реализации концепции рационального природопользования.

Необходимо создание системы дистанционной оценки фитомассы и учета динамики углерода в лесах, что возможно при проведении комплекса работ, включающего в себя формирование обучающих выборок моделей машинного обучения и их применение на основе искусственного интеллекта. При

этом, для верификации данных ДЗЗ и материалов натурного обследования, должна быть сформирована обширная база данных.

Целью работы является верификация данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе натурного обследования, в целях расчета наземной фитомассы в лесах.

Материалы и методы

Систематическая выборка объектов исследования основана на подборе лесных участков с различным породным составом, дифференцированных по возрастным группам и произрастающих в различных лесорастительных условиях.

Предмет и объект исследования

В качестве объектов исследования в 2022 году в процессе проведения наземной таксации на территории Воронежской области заложено и детально обследовано 10 пробных площадей (ПП), произрастающих в разнородных типах леса и типах лесорастительных условий, в насаждениях, не подвергавшихся воздействию неблагоприятных факторов. В 2024 году на существующих (заложенных ранее) ПП проведено повторное обследование для актуализации информации. С целью обеспечения репрезентативности выборки и получения полной и достоверной информации, требуемой для верификации данных ДЗЗ, дополнительно заложены 3 ПП.

Кроме того, натурное обследование проведено на участках, пройденные низовыми пожарами разной интенсивности (ПП 14-18), вследствие чего отмечено снижение биологической устойчивости насаждений. Лесоводственно-таксационные характеристики пробных площадей, полученные в результате натурного обследования, приведены в табл. 1.

С учетом специфики работы, объектами исследования также являлись спутниковые снимки, отражающие характеристики насаждений на территории объектов исследования. Технические характеристики массива данных ДЗЗ обуславливают формирование обучающих выборок для последующего использования их в создании моделей машинного обучения, предназначенных для определения таксационных показателей и расчета фитомассы.

Таксационная характеристика пробных площадей, расположенных на территории исследования*

Taxation characteristics of sample plots located in the study area*

| Участковое лесничество District forestry | квартал / выдел quarter / section | № ПП / размер ПП No. SP / size SP | Состав Composition of tree species | Тип леса Forest type | ТЛЮ FGC | Возраст, лет Age, years | Бонитет Site quality of forest | Класс пожарной опасности Fire hazard class | Высота, м Height, m | Диаметр ствола, см Trunk diam- eter, cm | Диаметр кроны, м Crown diameter, m | Полнога Density of tree placement | Запас на 1 га, м ³ Standing vol- ume 1 ha, m ³ |
|--|--------------------------------------|---|--|---------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------------|---|-----------------------|--|---|--|---|
| Левобережное Levoberezhnoye | 60/11 | 1 /0,5 | 10С | Ссрт | В ₂ | 140 | II | 1 | 28,5 | 41 | 4,8 | 0,93 | 400 |
| Правобережное Pravoberezhnoye | 53/6 | 2 /0,5 | 10Д+Лп+Кло | Дсн | Д ₂ | 68 | II | 4 | 23,3 | 26 | 4,6 | 0,82 | 250 |
| Правобережное Pravoberezhnoye | 44/26 | 3/0,5 | 7С3Д | Сдсн | С ₂ | 90 | II | 3 | 26,7 | 35 | 4,5 | 0,66 | 270 |
| Правобережное Pravoberezhnoye | 51/44 | 4 /0,5 | 8С2Д | Срт | С ₂ | 90 | II | 3 | 28,1 | 36 | 7,8 | 0,6 | 220 |
| Правобережное Pravoberezhnoye | 52/49 | 5 /0,5 | 6Днн4Кло | Досн | С ₂ Д | 130 | III | 4 | 27,8 | 48 | 5,0 | 0,96 | 210 |
| Левобережное Levoberezhnoye | 45/3 | 6/0,25 | 7С3Ос+Б | Стр | А ₂ | 12 | II | 1 | 3,5 | 5 | 2,1 | - | - |
| Левобережное Levoberezhnoye | 105/37 | 7/0,25 | 9С1Б | Стр | А ₂ | 35 | II | 1 | 11,3 | 12 | 2,2 | 0,62 | 100 |
| Левобережное Levoberezhnoye | 6/11 | 8 /0,5 | 8С2Б | Смш | А ₃ | 100 | II | 2 | 26,0 | 34 | 5,2 | 0,78 | 310 |
| Правобережное Pravoberezhnoye | 50/19 | 9 /0,5 | 10Олч | Олкр | Д ₄ | 100 | II | 5 | 25,1 | 32 | 6,4 | 0,85 | 340 |
| Правобережное Pravoberezhnoye | 47/3 | 10/0,5 | 3Д5Лп2Кло | Досн | С ₂ Д | 100 | III | 4 | 22,6 | 33 | 4,9 | 0,80 | 270 |
| Левобережное Levoberezhnoye | 60/10 | 11/0,5 | 10С+Б | Ссрт | В ₂ | 130 | I | 1 | 27,7 | 34 | 4,8 | 0,9 | 410 |
| Левобережное Levoberezhnoye | 27/27 | 12/0,25 | 10С | Сзл | А ₁ | 5 | - | 1 | 0,67 | - | 0,46 | - | - |
| Левобережное Levoberezhnoye | 73/4 | 13/0,5 | 9С1Днн | Срзл | В ₁ | 160 | II | 1 | 30,0 | 48 | 5,5 | 0,65 | 420 |
| Усманское Usmanskoe | 199/20 | 14/0,5 | 10Днн | Дсн | С ₂ Д | 80 | III | 0,9 | 19,5 | 24 | 3,5 | 0,5 | 170 |
| Усманское Usmanskoe | 199/12 | 15/0,5 | 7С3Днн | Ссрт | В ₂ | 80 | II | 1,2 | 22,0 | 40 | 2,9 | 0,6 | 250 |
| Усманское Usmanskoe | 199/19 | 16/0,5 | 10С | Ссрт | В ₂ | 120 | II | 2,5 | 20,5 | 28 | 2,6 | 0,5 | 310 |
| Сомовское Somovskoye | 155/7 | 17/0,5 | 10С+Б | Стр | А ₂ | 52 | I | 2,8 | 19,5 | 22 | 2,9 | 0,7 | 190 |
| Сомовское Somovskoye | 166/2 | 18/0,5 | 10С+Б | Ссрт | В ₂ | 64 | I | 2,2 | 22,0 | 24 | 3,6 | 0,65 | 300 |

*Пробные площади 14, 15 и 16 находятся на границе Воронежской и Липецкой областей

* Sample plots 14, 15 and 16 are located at the border of Voronezh and Lipetsk regions

Источник: собственная композиция авторов | Source: author's composition

Массив данных сформирован на основе спутниковых снимков со следующей спецификацией и техническими параметрами цифровой информации:

Pansharpened RGBNir (цветосинтезированные изображения с пространственным разрешением 0,5-1 м/пикс.). Проекция: UTM WGS 84. Спутниковые

снимки, используемые для верификации данных ДЗЗ, предоставлены ООО ИТЦ “СКАНЭКС” (<https://search.kosmosnimki.ru/?link=F4PWX>). Подбор, обработка и передача цифровой информации выполнена с КА Ресурс, Jilin, Pleiades и GeoEye. на полигоны, расположенные в Воронежской области.

Сбор данных

Основой для выполнения научно-исследовательской работы являются научные публикации ведущих зарубежных и отечественных ученых в области лесного хозяйства, экологии и цифровых технологий [8-10]. Методическое обеспечение работ по проведению наземных исследований и сбору инфор-

мации на постоянных пробных площадях составляют действующие нормативные и правовые документы, инструкции и рекомендации о проведении Государственной инвентаризаций лесов⁵, Лесоустроительной инструкции⁶, Приказ Рослесхоза от 05.07.2011 г. № 287⁴, а также иные материалы [11, 12 и др.], на базе которых составлен комплексный методический подход для определения показателей на таксационно-дешифровочных площадях для последующего проведения дистанционного мониторинга. Пробные площадки закладывались с учетом требований ОСТа 56–69–83 «Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки»⁷. Схема размещения пробных площадей приведена на рис. 1.

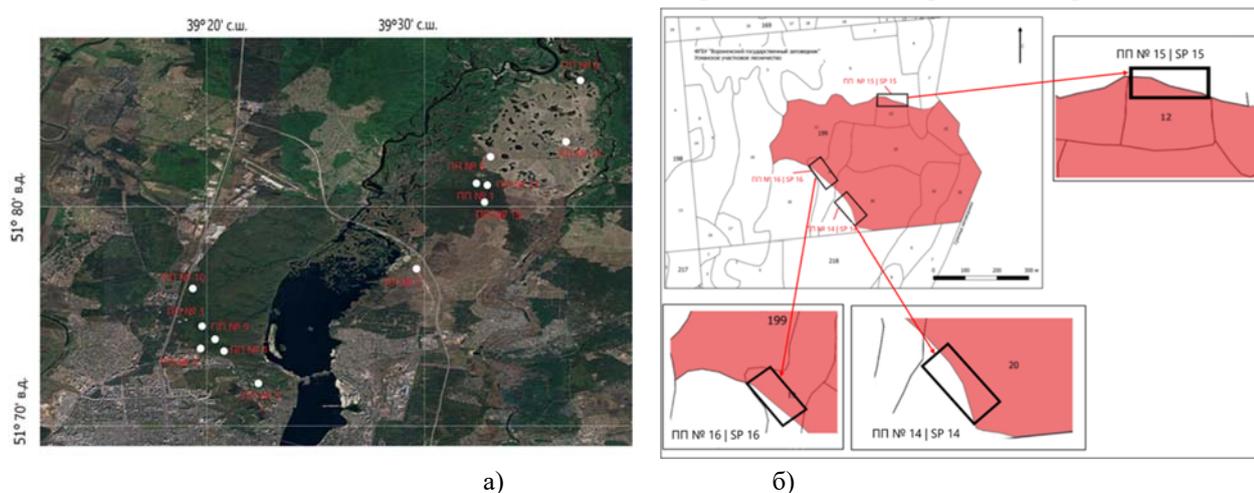


Рисунок 1. Схематическое расположение объектов исследования:

- а) размещение пробных площадей в насаждениях с ненарушенной биологической устойчивостью (ПП1-13);
- б) схема расположения пробных площадей в насаждениях с нарушенной биологической устойчивостью, на территориях, пройденных (выделено красным) и не пройденных низовыми пожарами

Figure 1. Schematic layout of the study objects:

- a) placement of sample plots in stands with undisturbed biological stability (SP1-13);
- b) layout of sample plots in stands with impaired biological stability, in areas affected (highlighted in red) and not affected by ground fires

Источник: собственная композиция авторов | Source: author's composition

Анализ данных

Методы таксации. На каждой пробной площадке проводился сплошной пересчет с определением древесной породы и подеревный учет диаметров стволов, высоты деревьев и высоты начала живой

части кроны, диаметров кроны и санитарного состояния деревьев. Определялись и фиксировались напочвенный покров, подрост, подлесок, валеж и лесная подстилка.

⁵ Приказ Минприроды России от 27 сентября 2021 года № 686 «Об утверждении Порядка проведения государственной инвентаризации лесов». URL: <https://docs.cntd.ru/document/727092651>.

⁶ Приказ МПР РФ от 05 августа 2022 года № 510 «Об утверждении Лесоустроительной инструкции». URL: <https://docs.cntd.ru/document/351878696>.

⁷ ОСТ 56–69–83 Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. Введен 01.01.84. – 59 с.

Высоту дерева и начало живой кроны измеряли с точностью 0,5 м, а диаметр ствола измеряли на высоте 1,3 м, с точностью до 1 см. Повышенная точность измерения необходима для последующего корректного создания моделей машинного обучения. Состояние деревьев определяли глазомерно, с учетом распределения древесной породы по ступеням толщины, на основе Правил санитарной безопасности в лесах⁸. Диаметр кроны измеряли по проекции в двух противоположных направлениях (С-Ю/З-В), с помощью лазерного дальномера с точностью до 0,1 м (0,25 м).

Подрост и подлесок определяли по двум параметрам: степень густоты (густой, средней густоты и редкий) и крупность (крупный средний мелкий) с указанием породы. Также фиксировалась жизнеспособность подроста и подлеска⁶.

В ходе выполнения сплошного перечета деревьев на ПП в Воронежской области, мы определяли координаты каждого дерева при помощи GNSS приемника SOUTH G2.

Для определения типов лесорастительных условий использовали классификационную схему П.С. Погребняка [13]. Эта классификация основана на делении лесных насаждений по влажности и плодородию почвы. Тип леса определяли по классификации В.Н. Сукачева [13].

При оценке насаждений, пройденных пожарами, высоту нагара определяли со стороны максимального обгорания деревьев. В перечень включали все деревья, начиная с диаметра 8 см на высоте 1,3 м. Силу пожара определяли по средней высоте нагара на стволах. Пожаром слабой силы считали пожар, образовавший нагар до 1 м, средним – от 1,1 м до 2,0 м, сильным – более 2,0 м. [14, 15].

Методы расчёта надземной фитомассы на пробных площадях. Оценка запасов надземной фитомассы проводилась по фракциям, с использованием аллометрического уравнения (1) для каждого дерева на основе данных по диаметру ствола на высоте 1,3 м и высоты [16]:

$$\ln P_i = a_0 + a_1 \ln H + a_2 \ln DBH \quad (1)$$

где P_i – фитомасса и её фракции (i) в абсолютно сухом состоянии, кг;

H – высота дерева, м;

DBH – диаметр ствола на высоте 1,3 м, см;

a_0, a_1 и a_2 – видоспецифичные константы аллометрического уравнения.

Для усыхающих и сухостойных деревьев (по шкале санитарного состояния) фитомасса листьев (хвои) принималась равной нулю.

Расчёт надземной фитомассы подлеска проводился для каждого вида по известной высоте с использованием аллометрического уравнения согласно методическим указаниям по количественному определению объёма поглощения парниковых газов [17] (2):

$$US = a \cdot H^b \quad (2)$$

где US – надземная фитомасса подлеска в абсолютно сухом состоянии, кг; H – высота растения, м; a и b – видоспецифичные константы аллометрического уравнения.

Аналогичным образом с использованием аллометрического уравнения проведён расчёт надземной фитомассы подроста по видам древесных пород. Уравнение для определения запаса углерода (С) в подросте деревьев различных лесообразующих пород по их высоте [16] было преобразовано для обратного перевода массы углерода в фитомассу (3) с использованием коэффициента 0,5.

$$UG = 2a \cdot H^b \quad (3)$$

где H – высота стволов подроста деревьев, м; a и b – коэффициенты аллометрического уравнения для расчета запаса углерода в растении (кг С/шт.) по породам [16].

Методика дешифрирования RGB и спектральных снимков. Дешифрирование – распознавание сущности объектов, изображенных на аэрофотоснимках. В основе дешифрирования лежит распознавание объектов по прямым и косвенным признакам [18-20]. При геопривязке объектов ортофотоплана использована программа Agisoft Metashape.

При дешифрировании необходимо учитывать лесоводственные и биологические особенности отдельных древесных пород и процесс формирования

⁸ Постановление Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 года № 2047 «Об утверждении Правила санитарной

безопасности в лесах». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573053313>.

полога древостоя с увеличением его возраста. Формы проекций крон деревьев и промежутков между ними обуславливают изображение древостоя на аэрофотоснимке и создают для каждого древостоя свой типичный вид полога, отличный от других древостоев. Для определения таксационных параметров использован следующий методический подход:

- подбор алгоритма и реализация на его основе функционала сегментации, подходящего для выделения отдельных деревьев на RGB изображениях;
- определение точного местоположения для каждого дерева по данным RGB съемки;
- формирование обучающих выборок на базе нейросетевых моделей;
- обучение моделей на основе искусственного интеллекта;
- размещение исходных и обработанных данных в единой базе данных с открытым кодом;
- использование уточненных моделей машинного обучения для определения в автоматическом режиме таксационных показателей древостоя.

Определение таксационных показателей древостоя выполнено с использованием следующих подходов:

- породный состав – при помощи нейросетевых моделей по RGB снимкам;
- высоту дерева и высоту начала кроны – при обработке спектральных данных с использованием геометрических методов для поиска земли, интерполяции поверхности земли и поиска вершины лесного полога;
- диаметр кроны – при обработке данных RGB, в зависимости от сомкнутости полога;
- диаметр ствола, полноту и возраст древостоя – по косвенным показателям, на основе выявленных взаимосвязей путем использования эмпирических зависимостей.

- Для RGB и спектральной съемки использованы традиционные методы цифровой обработки изображений для поиска/отделения от фона деревьев. Используются нейросетевые подходы unet и

yoUo для сегментации деревьев и определения породы. Вычисление сложно определяемых таксационных параметров производили на основе выявленных взаимосвязей между характеристиками древостоя, измеренными на пробных площадях, параметрами цифровой модели полога и спектральными характеристиками снимков.

Методика статистической обработки данных. С помощью программы STATISTICA 13 [21] проведен статистический последовательный анализ на основе рекомендаций Б.А. Доспехова⁹: корреляционно-регрессионный анализ, позволяющий оценить тесноту связи различных показателей, влияющих на процесс и найти зависимость между изучаемыми показателями, а также дисперсионный анализ, позволяющий определить силу влияния действующего фактора на результирующий признак. Для анализа связи между несколькими независимыми переменными (предикторами) и зависимой переменной применяли многомерный регрессионный анализ. Для оценки количественной связи между лесоводственно-таксационными показателями рассчитаны значения коэффициента линейной корреляции К. Пирсона [21].

Тесноту связи оценивали по шкале Чеддока⁹. Оценку адекватности регрессивной модели проводили с помощью коэффициента детерминации (R^2). Чем ближе R^2 к единице, тем лучше регрессия аппроксимирует эмпирические данные, следовательно, результат не является случайным. В ходе исследования рассчитывали средние статистические показатели с использованием стандартных общепринятых методов описательной статистики.

Для проверки достоверности различий и определения статистической значимости между средними показателями при верификации данных ДЗЗ, основывались на значении t-критерия Стьюдента⁹, рассчитываемого по формуле

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}, \quad (4)$$

где M_1 – средняя арифметическая первой сравниваемой совокупности (группы);

⁹ Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : учебник. М.: «Колос», 2011. 547 с.

M_2 – средняя арифметическая второй сравниваемой совокупности (группы);

m_1 – средняя ошибка первой средней величины;

m_2 – средняя ошибка второй средней величины.

Результаты и обсуждение

Статистический анализ материалов натурного обследования. При анализе результатов наземной таксации и выявлении взаимосвязей между основными лесоводственно-таксационными

показателями на постоянных пробных площадях, выполнен корреляционно-регрессионный анализ, позволяющий оценить тесноту связи и найти зависимость между изучаемыми признаками, что крайне важно для их использования при дистанционном мониторинге. Чем больше величина коэффициента корреляции, тем больший практический смысл приобретают результаты исследования.

Статистические характеристики основных лесоводственно-таксационных показателей на пробных площадях приведены на рис. 2-5.

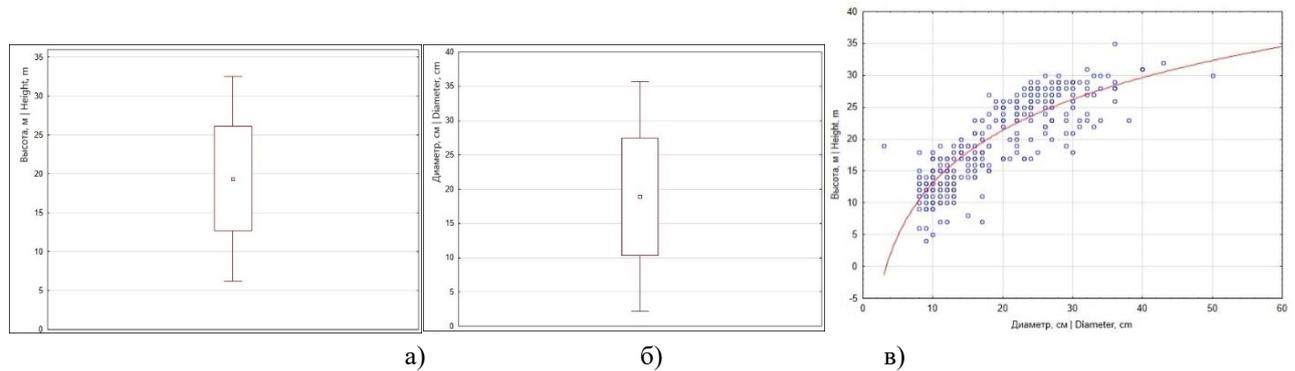


Рисунок 2. Средние статистические значения таксационных показателей в лиственных средневозрастных насаждениях (а, б) и корреляционная связь между ними (в)

Figure 2. Average statistical values of taxation indicators in deciduous middle aged stands (a, b) and the correlation between them (c)

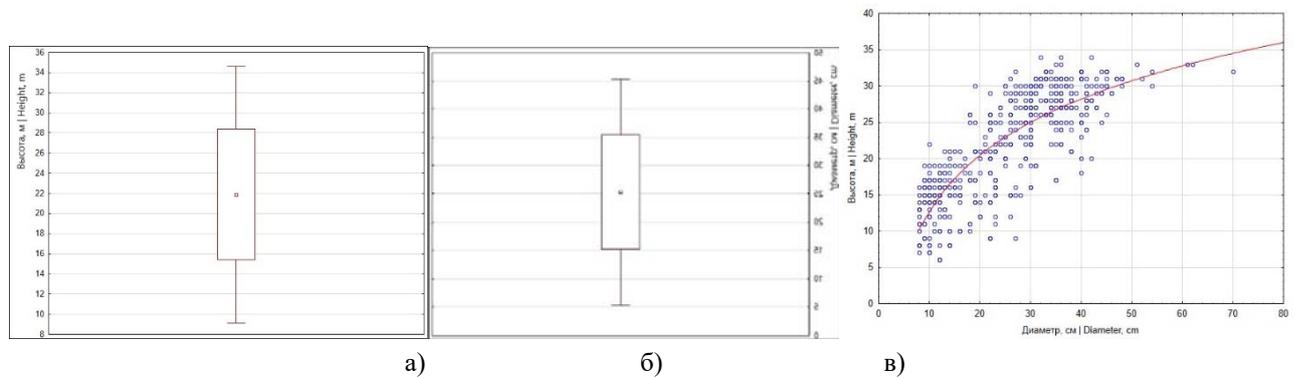


Рисунок 3. Средние статистические значения таксационных показателей в хвойных средневозрастных насаждениях (а, б) и корреляционная связь между ними (в)

Figure 3. Average statistical values of taxation indicators in middle aged coniferous stands (a, b) and the correlation between them (c)

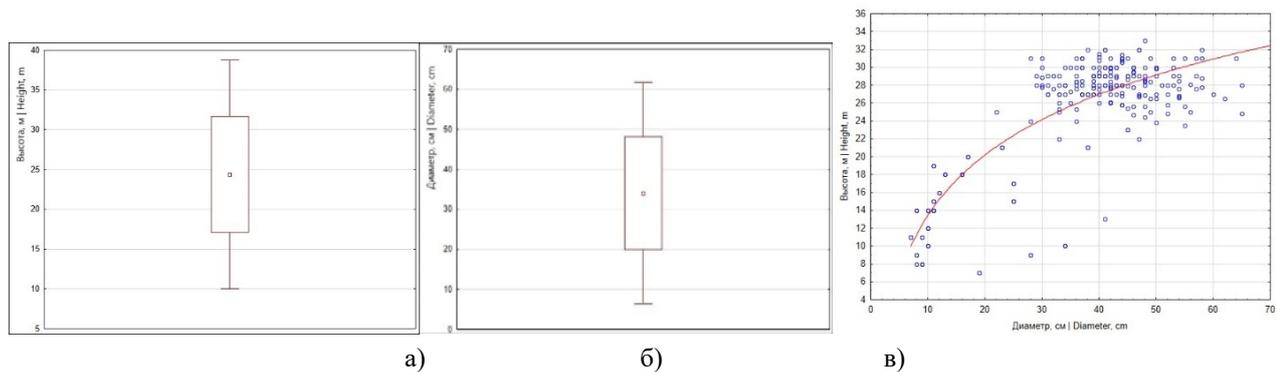


Рисунок 4. Средние статистические значения таксационных показателей в хвойных спелых и перестойных насаждениях (а, б) и корреляционная связь между ними (в)

Figure 4. Average statistical values of taxation indicators mature and old-growth coniferous stands (a, b) and the correlation between them (c)

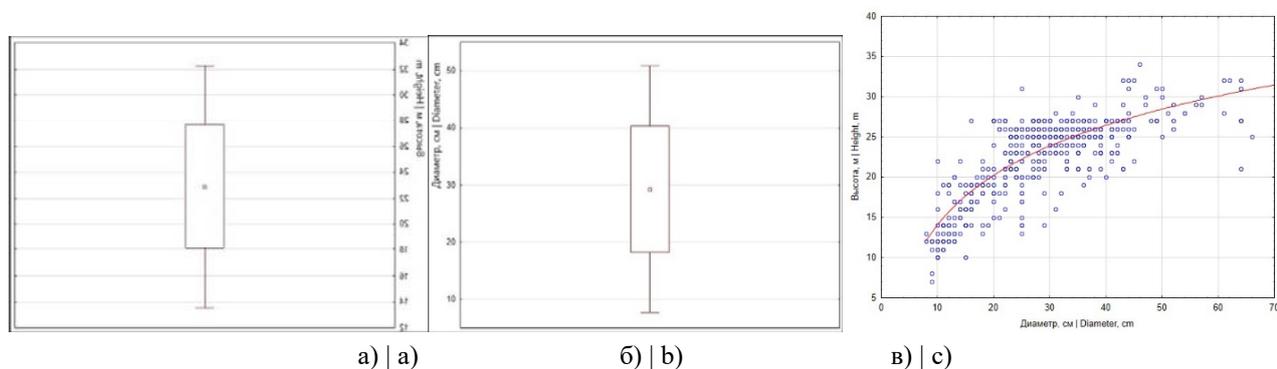


Рисунок 5. Средние статистические значения таксационных показателей в твердолиственных спелых и перестойных насаждениях (а, б) и корреляционная связь между ними (в)

Figure 5. Average statistical values of taxation indicators in mature and old-growth hardwood stands (a, b) and the correlation between them (c)

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Из данных, приведенных на рис. 2-5, следует, что при проведении корреляционного анализа основных таксационных показателей подтверждены имеющиеся ранее и получены новые сведения о тесных взаимосвязях между прямыми (четко определяемыми по снимку) и косвенными (сложно определяемыми) дешифровочными признаками - между высотой древостоя и диаметром ствола – на всех участках от 0,61 до 0,86.

При этом необходимо отметить, что для увеличения тесноты корреляционной связи между прямыми и косвенными признаками и увеличения эффективности прогнозного моделирования, требуется составление аллометрических уравнений и разработка моделей с использованием нескольких переменных.

Формирование элементов обучающих выборок на основе данных ДЗЗ и разработка классификации объектов, распознаваемых нейросетью. К дешифровочным признакам следует отнести как таксационные параметры, определяемые на основе вычисления порога отклонения гистограмм/плотностей цветовых компонент отдельных деревьев, так и весовые коэффициенты, полученные при обучении нейронной сети. Для разработки и обучения искусственных нейросетевых программных комплексов была использована геоинформационная система QGIS ПО с открытым исходным кодом, предусматривающая следующую последовательность действий:

- пространственная привязка изображений (геокодирование);

- создание и редактирование векторных (shape) файлов (в т.ч. с поддержкой топологии) и атрибутивных данных;

- активация и применение инструментов для импорта, экспорта и геообработки данных GPS;

- калькулятор полей атрибутов и растров;

- подписывание объектов.

Одной из важнейших частей построения систем машинного обучения является формирование качественной обучающей выборки. Это включает в себя как сбор высококачественных исходных данных, так и выполнение экспертной разметки. Объекты ортофотоплана помечены в соответствии с породами деревьев (рис. 6, б), определенными при

натурном обследовании (синий – дуб, зеленый – клен, желтый – осина, а красный – неопознанное дерево) поверх исходного ортофотоплана данного участка. При совмещении разметки с ортофотопланом, получим изображение, приведенное на рис. 6, в.

После качественно выполненной экспертной разметки породного состава, на вход для формирования выборок при помощи машинного обучения, подаются исходные ортофотопланы и разметка (в формате geojson). Далее при помощи сверточных нейронных сетей происходит формирование искусственного интеллекта.

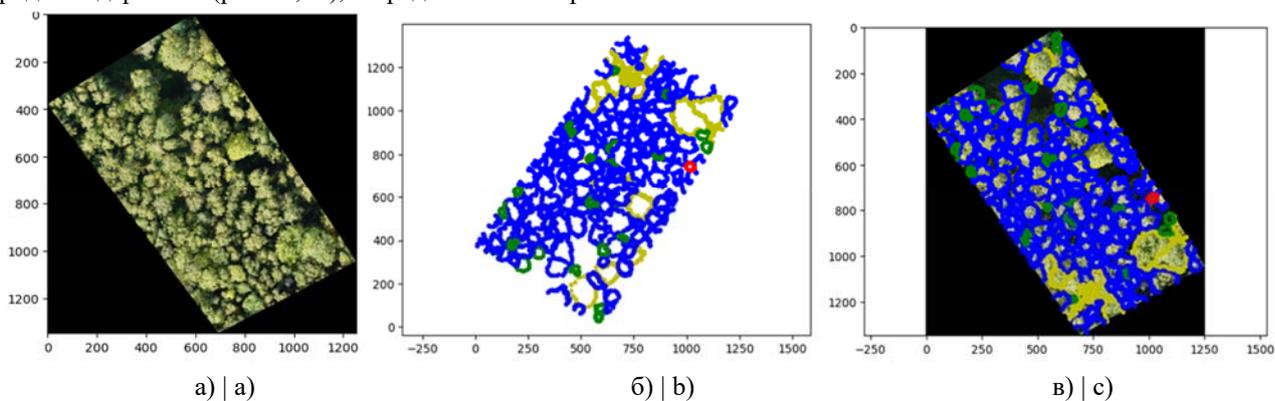


Рисунок 6. Разметка лесного участка древесных пород, нанесенная поверх ортофотоплана: а) ортофотоплан лесного участка с высокой сомкнутостью крон (ПП5); б) разметка породного состава насаждения, произрастающего на ПП 5; в) изображение, получаемое при совмещении разметки с ортофотопланом

Figure 6. Marking of the forest plot of tree species applied over the orthophotomap: а) orthophotomap of the forest plot with high crown density (SP5); б) marking of the species composition of the stand growing on SP 5; в) image obtained by combining the marking with the orthophotomap

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Точность определения указанных параметров зависит не только от размера и качества обучающих выборок для алгоритмов искусственного интеллекта, но и от качества съемки. При этом для спутниковых данных зачастую критическим фактором является наличие облачности.

Обучение моделей должно происходить на основе тщательно подготовленных обучающих выборок, позволяющих совмещать данные сплошного перечета деревьев при наземной таксации и данные дистанционного мониторинга. В основе совмещения

заложена методика сверхточного определения координат деревьев, с погрешностью меньшей, чем размер определяемого объекта.

Дешифрирование основных таксационных показателей по материалам дистанционного зондирования Земли. При проведении аналитического дешифрирования данных ДЗЗ в автоматизированном режиме рассчитаны прямые дешифровочные признаки, позволяющие определить количество фитомассы в насаждениях – породный состав, высоты деревьев и диаметры крон.

На первом этапе для каждого снимка выполнена кластеризация спектров, которые группируются в несколько кластеров (алгоритм кластеризации k-Means). После отбора кластеров формируются медианные спектры, которые сравниваются со спектрами отражённого света от растений. Таким образом, отбираются кластеры для дальнейшей работы. Затем спектры, принадлежащие к кластерам, явно несоответствующим спектрам растений, исключаются из дальнейшего рассмотрения, а спектры, принадлежащие к кластерам растений, участвуют в алгоритмах машинного обучения.

При нахождении высот деревьев в автоматизированном режиме, сначала происходит вычисление поверхностей земли и растительности, а затем высоты вычисляются путем вычитания координаты z поверхности земли из поверхности растительности. Для вычисления поверхностей земли и растительности каждый las файл преобразуется в две соответствующие матрицы, содержащие z координаты в своих ячейках.

Процесс дешифрования диаметра крон деревьев основан на предварительной обработке RGB изображений в ручном режиме с использованием специализированного программного обеспечения QGIS. Для определения диаметров крон с элементами автоматизации, необходимо определить степень сомкнутости полога. Для этого применялся метод «точечной палетки» с использованием программы PHOTOMOD 6.0. Сомкнутость рассчитывается как соотношение точек, попавших на кроны к общему количеству точек на палетке.

Чем ниже сомкнутость полога, тем более точно можно определить диаметр кроны автоматизированным способом с применением ИИ. В случае, если сомкнутость полога 0,8 и выше, выявлена существенная систематическая ошибка. Поскольку достоверно определить диаметр кроны в высокоплотных насаждениях автоматизированном режиме не представляется возможным, предложено определение данного параметра с элементами автоматизации, используя показатель сомкнутости полога.

Диаметр ствола, возраст (класс возраста) насаждения и полнота древостоя определяются косвенными методами, исходя из эмпирических данных

и разработанных на их основе регрессионных уравнений.

Результаты верификации видового состава и количества деревьев. Верификация породного состава по данным ДЗЗ произведена с использованием обучающих выборок моделей машинного обучения. Результаты определения древесных пород в автоматизированном режиме на всех пробных площадях показали высокую степень совпадения с результатами натурного обследования - в среднем выявленные расхождения находились в пределах 2-7%. Верификация доли участия древесных пород в составе древостоя различными способами показана на рис. 7 (на примере ПП 3).

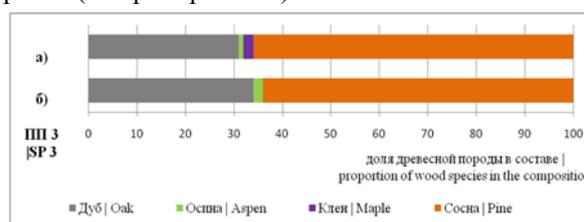


Рисунок 7. Результаты верификации древесных пород на пробной площадке 3:

а) доля древесных пород по материалам наземной таксации; б) доля древесных пород по данным ДЗЗ

Figure 7. Results of verification of tree species in sample plot 3:

а) share of tree species according to ground-based taxonomy materials; б) share of tree species according to remote sensing data

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

При верификации количества деревьев по материалам ДЗЗ на основе натурного обследования использована информация об их координатах, которые определены высокоточным GNSS-приемником и занесены в базу данных. Результаты верификации при определении количества деревьев на пробных площадях, выполненные в разрезе сравнения материалов спутниковых снимков и данных натурного обследования, приведены на рис. 8, где наглядно показано, что спутниковые снимки не могут достоверно отражать количество деревьев на лесных участках, имеющих высокую или среднюю сомкнутость полога, а также идентифицировать деревья, расположенные во втором ярусе.

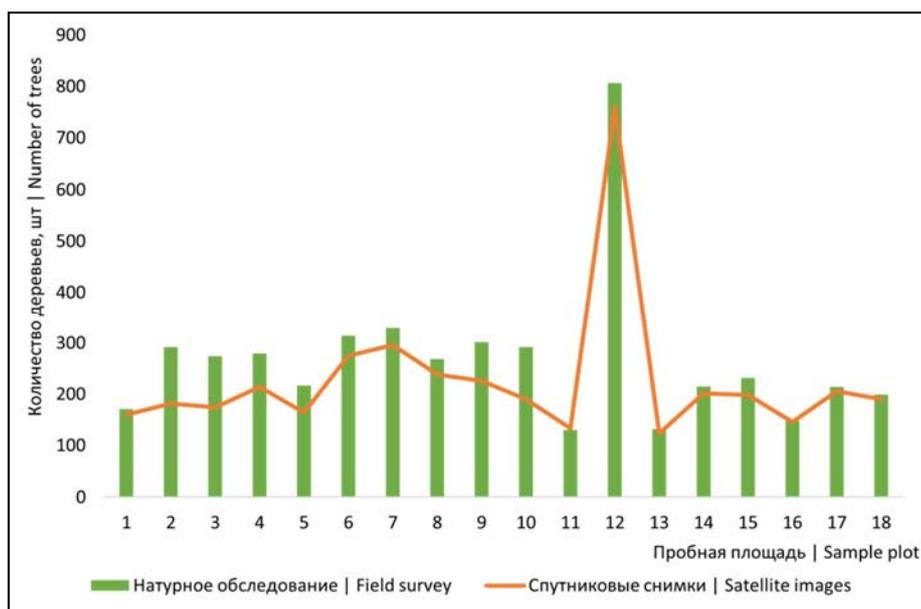


Рисунок 8. Результаты верификации количества деревьев (шт.) по материалам ДЗЗ и данным натурального обследования

Figure 8. Results of verification of the number of trees (pcs.) based on remote sensing data and field survey data

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Так, например, в насаждениях с высокой горизонтальной сомкнутостью (ПП 2, 3, 5, 9), различия в количестве выявленных деревьев составляют 25...38 %. Это связано с наличием древостоя во втором ярусе и крупного подроста сопутствующих пород, не идентифицируемого по снимкам.

При использовании комплекса получения пространственной информации на основе RGB и лидарной съемки, можно идентифицировать деревья второго яруса, что позволит получить более точные сведения и уменьшить погрешность в определении количества деревьев на 5-12 % по сравнению со спутниковыми снимками [18].

Результаты верификации высоты древостоя и диаметров кроны. При сравнении высоты стволов деревьев, определенных по материалам

наземной таксации и по полученным в ходе автоматизированной обработки данных ДЗЗ, выявлена высокая степень совпадения результатов (рис. 9).

Для корректного сопоставления практических и теоретических материалов, сравнивались 2 набора выборок – молодняки (а также насаждения лиственных пород до 40 лет) и средневозрастные и старше. Насаждения в этих возрастных группах имеют существенные различия по искомым таксационным показателям и должны быть дифференцированно проанализированы для получения нормального распределения вариационного ряда. Ольха черная произрастает на одном участке (ПП 11) и поэтому высоты сопоставлены в разрезе единой выборки.

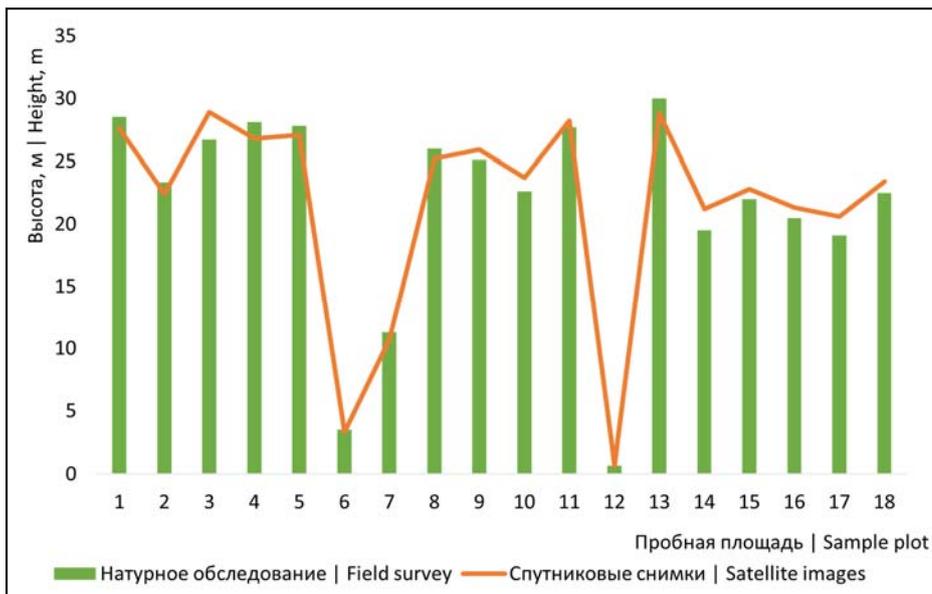


Рисунок 9. Результаты верификации высоты древостоя по материалам ДЗЗ и данным натурного обследования

Figure 9. Results of verification of the height of the forest stand based on remote sensing data and field survey data

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Из приведенной диаграммы (рис. 9) следует, что получена высокая степень совпадения данных натурной таксации и автоматизированного дешифрирования высоты древостоя. Критерий К. Пирсона $P(\chi^2)$ во большинстве случаев превышает показатель достоверности на уровне 0,95. В ряде случаев отмечено практически полное сходство по параметрам высот древесных пород верхнего яруса (расхождения находятся в пределах статистической погрешности). Исключения составляют ПП 3 и 10 – насаждения, имеющие специфические особенности, и также ПП 14 – лиственное насаждение, пострадавшее от пожара. Следует отметить, что максимальная погрешность при определении высот (отмеченная в единичных случаях) составляет 25,8%, при средней ошибке – 5,7%. Это позволяет рекомендовать широкое использование дистанционных методов для определения высоты древостоя.

Диаметр кроны определяли аналогичным способом с использованием ИИ. Сопоставленные

значения диаметров кроны преобладающих пород первого яруса в двух противоположных направлениях приведены на рис. 10 (на примере ПП 1).

В насаждениях со средней горизонтальной сомкнутостью (ПП 6,7, 11, 13) расхождения находятся в пределах статистической погрешности. Критерий К. Пирсона $P(\chi^2)$ превышает показатель достоверности на уровне 0,95 – различия несущественны. Максимальная погрешность при определении диаметров кроны с использованием моделей машинного обучения составляет 19 % и неизбежно возрастает в насаждениях с высокой сомкнутостью полога.

В целом, значения диаметров кроны, определяемые дистанционными методами, имеют тенденцию к завышению, т.к. более мелкие кроны второго яруса не всегда возможно идентифицировать по снимкам.

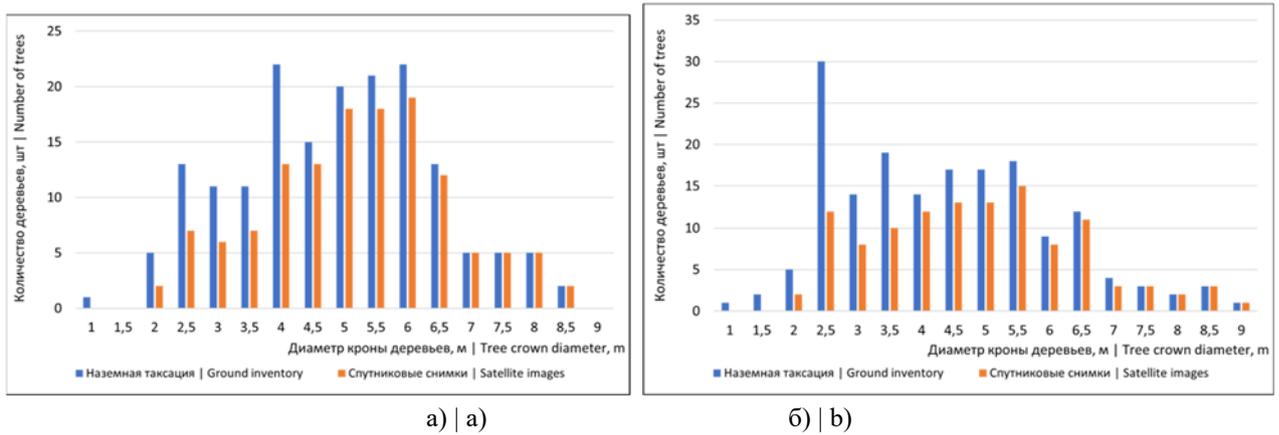


Рисунок 10. Сравнение диаметров кроны деревьев, определенных в двух направлениях по материалам натурного обследования (наземная таксация) и полученных при обработке данных ДЗЗ: а) С-Ю; б) З-В
 Figure 10. Comparison of tree crown diameters determined in two directions based on field survey materials (ground survey) and obtained by processing remote sensing data: a) N-S; b) W-E

Источник: собственная композиция авторов
 Source: author's composition

Оценка накопления надземной фитомассы в насаждениях на территории исследуемых объектов. Оценка фитомассы на пробных площадях получена с использованием аллометрических уравнений на основе данных по диаметру ствола и высоте (для древостоя) и данных по высоте (для подроста и

подлеска). Подробные данные о структуре и количестве фитомассы по фракциям получены на основе данных натурного обследования на пробных площадях. При верификации количества надземной фитомассы, рассчитанной по данным ДЗЗ и материалам натурного обследования, выявлено значительное сходство представленных результатов (рис. 11).

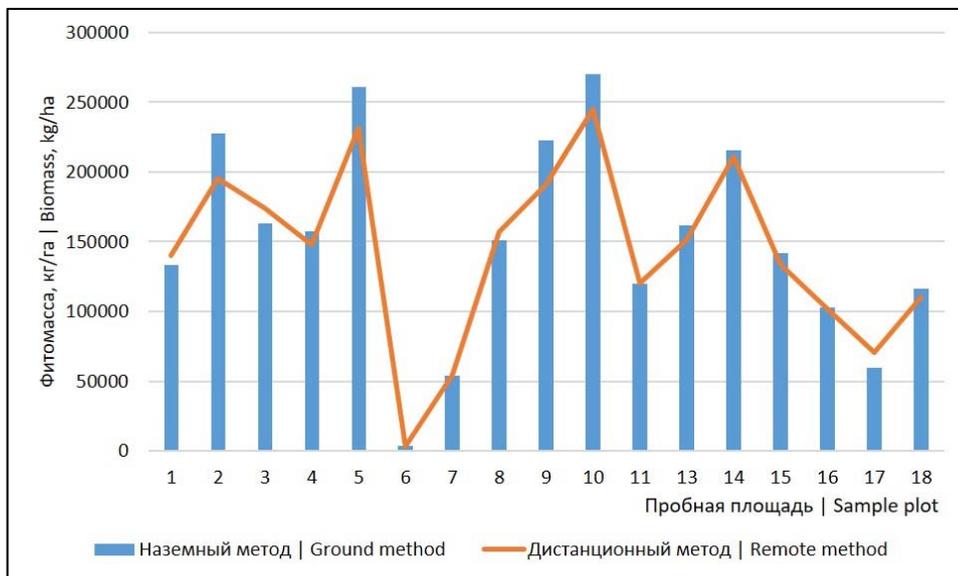


Рисунок 11. Общая фитомасса на пробных площадях, определенная наземным (столбчатая диаграмма) и дистанционным (линия) методами, кг/га

Figure 11. Total phytomass in sample plots determined by ground (bar chart) and remote (line) methods, kg/ha
 Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

В ходе анализа информации, приведенной на рис. 11, выявлено, что максимальное количество фитомассы наблюдается в лиственных насаждениях, среди которых лидирующее положение занимает дубрава осоково-снытевая (ПП 10) с количеством фитомассы равным 265,4 т/га. Далее в порядке убывания запасов фитомассы следуют дубрава снытевая (ПП 5) – 256,6 т/га и дубрава снытевая (ПП 2), где фитомасса достигает 234,9 т/га.

Далее по мере снижения доли лиственных деревьев в составе древостоев наблюдается закономерное снижение общих запасов фитомассы: от сосняка разнотравного (ПП 4) и сосняка мшистого (ПП 8) с фитомассой 151,2 т/га и 150,0 т/га соответственно, до сосняка травяного с дубом (ПП 1), где запасы составляют 142,7 т/га.

Наименьшие запасы фитомассы, как следовало ожидать, характерны для молодняков (3,2-4,0 до 53,0 т/га – ПП 6, 7). Заметим, что в насаждениях

на ПП 1, 4, 8, 13 суммарная фитомасса хвойных составляет от 88 до 93% от общих запасов, и только лишь на ПП 3 доля сосны снижается за счёт лиственных пород до 69%.

На участках, пройденных низовыми пожарами (ПП 14-18) наблюдается увеличение мертвой фитомассы за счет отмирания хвои (листвы) мелких ветвей и подроста. Древесные стволы, составляющие основную часть живой надземной фитомассы интенсивно не отмирают, поэтому в целом данные участки имеют сопоставимое количество накопленного углерода по сравнению с участками с не нарушенной биологической устойчивостью.

Для статистического подтверждения результатов исследования выполнен дисперсионный анализ и рассчитаны достоверности различий между средними значениями фитомассы, полученными различными способами (табл. 2).

Таблица 2

Достоверность различий между средними значениями фитомассы древостоев (t_{a-b}), определенными наземным (а) и дистанционным (б) методами

Table 2

Reliability of differences between the average values of forest stand phytomass (t_{a-b}), determined by ground (a) and remote (b) methods

| Группа пород Group of breeds | Пробные площади (t – различия в фитомассе, а-б) Sample plots (t – differences in phytomass, a-b) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|------|------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|-------|-----|-------|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | |
| Хвойные Conifers | 1,1* | | | -0,8* | | | -0,5* | 1,0* | | | 0,7* | -1,2* | | | -0,3* | 2,1 | -1,2* | |
| Лиственные Deciduous | | -3,8 | | | -2,9 | | | | -3,1 | -2,7 | | | -1,1* | | | | | |
| Смешанные Mixed | | | 1,4* | | | 0,7* | | | | | | | | -2,5 | | | | |

*несущественные различия между средними значениями при вероятности 0,95 ($t_{0,05}$)

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Достоверные различия (на уровне значимости $p < 0,05$) между средними значениями наземной фитомассы, полученными наземным и дистанционным методами, были обнаружены в 33% вариантов. В большинстве случаев, это лиственные насаждения с вторым ярусом и обильной подпологовой растительностью. В 67% случаев средние значения фито-

массы, определенные разными методами, достоверно не отличались друг от друга. Сходство значений фитомассы, полученных наземным и дистанционным методами, подтверждено статистически: для хвойных насаждений критерий Пирсона χ^2 (0,05; 5) варьирует в диапазоне 2,79 ... 3,05. Показатель $P(\chi^2) = 0,66...0,69 > 0,05$, что обуславливает несуществен-

ные различия в результатах расчета фитомассы разными методами и свидетельствует о достаточно высокой точности информации, полученной дистанционным методом.

Имея данные о количестве надземной фитомассы, производится расчет запасов углерода в исследуемых насаждениях [22]. Следовательно, мы можем с уверенностью использовать методику оценки фитомассы на основе данных ДЗЗ для расчета запасов углерода лесных насаждений.

Заключение

Основанием для выполнения научно-исследовательской работы является Государственный контракт Федерального агентства лесного хозяйства № 0373100032224000014 на тему «Разработка комплекса научно обоснованных мер регулирования по обеспечению низкоуглеродного развития лесного хозяйства в целях достижения показателей стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов».

Основой для выполнения работы являлась верификация данных спутниковых снимков сверхвысокого и высокого разрешения по материалам натурального обследования, проводимого на постоянных пробных площадях.

1. На разнородных участках леса в Воронежской области заложены 18 постоянных таксационно-дешифровочных пробных площадей, на которых детально изучены лесоводственные показатели насаждения с применением метода сплошного перечета деревьев. Получены новые сведения, позволяющие дополнить сформированную базу данных лесоводственно-таксационных показателей, основанные на результатах натурального обследования на пробных площадях и материалах дешифрирования RGB и спектральных снимков.

2. Сформированные элементы обучающих выборок на основе нейросетевого классификатора для определения таксационных показателей насаждения на основе данных ДЗЗ, позволяют в автоматизированном режиме определить:

- древесную породу – в среднем 86%, в т.ч. (%): сосна – 88, мягколиственные породы – 89, дуб – 83;
- высоту дерева – в среднем 90%, в.т. (%): сосна – 96, береза – 97, осина – 78, ольха – 85;

- сомкнутость полога – в среднем 85%, в.т. (%): хвойные – 88; смешанные – 86; лиственные – 79;

- диаметр кроны (в зависимости от сомкнутости полога) – в среднем 87%, в.т. (%): сосна – 96, береза – 95, осина – 75, ольха – 80.

С использованием двух наиболее информативных морфометрических показателей деревьев – высоты дерева и диаметра кроны, которые с достаточной точностью можно оценить на основе данных ДЗЗ, по результатам проведенного многомерного регрессионного анализа были разработаны модели для подеревного определения возраста дерева и диаметра ствола на высоте 1,3 м.

3. При верификации количества надземной фитомассы, рассчитанной по данным ДЗЗ и материалам натурального обследования, выявлено значительное сходство представленных результатов. В 67% случаев средние значения фитомассы, определенные разными методами, достоверно не отличались друг от друга (на уровне значимости $p < 0,05$). Достоверные различия между средними значениями наземной фитомассы, полученными наземным и дистанционным методами, были обнаружены в 33% вариантов. Прежде всего, это лиственные насаждения с высокой горизонтальной сомкнутостью полога, наличием второго яруса и обильной подпологовой растительностью.

Несмотря на то, что в работе доказана возможность определения ключевых параметров по данным ДЗЗ, необходимо продолжить работу по формированию обучающих выборок для технологий искусственного интеллекта. Кроме того, для более точной оценки определения параметров древостоя необходимо проводить наземную таксацию с определением точных географических координат каждого дерева, что позволит полностью автоматизировать расчеты, в том числе параметров выборок, определяющих качество распознавания данных.

Полученные результаты могут быть использованы для осуществления дистанционного мониторинга в лесах, оценки накопления и потерь углерода, а также для формирования отраслевых рекомендаций, направленных на повышение эффективности действий лесохозяйственных учреждений подведомственных Рослесхозу.

Заложена теоретическая основа для дальнейших исследований при проведении дистанционного

мониторинга в области охраны, защиты и воспроизводства лесов. Работа представляет фундаментальное значение для экологического мониторинга разных типов природных и хозяйственно трансформированных ландшафтов. Материал работы может быть использован в качестве теоретического и методологического руководства при планировании и организации экологических оценок фитоценозов и отдельных популяций и видов древесных растений.

Результаты работы имеют большое значение в сферах лесоустройства, землеустройства, экологического нормирования и производственно-технологического регулирования землепользованием и растениеводством для достижения истинной углеродной нейтральности, с соблюдением принципов научно-обоснованного рационального природопользования и воспроизводства хозяйственно ценных фитоценозов.

Список литературы

1. Putzenlechner B., Koal P., Kappas M., Löw M., Mundhenk P., Tischer A., Wernicke J., Koukal T. Towards precision forestry: Drought response from remote sensing-based disturbance monitoring and fine-scale soil information in Central Europe. *Science of The Total Environment*. 2023; 880: 163114. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163114.
2. Anees S.A., Mehmood K., Khan W.R., Sajjad M., Alahmadi T.A., Alharbi S.A., Luo M. Integration of machine learning and remote sensing for above ground biomass estimation through Landsat-9 and field data in temperate forests of the Himalayan region. *Ecological Informatics*. 2024; 82: 102732. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102732.
3. Waard F., Connolly J., Barthelmes A., Joosten H., Linden S. Remote sensing of peatland degradation in temperate and boreal climate zones – A review of the potentials, gaps, and challenges. *Ecological Indicators*. 2024; 166: 112437. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112437.
4. Филипчук А. Н., Мальшева Н. В., Золина Т. А., Селезнев А. А. Запасы углерода в фитомассе лесов России: новая количественная оценка на основе данных первого цикла государственной инвентаризации лесов. *Лесохозяйственная информация*. 2024; 1: 29-55. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.1.03.
5. Boreal forests in the face of climate change. *Advances in Global Change Research 74* / М. М. Girona, Н. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron. Springer : Switzerland, 2023; 837 p. DOI: 10.1007/978-3-031-15988-6.
6. Bui Q., Pham Q., Pham V., Tran V., Nguyen D., Nguyen Q., Nguyen H., Do N., Vu V. Hybrid machine learning models for aboveground biomass estimations. *Ecological Informatics*. 2024; 79: 102421. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102421.
7. Бредихин А.И., Мельников А.В. Подход к построению углеродной карты Ханты-Мансийского автономного округа на основе оценки биомассы с помощью данных дистанционного зондирования Земли. *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. 2022; 2 (26): 115-126. DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.011.
8. Славский В.А., Мироненко А.В., Матвеев С.М., Литовченко Д.А. Таксационно-дешифровочные показатели насаждений как основа разработки моделей машинного обучения для дистанционного мониторинга лесов. *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. СПб.: СПбНИИЛХ 2022; №4; 99-114. DOI 10.21178/2079-6080.2022.4.99.
9. Гольшева А.А., Бабкина Е.В. Цифровые технологии в управлении лесным хозяйством. *Муниципальная академия*. 2024; № 2; 306-311. DOI: 10.52176/2304831X_2024_02_306.
10. Черниховский Д.М., Парфенов А.А. Таксация лесов дешифровочным способом как потенциальный инструмент цифровой трансформации лесного хозяйства. *Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2024; 2: 51-66. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.2.51.
11. Толкач И.В., Бахур О.С. Измерение основных таксационно-дешифровочных показателей древостоя с использованием цифровой фотограмметрической станции (ЦФС). *Труды БГТУ. Лесное хозяйство*. 2022; 1: 66–68. ISBN 1683-0377. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25100730>.
12. Трейфельд Р.Ф., Филиппов Ю.В. Внедрение цифровых фотограмметрических систем в лесоустройство. *Геопрофи*. 2022; № 2; 38–41. ISBN 2311-1410. URL: <https://elibrary.ru/tdqewz>.

13. Фомин В.В., Иванова Н.С., Залесов С.В., Попов А.С., Михайлович А.П. Лесные типологии в Российской Федерации. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2023; 6 (396): 9-30. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-9-30.
14. Sympilova D.P., Shakhmatova E.Yu., Gyninova A.B., Ubugunov L.L., Sychev R.S., Bazarov A.V. Impacts of wildfire low-severity on soil properties in semiarid forest ecosystems of western Transbaikalia. Nature of Inner Asia. 2022; № 4 (22); 105-114. DOI: 10.18101/2542-0623-2022-4-105-114.
15. Собачкин Р.С., Ковалева Н.М. Влияние периодичности низовых пожаров на запас лесных горючих материалов средневозрастных сосняков в лесостепи Красноярского края. Лесоведение. 2024; 2: 187-196. DOI: 10.31857/S0024114824020078.
16. Усольцев В.А., Цепордей И.С., Норицин Д.В. Аллометрические модели биомассы деревьев лесообразующих пород. Леса России и хозяйство в них. 2022; 1 (80): 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001.
17. Усольцев В.А., Цепордей И.С. Прогнозирование биомассы стволов сосновых деревьев естественных древостоев и лесных культур в связи с изменением климата. Сибирский лесной журнал. 2021; 2: 72–81. DOI: 10.15372/SJFS20210207.
18. Slavskiy V.A., Matveev S.M., Sheshnitsan S.S., Litovchenko D.A., Larionov M.V., Shokurov A., Litovchenko P., Durmanov N. Assessment of phytomass and carbon stock in the ecosystems of the Central forest steppe of the east European plain: integrated approach of terrestrial environmental monitoring and remote sensing with unmanned aerial vehicles. Life. 2024; 14 (5): 632. DOI: 10.3390/life14050632.
19. Хлюстов В.К., Юрчук С.А., Хлюстов Д.В., Ганихин А.М. Технология комплексной оценки древесных ресурсов методами дистанционного зондирования Земли. Природообустройство. 2021; 4: 129-138. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-129-138.
20. Сидоренков В.М., Калинин В.В., Рябцев О.В., Жафяров А.В., Кушнырь О.В., Рыбкин А.С. Перспективы развития тематических сервисов в области лесотаксационного дешифрирования на основе данных спутниковой съемки. Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019; 63 (4): 440-445. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-4-440-445.
21. Шевелина И.В., Нуриев Д.Н. Статистическая обработка лесоводственно-таксационной информации в среде STATISTICA. Екатеринбург: УГЛУТУ, 2022; 112. ISBN 978-5-94984-840-1. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>.
22. The European Space Agency BIOMASS mission: Measuring Forest above-ground biomass from space. S. Quegan, T.L. Toan, J. Chave, J. Dall, J.-F. Exbrayat, D.H. Tong Minh [et al.]. Remote Sensing of Environment. 2019; 227; 44-60. DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.032.

References

1. Putzenlechner B., Koal P., Kappas M., Löw M., Mundhenk P., Tischer A., Wernicke J., Koukal T. Towards precision forestry: Drought response from remote sensing-based disturbance monitoring and fine-scale soil information in Central Europe. Science of The Total Environment. 2023; 880: 163114. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163114.
2. Anees S.A., Mehmood K., Khan W.R., Sajjad M., Alahmadi T.A., Alharbi S.A., Luo M. Integration of machine learning and remote sensing for above ground biomass estimation through Landsat-9 and field data in temperate forests of the Himalayan region. Ecological Informatics. 2024; 82: 102732. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2024.102732.
3. Waard F., Connolly J., Barthelmes A., Joosten H., Linden S. Remote sensing of peatland degradation in temperate and boreal climate zones – A review of the potentials, gaps, and challenges. Ecological Indicators. 2024; 166: 112437. DOI: 10.1016/j.ecolind.2024.112437.
4. Filipchuk A.N., Malisheva N.V., Zolina T.A., Seleznev A.A. Zapasi ugleroda v fitomasse lesov Rossii: novaya kolichestvennaya otsenka na osnove dannikh pervogo tsikla gosudarstvennoi inventarizatsii lesov [Carbon reserves in the phytomass of Russian forests: a new quantitative assessment based on the data of the first cycle of the state

forest inventory]. Lesokhozyaistvennaya informatsiya [Forestry information]. 2024; 1: 29-55. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2024.1.03 (in Russian).

5. Boreal forests in the face of climate change. *Advances in Global Change Research 74* / M.M. Girona, H. Morin, S. Gauthier, Y. Bergeron. Springer: Switzerland, 2023; 837. DOI: 10.1007/978-3-031-15988-6.

6. Bui Q., Pham Q., Pham V., Tran V., Nguyen D., Nguyen Q., Nguyen H., Do N., Vu V. Hybrid machine learning models for aboveground biomass estimations. *Ecological Informatics*. 2024; 79: 102421. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2023.102421.

7. Bredihin A.I., Mel'nikov A.V. Podhod k postroeniyu uglerodnoj karty Hanty-mansijskogo avto-nomnogo okruga na osnove ocenki biomassy s pomoshch'yu dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli [An approach to constructing a carbon map of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug based on biomass assessment using Earth remote sensing data]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies in Science and Management]. 2022; 2 (26): 115-126. DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.011.

8. Slavskiy V.A., Mironenko A.V., Matveev S.M., Litovchenko D.A. Taksacionno-deshifrovochnye pokazateli nasazhdenij kak osnova razrabotki modelej mashinnogo obucheniya dlya distancionnogo monitoringa lesov [Taxation and decoding indicators of plantations as a basis for developing machine learning models for remote forest monitoring]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute]. SPb.: SPb-NIILH 2022; 4: 99-114. DOI 10.21178/2079-6080.2022.4.99.

9. Golysheva A.A., Babkina E.V. Cifrovye tekhnologii v upravlenii lesnym hozyajstvom [Digital technologies in forestry management]. *Municipal'naya akademiya* [Municipal Academy]. 2024; 2: 306-311. DOI: 10.52176/2304831X_2024_02_306.

10. Chernihovskij D.M., Parfenov A.A. Taksaciya lesov deshifrovochnym sposobom kak potencial'nyj instrument cifrovoj transformacii lesnogo hozyajstva [Forest taxation using the decoding method as a potential tool for digital transformation of forestry]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo hozyajstva* [Proceedings of the St. Petersburg Forestry Research Institute]. 2024; 2: 51-66. DOI: 10.21178/2079-6080.2024.2.51.

11. Tolkach I.V., Bahur O.S. Izmerenie osnovnyh taksacionno-deshifrovochnykh pokazatelej drevostoya s ispol'zovaniem cifrovoj fotogrammetricheskoy stancii (CFS) [Measurement of the main taxation and decoding indicators of a forest stand using a digital photogrammetric station (DPS)]. *Trudy BGTU. Lesnoe hozyajstvo* [Proceedings of BSTU. Forestry]. 2022; 1: 66–68. ISBN 1683-0377. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25100730>.

12. Trejfel'd R.F., Filippov Yu.V. Vnedrenie cifrovyyh fotogrammetricheskikh sistem v lesoustrojstvo [Implementation of digital photogrammetric systems in forest management]. *Geoprofi* [Geoprofi]. 2022; 2: 38–41. ISBN 2311-1410. URL: <https://elibrary.ru/tdqewz>.

13. Fomin V.V., Ivanova N.S., Zalesov S.V., Popov A.S., Mihajlovich A.P. Lesnye tipologii v Rossijskoj Federacii [Forest typologies in the Russian Federation]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [News of higher educational institutions. Forestry magazine]. 2023; 6 (396): 9-30. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-6-9-30.

14. Sympilova D.P., Shakhmatova E.Yu., Gyninova A.B., Ubugunov L.L., Sychev R.S., Bazarov A.V. Impacts of wildfire low-severity on soil properties in semiarid forest ecosystems of western Transbaikalia. *Nature of Inner Asia*. 2022; 4 (22): 105-114. DOI: 10.18101/2542-0623-2022-4-105-114.

15. Sobachkin R.S., Kovaleva N.M. Vliyanie periodichnosti nizovyh pozharov na zapas lesnyh goryuchih materialov srednevoznrastnyh sosnyakov v lesostepi Krasnoyarskogo kraja [Effect of the frequency of ground fires on the reserve of forest combustible materials in middle-aged pine forests in the forest-steppe of Krasnoyarsk Krai]. *Lesovedenie* [Forest Science]. 2024; 2: 187-196. DOI: 10.31857/S0024114824020078.

16. Usol'cev V.A., Cepordej I.S., Noricin D.V. Allometricheskie modeli biomassy derev'ev lesoob-razuyushchih porod [Allometric models of tree biomass of forest-forming species]. *Lesa Rossii i hozyajstvo v nih* [Forests of Russia and their management]. 2022; 1 (80): 4–14. DOI: 10.51318/FRET.2022.85.72.001.

17. Usol'cev V.A., Cepordej I.S. Prognozirovanie biomassy stvolov sosnyovyh derev'ev este-stvennyh drevostoev i lesnyh kul'tur v svyazi s izmeneniem klimata [Forecasting the biomass of pine tree trunks in natural stands and forest

crops in connection with climate change]. *Sibirskij lesnoj zhurnal* [Siberian Forest Journal]. 2021; 2: 72–81. DOI: 10.15372/SJFS20210207.

18. Slavskiy V.A., Matveev S.M., Sheshnitsan S.S., Litovchenko D.A., Larionov M.V., Shokurov A., Litovchenko P., Durmanov N. Assessment of phytomass and carbon stock in the ecosystems of the Central forest steppe of the east European plain: integrated approach of terrestrial environmental monitoring and remote sensing with unmanned aerial vehicles. *Life*. 2024; 14 (5): 632. DOI: 10.3390/life14050632.

19. Hlyustov V.K., Yurchuk S.A., Hlyustov D.V., Ganihin A.M. Tekhnologiya kompleksnoj ocenki drevesnyh resursov metodami distancionnogo zondirovaniya Zemli [Technology of integrated assessment of wood resources using Earth remote sensing methods]. *Prirodoobustrojstvo* [Nature management]. 2021; 4: 129-138. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-129-138.

20. Sidorenkov V.M., Kalnin V.V., Ryabcev O.V., Zhafyarov A.V., Kushnyr' O.V., Rybkin A.S. Perspektivy razvitiya tematicheskikh servisov v oblasti lesotaksacionnogo deshifrirovaniya na osnove dannyh sputnikovoj s"emki [Prospects for the development of thematic services in the field of forest taxonomy interpretation based on satellite imagery data]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos"emka* [News of higher educational institutions. Geodesy and aerial photography]. 2019; 63 (4): 440-445. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-4-440-445.

21. Shevelina I.V., Nuriev D.N. Statisticheskaya obrabotka lesovodstvenno-taksacionnoj informacii v srede STATISTICA [Statistical processing of forestry and taxation information in the STATISTICA environment]. *Ekaterinburg: UGLTU*, 2022; 112. ISBN 978-5-94984-840-1. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49911777>.

22. Quegan S., Toan T.L., Chave J., Dall J., Exbrayat J.-F., Tong Minh D.H. [et al.]. The European Space Agency BIOMASS mission: Measuring Forest above-ground biomass from space. *Remote Sensing of Environment*. 2019; 227: 44-60. DOI: 10.1016/j.rse.2019.03.032.

Сведения об авторах

✉ *Славский Василий Александрович* – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6579-0344>; e-mail: slavskiyva@yandex.ru.

Литовченко Дарья Андреевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры лесоводства, лесной таксации и лесоустройства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; e-mail: timashchuk90@mail.ru.

✉ *Иванова Анна Владимировна* – кандидат экономических наук, доцент кафедры менеджмента и экономики предпринимательства ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация; e-mail: anna_iv_1989@mail.ru.

Ларионов Максим Викторович – доктор биологических наук, профессор кафедры биоэкологии и биологической безопасности, Институт ветеринарной медицины, ветеринарно-санитарной экспертизы и агробезопасности ФГБОУ ВО «Российский биотехнологический университет» (Университет «РОСБИОТЕХ»), Волоколамское шоссе, 11, г. Москва, 125080, Российская Федерация; e-mail: m.larionow2014@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Vasiliy A. Slavskiy* – DSc (Agricultural Sciences), Professor of the Department of Forestry, Forest Taxation and Forest Management, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, 8, Timiryazev str., Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6579-0344>, e-mail: slavskiyva@yandex.ru.