

Научная статья
УДК 528.8(470.1)
EDN VAMAUS
DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2026.1.07

Обзор современных методов автоматизированного дешифрирования оптических спутниковых снимков для оценки лесных насаждений редкостойной тайги и притундровых лесов европейской части России: состояние и перспективы

Ярослав Александрович Аваков¹

Аннотация. В статье представлен краткий обзор современного состояния и перспектив применения методов автоматизированного дешифрирования оптических спутниковых снимков для получения характеристик лесных насаждений в специфических природных условиях – в зоне редкостойной тайги и притундровых лесов европейской части России. Рассмотрены ограничения, связанные с дефицитом эталонных данных. Проанализированы классические алгоритмы, ансамблевые модели и архитектуры нейронных сетей (включая U-Net). Уделено внимание нормативным аспектам, интеграции с дополнительными источниками данных (LiDAR, SAR и др.), оценке качества и учёту неопределённости результатов. Показано практическое применение алгоритмов в зависимости от региональных условий; предложенные решения могут быть внедрены в системы государственного мониторинга и лесоустройства.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование, оптические спутниковые снимки, редкостойная тайга, притундровые леса, машинное обучение, нейросети, LiDAR, радар, БПЛА, Sentinel-2, гиперспектральные данные, лесоустройство, мониторинг.

Для цитирования: Аваков Я.А. Обзор современных методов автоматизированного дешифрирования оптических спутниковых снимков для оценки лесных насаждений редкостойной тайги и притундровых лесов европейской части России: состояние и перспективы. – Текст: электронный // Лесохозяйственная информация. 2026. № 1. С. 72–81. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2026.1.07. <https://elibrary.ru/vamaus>.

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и механизации лесного хозяйства, инженер 1-й категории отдела лесоводства и лесоустройства (Пушкино, Московская обл., Российская Федерация), leniyavr@gmail.com

Original article

EDN VAMAUS

DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2026.1.07

A Review of Modern Methods for Automated Interpretation of Optical Satellite Imagery for Assessing Sparse Taiga and Sub-Tundra Forests in the European part of Russia: Current Status and Prospects

Yaroslav A. Avakov

Abstract. A concise review is presented of the current state and prospects for applying automated methods to interpret optical satellite imagery for deriving forest stand attributes under specific natural conditions — namely the sparsely stocked taiga and forest-tundra zones of European Russia. The paper addresses limitations arising from the shortage of reference data. Classical algorithms, ensemble models, and neural network architectures (including U-Net) are examined. Particular attention is given to regulatory aspects, integration with supplementary data sources (LiDAR, SAR, etc.), quality assessment, and the treatment of uncertainty in the results. The review not only catalogs algorithms and platforms but also demonstrates their practical application with regard to regional conditions. The proposed approaches are suitable for implementation in state monitoring and forest management systems.

Key words: automated interpretation, optical satellite imagery, sparse taiga, sub-tundra forests, machine learning, neural networks, LiDAR, radar, UAV, Sentinel-2, hyperspectral data, forest inventory, monitoring.

For citation: Avakov Ya. A Review of Modern Methods of Automated Interpretation of Optical Satellite Imagery for Assessing Sparse Taiga and Sub-Tundra Forests in the European part of Russia: Current Status and Prospects. – Text : electronic // Forestry Information. 2026. № 1. P. 72–81. DOI 10.24419/LHI.2304-3083.2026.1.07. <https://elibrary.ru/vamaus>.

Введение

Автоматизированное дешифрирование оптических спутниковых снимков в последние десятилетия стало неотъемлемой частью мониторинга и управления лесными ресурсами, особенно для труднодоступных территорий, к которым относятся притундровые леса и редкостойная тайга европейской части России. Между тем эти территории, характеризующиеся низкой продуктивностью лесных насаждений, мозаичностью, сложными сезонными явлениями и ограниченной доступностью для традиционных методов лесоустройства, играют ключевую роль в поддержании климатического баланса, биоразнообразия и углеродного цикла европейского Заполярья России. В условиях изменения климата, возрастающей антропогенной нагрузки и необходимости повышения эффективности государственного мониторинга лесов автоматизация дешифрирования спутниковых данных становится стратегически важной задачей для лесной отрасли России.

Цель исследования – проанализировать современное состояние и перспективы применения методов автоматизированного дешифрирования оптических спутниковых снимков с целью получения характеристик лесных насаждений для регионов европейской части России с преобладанием притундровых лесов и редкостойной тайги.

В статье рассмотрены основные алгоритмы и архитектуры, особенности и ограничения их применения в специфических природных условиях, примеры успешных внедрений, перспективы развития технологий, а также рекомендации по внедрению современных подходов в практику лесоустройства и мониторинга. Отдельное внимание уделено нормативным аспектам, вопросам интеграции оптических спутниковых данных с другими источниками информации (LiDAR, SAR

и др.), в том числе оценке качества и проблеме неопределённости результатов^{1,2} [1].

Методы исследования

Автоматизированное дешифрирование спутниковых данных представляет собой комплексный процесс, включающий обнаружение объектов, их распознавание и извлечение необходимых характеристик^{3,4}. В отличие от визуального дешифрирования, современные методы опираются на алгоритмы машинного обучения и нейросетевые архитектуры, что позволяет обрабатывать большие объёмы информации с минимальным участием оператора. Применяются как классические алгоритмы (метод спектрального угла, ISODATA, k-ближайших соседей, дискриминантный анализ), так и ансамблевые методы машинного обучения – случайный лес, градиентный бустинг, метод опорных векторов [2–4]. Классические алгоритмы по-прежнему активно используются для первичной классификации и типизации, особенно в случаях, когда отсутствует достаточное количество размеченных данных или требуется высокая интерпретируемость результатов [5, 6].

Особое место занимают архитектуры глубоких нейронных сетей (U-Net, FCN, DeepLabV3+, PSPNet), которые обеспечивают сегментацию и классификацию изображений на уровне пикселей [3]. Их использование позволяет учитывать контекст сцены при разных масштабах и достигать высокой точности даже с ограниченным объёмом обучающих данных.

Получение количественных характеристик лесных насаждений – запаса, высоты, полноты, породного состава – осуществляется на основе выявления взаимосвязей между спектральными признаками и таксационными параметрами.

¹ Притундровые леса [Электронный ресурс]. – <https://www.derev-grad.ru/biogeografiya/pritundrovye-lesa.html> (дата обращения: 01.12.2025).

² Как спутниковые наблюдения позволяют осуществлять мониторинг лесов России [Электронный ресурс]. – <https://greenium.ru/14204/> (дата обращения: 01.12.2025).

³ Современные средства автоматизированного дешифрирования космических снимков [Электронный ресурс]. – <https://arcreview.esri-cis.ru/2009/03/11/image-decryption/> (дата обращения: 01.12.2025).

⁴ Спутниковые технологии для оценки лесных ресурсов [Электронный ресурс]. – <https://geonovosti.terratech.ru/economy/taxation/> (дата обращения: 01.12.2025).

Вегетационные индексы (NDVI, EVI, Red Edge NDVI и др.) служат индикаторами состояния и продуктивности лесов, а регрессионные модели машинного обучения позволяют строить прогнозы по ключевым параметрам⁵. В последние годы всё большее внимание уделяется интеграции оптических данных с LiDAR и радарными измерениями, что существенно повышает точность оценки структуры полога, запасов древесины, а также ряда других характеристик [2, 4, 5].

Результаты и обсуждение

Природно-климатические условия редкостойной тайги и притундровых лесов европейской части России накладывают определённые ограничения на применение оптических спутниковых данных. Это связано как с преобладанием одноярусных, разновозрастных, низкополотных и малопродуктивных древостоев (запас – 50–70 м³/га, полнота – 0,3–0,5, Va–Vб класс бонитета), так и со значительными вариациями параметров облачности в период активной вегетации, что затрудняет получение качественных снимков, а сезонные явления существенно изменяют спектральные характеристики [2, 6]. Дополнительные ограничения создают мозаичность ландшафта и неоднородность насаждений, что усложняет автоматическую классификацию и требует применения усовершенствованных моделей сегментации [6]. При этом спектральные различия между основными породами – елью, сосной и берёзой – зачастую минимальны, особенно при низкой полноте и смешанном составе насаждений, что снижает эффективность традиционных методов [7].

Не менее значимой проблемой остаётся дефицит эталонных данных для обучения и валидации моделей. Наземные таксационные работы

в притундровых регионах редки и нерегулярны, а имеющиеся материалы часто устарели или не охватывают все типы насаждений. В этих условиях всё большее значение приобретают методы аугментации данных, перенос обучения (transfer learning), а также использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и наземных наблюдений для формирования актуальных обучающих выборок [8].

Несмотря на перечисленные ограничения, накоплен значительный опыт успешного применения автоматизированных методов дешифрирования в северных и притундровых зонах. Так, данные Landsat, Sentinel-2 и Planet использовали для оценки запасов, возраста и полноты насаждений в Ханты-Мансийском АО, Архангельской обл. и Красноярском крае [2, 6]. Интеграция оптических снимков с LiDAR-данными (ICESat-2, GEDI) позволила существенно повысить точность оценки высоты и запаса древостоя [4, 5]. Валидация результатов с помощью беспилотных летательных аппаратов показала высокую эффективность для оперативного сбора эталонных данных и обучения нейросетевых моделей. В Архангельской обл. проведено сравнение архитектур U-Net и LinkNet при классификации хвойных и лиственных лесов по данным Sentinel-2; лучшие результаты продемонстрировала U-Net, обеспечившая значение mIoU до 0,46 при ограниченном объёме обучающих данных⁶. Дополнительные преимущества даёт интеграция оптических данных с радарными измерениями Sentinel-1, что позволяет получать информацию о структуре полога даже при неблагоприятных погодных условиях⁷ [9].

Таким образом, современные методы автоматизированного дешифрирования демонстрируют высокую эффективность при решении задач оценки состояния лесов в сложных природных условиях. Однако их применение требует комплексного подхода, включающего учёт сезонных

⁵ Анализ данных Sentinel-2 в экологическом мониторинге: ИИ-решение «Экосистема PRO» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kartadlyavas.ru/analiz-dannyh-sentinel-2-v-ekologicheskom-monitoringe-ii-reshenie-ekosistema-pro/> (дата обращения: 01.12.2025).

⁶ Terrestrial Applications part 1 – Deforestation Viewed from Multiple Sensors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://google-earth-engine.com/Terrestrial-Applications-part-1/Deforestation-Viewed-from-Multiple-Sensors/> (дата обращения: 01.12.2025).

⁷ The Global Forest Monitoring Radar Satellites Market, Global Outlook and Forecast [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.marketmonitorglobal.com/reports/1991000/forest-monitoring-radar-satellites/> (дата обращения: 01.12.2025).

факторов, использование комбинированных источников данных и развитие инфраструктуры для сбора эталонной информации. Всё это подтверждает необходимость дальнейшего совершенствования технологий и их адаптации к специфике лесных экосистем приполярных областей европейской части России.

Перспективы развития. Развитие технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) открывает новые горизонты для мониторинга лесных экосистем. В ближайшие годы ожидается расширение группировки Sentinel⁸ за счёт запуска новых спутников, что повысит периодичность повторной съёмки и устойчивость к облачности⁹. Появление таких гиперспектральных платформ, как CHIME, PRISMA и EnMAP, откроет доступ к данным с сотнями узких спектральных каналов, позволяя выявлять даже незначительные различия между породами, оценивать состояние древостоев, в том числе лесопатологическое, а также в целом проводить мониторинг биоразнообразия на принципиально новом уровне¹⁰ [7].

Российские спутники «Канопус-В» и «Ресурс-П» обеспечивают высокое пространственное разрешение, что делает возможным детализированное картографирование структуры полога, выявление отдельных деревьев, а также незаконных рубок¹¹. Дополнительные перспективы связаны с дальнейшим углублением интеграции данных космической съёмки оптического диапазона с другими данными ДЗЗ [4, 5].

Облачные платформы, такие как Google Earth Engine¹², Mapflow¹³ и CoGIS¹⁴, позволяют автоматизировать обработку больших объёмов данных, интегрировать различные источники

информации и применять сложные алгоритмы машинного обучения без необходимости использования локальной вычислительной инфраструктуры [4].

Особое значение приобретают гиперспектральные сенсоры, обеспечивающие непрерывное покрытие спектра с шагом 5–10 нм. Исследования показывают, что их использование позволяет повысить точность классификации пород в среднем на 70% по сравнению с мультиспектральными сенсорами, особенно в условиях разреженной структуры полога и низкой полноты насаждений [7].

Интеграция технологий. Интеграция оптических данных с дополнительными источниками информации становится ключевым направлением развития мониторинга лесных экосистем. LiDAR-системы, включая спутниковые миссии ICESat-2 и GEDI, а также лидарные данные, полученные с беспилотных летательных аппаратов, позволяют выйти за рамки обычного картографирования поверхностей и формировать трёхмерные модели структуры полога, оценивать высоту и плотность древостоя, что особенно важно в условиях низкой полноты и разреженности насаждений [4, 5]. Радарные измерения обеспечивают возможность получения информации независимо от облачности и освещённости, что особенно актуально для северных регионов с большим количеством облачных дней и полярной ночью⁷. Беспилотные аппараты, оснащённые оптическими датчиками, применяют для оперативной съёмки, сбора эталонных данных и валидации моделей, особенно там, где проведение наземных работ затруднено или невозможно⁸ [9].

⁸ Sentinel-2 – ESA [Электронный ресурс]. – https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (дата обращения: 01.12.2025).

⁹ Sentinel-2 – Sentinel Online [Электронный ресурс]. – <https://sentinels.copernicus.eu/copernicus/sentinel-2> (дата обращения: 01.12.2025).

¹⁰ CHIME: Europe's revolutionary eye in the sky is set to transform environmental monitoring [Электронный ресурс]. – <https://sentinels.copernicus.eu/web/success-stories/-/chime-europe's-revolutionary-eye-in-the-sky-is-set-to-transform-environmental-monitoring> (дата обращения: 01.12.2025).

¹¹ Применение спутника «Канопус В» № 3 для мониторинга лесных экосистем России [Электронный ресурс]. – <https://rezonspb.ru/blog/primenenie-sputnika-kanopus-v-3-dlya-monitoringa-lesnyh-ekosistem-rossii/> (дата обращения: 01.12.2025).

¹² Monitoring Forest Vegetation Condition – Google Developers [Электронный ресурс]. – <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/forest-vegetation-condition> (дата обращения: 01.12.2025).

¹³ Mapflow.AI – AI mapping and imagery analysis platform [Электронный ресурс]. – <https://mapflow.ai/ru> (дата обращения: 01.12.2025).

¹⁴ Сферы применения CoGIS [Электронный ресурс]. – <https://cogis.dataeast.com/ru/overview/> (дата обращения: 01.12.2025).

Сочетание гиперспектральных данных, которые уже сегодня способны обеспечить непрерывное покрытие спектра с шагом 5–10 нм, с другими данными ДЗЗ является устойчивой тенденцией развития космических систем ДЗЗ [7].

Программные инструменты и платформы. Значимым направлением является развитие облачных вычислений и автоматизация обработки данных¹³, которые позволяют масштабировать работу с массивами данных. Это даёт возможность быстро строить временные ряды наблюдений, упрощает интеграцию разнородных источников данных и обеспечивает выполнение сложных алгоритмов машинного обучения. В результате повышается скорость, масштаб и доступность аналитики спутниковых данных¹⁴ [4]. Параллельно развивается экосистема специализированных библиотек¹⁵ и предобученных моделей¹⁶ – PyTorch, TensorFlow, segmentation-models-pytorch, Segment Anything, DeepLabV3+, что ускоряет внедрение нейросетевых методов в практику дешифрирования [3].

Для оценки качества автоматизированного дешифрирования применяют различные метрики: Pixel Accuracy, Intersection over Union (индекс Жаккара), F1 Score, коэффициент Каппа и матрицу ошибок¹⁷ [6]. Они позволяют анализировать точность классификации, выявлять проблемные категории и учитывать случайные совпадения. В условиях редкостойной тайги и притундровых лесов особое значение приобретает оценка неопределённости результатов, связанная с вариабельностью спектральных характеристик, ограниченностью эталонных данных, влиянием погодных условий и облачности, а также ошибками геопривязки и несовпадением временных срезов между спутниковыми и наземными

наблюдениями. Для повышения достоверности рекомендуется использовать ансамблевые методы, кросс-валидацию, интеграцию с наземными и БПЛА-данными, а также регулярное обновление обучающих выборок [4–6].

Mapflow, CoGIS, ENVI, ERDAS IMAGINE и eCognition, а также открытые решения QGIS и SNAP поддерживают объектно-ориентированную классификацию, интеграцию с LiDAR и радарными данными, а также имеют широкий набор плагинов для работы с нейросетями¹⁸ [10]. Облачные сервисы, такие как Google Earth Engine, EO Browser и Planet Explorer, обеспечивают визуализацию, анализ и автоматизацию мониторинга, поддерживая пользовательские скрипты и индексы¹⁹ [5].

Нормативная база, организационные и экономические аспекты. Не менее важным аспектом проблемы является актуальная нормативная база. В новой редакции Лесного кодекса РФ данные дистанционного зондирования предусматривается использовать в целях государственной инвентаризации, воспроизводства лесов, лесопатологического и пожарного мониторинга. Приказ Минприроды России от 19.03.2025 № 115 закрепил требования к отчётности, включая обязательное использование спутниковых данных и специализированного программного обеспечения для фиксации породного состава, объёмов заготовки и мероприятий по охране лесов [11]. Дополняют систему постановления Правительства РФ и нормативные документы Росстандарта, регламентирующие порядок обработки и хранения данных дистанционного зондирования Земли. На международном уровне действуют Конвенция о передаче и использовании данных ДЗЗ (1978), принципы ООН по

¹³ Нейросети для семантической сегментации: U-Net, LinkNet, PSPNet [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.braintools.ru/article/13406> (дата обращения: 01.12.2025).

¹⁴ Satellite-UAV-Aerial-Image-Semantic-Segmentation-DeepLabV3-UNet-PSPNet – GitHub [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/daiphuongngo/Satellite-UAV-Aerial-Image-Semantic-Segmentation-DeepLabV3-UNet-PSPNet> (дата обращения: 01.12.2025).

¹⁵ Подробный анализ показателей производительности — Документы Ultralytics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.ultralytics.com/ru/guides/yolo-performance-metrics/> (дата обращения: 01.12.2025).

¹⁶ Анализ данных Sentinel-2 в экологическом мониторинге: ИИ-решение «Экосистема PRO» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kartadlyavas.ru/analiz-dannyh-sentinel-2-v-ekologicheskom-monitoringe-ii-reshenie-ekosistema-pro/> (дата обращения: 01.12.2025).

¹⁷ Terrestrial Applications part 1 – Deforestation Viewed from Multiple Sensors [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://google-earth-engine.com/Terrestrial-Applications-part-1/Deforestation-Viewed-from-Multiple-Sensors/> (дата обращения: 01.12.2025).

дистанционному зондированию Земли (1986) и другие акты. Между тем развитие средств ДЗЗ и инструментов по их обработке определяет необходимость постоянной актуализации нормативной и законодательной баз. Прежде всего это касается смежных отраслей права [10, 12].

Внедрение современных технологий в практику лесоустройства в приполярных районах нуждается в комплексном подходе. Ключевыми направлениями являются:

- ✓ интеграция оптических (при возможности дополненных данными SAR, LiDAR) и данных БПЛА для повышения точности мониторинга¹⁶ [4, 5];
- ✓ автоматизация рабочих процессов на базе облачных платформ^{14,15};
- ✓ формирование и регулярное обновление эталонных баз данных с использованием наземных наблюдений и БПЛА²⁰;
- ✓ обязательная валидация результатов дешифрирования и публикация метрик качества²¹, а также подготовка специалистов по обработке спутниковых данных и интеграции ГИС-технологий в региональное лесное хозяйство;
- ✓ унификация форматов и протоколов обмена данными для бесшовной интеграции спутниковых, аэрокосмических и наземных измерений²²;
- ✓ уделение должного внимания экономической оценке и реализации пилотных проектов для обоснования инвестиций и выбора оптимального сочетания технологий;
- ✓ развитие программ обучения персонала для ускорения передачи технологий в региональную практику.

Экономические и организационные аспекты также играют важную роль²³. Автоматизация

обработки данных позволяет существенно снизить затраты на мониторинг и повысить оперативность реагирования на угрозы, такие как лесные пожары, незаконные рубки и деградация лесов. Прозрачность и открытость данных обеспечивают доступ к результатам мониторинга для федеральных органов управления, бизнеса, научного сообщества и общественности, повышая доверие и эффективность управления лесами². Кроме того, внедрение новых технологий способствует соблюдению прав коренных народов и местных сообществ: оценка лесных насаждений и регулирование традиционного землепользования (например, выпас оленей) позволяют минимизировать ущерб от хозяйственной деятельности и обеспечить устойчивое развитие северных территорий.

Заключение

Современные методы автоматизированного дешифрирования оптических спутниковых снимков открывают новые возможности для получения объективной, актуальной и пространственно детализированной информации о состоянии лесных насаждений в труднодоступных притундровых регионах европейской части России. Развитие нейросетевых архитектур, интеграция с LiDAR и радарными данными, появление гиперспектральных сенсоров и облачных вычислительных платформ позволяют существенно повысить точность, скорость и устойчивость мониторинга даже в условиях низкой продуктивности насаждений, мозаичности ландшафта и сложных сезонных явлений. Внедрение этих технологий требует комплексного подхода: развития нормативной базы, подготовки кадров, интеграции различных источников данных, автоматизации рабочих

²⁰ Мониторинг лесных пожаров, лесов с БПЛА: беспилотники в лесном хозяйстве [Электронный ресурс]. – <https://www.geoscan.ru/ru/application/forestry> (дата обращения: 01.12.2025).

²¹ Преимущества спутникового мониторинга лесов // Глонасс Глобал [Электронный ресурс]. – <https://glonass-global.ru/articles/satellite-monitoring/seven-benefits-to-forest-satellite-monit/> (дата обращения: 01.12.2025).

²² В России создают группировку малых спутников для мониторинга Севморпути [Электронный ресурс]. – <https://prokosmos.ru/2025/10/09/v-rossii-sozdayut-gruppirovku-malikh-sputnikov-dlya-monitoringa-sevmorputi> (дата обращения: 01.12.2025).

²³ Преимущества спутникового мониторинга лесов // Глонасс Глобал [Электронный ресурс]. – <https://glonass-global.ru/articles/satellite-monitoring/seven-benefits-to-forest-satellite-monit/> (дата обращения: 01.12.2025).

процессов и обеспечения прозрачности результатов. Особое внимание должно уделяться формированию и обновлению эталонных баз данных, валидации моделей, оценке неопределённости и учёту специфики ландшафтов и климата.

В перспективе ожидается дальнейшее повышение точности и детализации мониторинга за счёт внедрения гиперспектральных данных, расширения группировки спутников Sentinel-2,

развития отечественных платформ (Канопус-В, Ресурс-П), а также интеграции с БПЛА и наземными наблюдениями. Это позволит не только повысить эффективность государственного мониторинга и лесоустройства, но и обеспечить выполнение международных обязательств по климату, сохранению биоразнообразия и устойчивому развитию северных территорий европейской части России²³.

Список источников

1. Семёнов, В.А. Природа притундровых лесов европейской части России и основы хозяйства в них / В.А. Семёнов, В.Ф. Цветков // Лесной журнал. – 2004. – № 3. – С. 18–25.
2. Оценка запасов фитомассы лесных пород по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения (на примере лесов Ханты-Мансийского АО) / Е.Н. Соколова, В.Н. Сурков, Д.В. Ершов, В.А. Хамедов // Вопросы лесной науки. – 2018. – № 1. – С. 4–20. DOI:10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-23. – Режим доступа: https://jfsi.ru/1-1-2018-sochilova_et_all/ (дата обращения: 01.12.2025).
3. Друки, А.А. Применение нейросетевых алгоритмов для семантической сегментации спутниковых снимков поверхности Земли / А.А. Друки, В.Г. Спицын // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 63. – [С. 62–71]. DOI: 10.17223/19988605/63/8. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-neyrosetevykh-algoritmov-dlya-semanticheskoy-segmentatsii-sputnikovyyh-snimkov-poverhnosti-zemli> (дата обращения: 12.02.2026).
4. Integrating spaceborne LiDAR and Sentinel-2 images to estimate forest aboveground biomass in Northern China. – Текст : электронный / J. Fugen, D. Muli, T. Jie, Fu Liyong, S. Hua // Carbon Balance Manag. – 2022. – Sep 1; 17(1):12. doi: 10.1186/s13021-022-00212-y. – Режим доступа: <https://cbmjournals.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13021-022-00212-y>
5. Estimating Forest Aboveground Biomass in Tropical Zones by Integrating LiDAR and Sentinel-2B Data. – Текст : электронный / Z. Chen, X. Yang, X. Pan, T. Wu [et al.] // MDPI. – April 2025. – 17(8):3631. DOI: 10.3390/su17083631. – Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3631>
6. Использование спутниковых данных для мониторинга биоразнообразия лесов. – Текст : электронный / А.С. Исаев, С.В. Князева, М.Ю. Пузаченко [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 2. – С. 1–12. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/profile/T-Chernenkova-2/publication/292931587_Use_of_Satellite_Data_for_Monitoring_Biodiversity_of_Forest/links/56b1f1ae08ae5ec4ed4b1512/Use-of-Satellite-Data-for-Monitoring-Biodiversity-of-Forest.pdf. (дата обращения: 01.12.2025).
7. The New Hyperspectral Satellite PRISMA: Imagery for Forest Types Discrimination. – Текст : электронный / E. Vangi [et al.] // Sensors (MDPI). – 2021. – 21(4):1182. doi: 10.3390/s21041182. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/s21041182>. (дата обращения: 01.12.2025).
8. Особенности применения лесотаксационной информации при тестировании космических снимков / Ю.С. Галкин, В.С. Шалаев, Ю.П. Батырев, В.Н. Потапов, В.П. Семенова, Ч.Д. Эсеналиев // Лесной вестник. – 2010. – № 7. – С. 37–39.
9. Мясоедов, С.А. Программное обеспечение для автоматизации дешифрирования космических снимков. – Текст : электронный / С.А. Мясоедов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – № 6. – С. 207–212. – DOI: 10.33764/2618-981X-2021-6-207-212. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnoe-obespechenie-dlya-avtomatizatsii-deshifirovaniya-kosmicheskikh-snimkov> (дата обращения: 01.12.2025).
10. Общая структура российского законодательства, регулирующего съемку Земли из космоса // Земля из космоса: законодательство, правовое регулирование и судебная практика : под общей редакцией А.А. Балагурова. – Москва, 2014. – С. 7–29.
11. Об утверждении перечня информации, включаемой в отчет об использовании лесов, порядка фиксации этой информации, формы и порядка представления отчета об использовании лесов, а также требований к формату отчета об использовании лесов в электронной форме. Приказ Минприроды России от 19.03.2025 № 115. – Текст : электронный. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-19032025-n-115-ob-utverzhenii/> (дата обращения: 01.12.2025).
12. Ермошкин, Е.С. Современные средства автоматизированного дешифрирования космических снимков и их использование в процессе создания и обновления карт. – Текст : электронный / Е.С. Ермошкин // ESRI CIS ArcReview. ГИС и картография. – 2009. – № 1 (48). – Режим доступа: <https://arcreview.esri-cis.ru/2009/03/11/image-decryption/> (дата обращения: 01.12.2025).

References

1. Semenov, V.A. Priroda pritundrovyyh lesov evropejskoj chasti Rossii i osnovy hozyajstva v nih / B.A. Semenov, V.F. Cvetkov // Lesnoj zhurnal. – 2004. – № 3. – S. 18–25.
2. Ocenka zapasov fitomassy lesnyh porod po sputnikovym izobrazheniyam vysokogo prostranstvennogo razresheniya (na primere lesov Hanty-Mansijskogo AO) / E.N. Sochilova, V.N. Surkov, D.V. Ershov, V.A. Hamedov // Voprosy lesnoj nauki. – 2018. – № 1. – S. 4–20. DOI: 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-23. – Rezhim dostupa: https://jfsi.ru/1-1-2018-sochilova_et_all/ (data obrashcheniya: 01.12.2025).
3. Druki, A.A. Primenenie nejrosetevykh algoritmov dlya semanticheskoy segmentacii sputnikovyyh snimkov poverhnosti Zemli / A.A. Druki, V.G. Spicyn // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – 2023. – № 63. – [S. 62-71]. DOI: 10.17223/19988605/63/8. – Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-nejrosetevykh-algoritmov-dlya-semanticheskoy-segmentatsii-sputnikovyyh-snimkov-poverhnosti-zemli> (data obrashcheniya: 12.02.2026).
4. Integrating spaceborne LiDAR and Sentinel-2 images to estimate forest aboveground biomass in Northern China. – Tekst : elektronnyj / J. Fugen, D. Muli, T. Jie, Fu Liyong, S. Hua // Carbon Balance Manag. – 2022. – Sep 1; 17(1):12. doi: 10.1186/s13021-022-00212-y. – Rezhim dostupa: <https://cbmjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13021-022-00212-y>
5. Estimating Forest Aboveground Biomass in Tropical Zones by Integrating LiDAR and Sentinel-2B Data. – Tekst : elektronnyj / Z. Chen, H. Yang, H. Pan, T. Wu [et al.] // MDPI. – April 2025. – 17(8):3631. DOI: 10.3390/su17083631. – Rezhim dostupa: <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/8/3631>
6. Ispol'zovanie sputnikovyyh dannyh dlya monitoringa bioraznoobraziya lesov. – Tekst : elektronnyj / A.S. Isaev, S.V. Knyazeva, M.Yu. Puzachenko [i dr.] // Issledovanie Zemli iz kosmosa. – 2019. – № 2. – C. 1–12. – Rezhim dostupa: https://www.researchgate.net/profile/T-Chernenkova-2/publication/292931587_Use_of_Satellite_Data_for_Monitoring_Biodiversity_of_Forest/links/56b1f1ae08ae5ec4ed4b1512/Use-of-Satellite-Data-for-Monitoring-Biodiversity-of-Forest.pdf. (data obrashcheniya: 01.12.2025).
7. The New Hyperspectral Satellite PRISMA: Imagery for Forest Types Discrimination. – Tekst : elektronnyj / E. Vangi [et al.] // Sensors (MDPI). – 2021. – 21(4):1182. doi: 10.3390/s21041182. – Rezhim dostupa: <https://doi.org/10.3390/s21041182>. (data obrashcheniya: 01.12.2025).
8. Osobennosti primeneniya lesotaksacionnoj informacii pri testirovanii kosmicheskix snimkov / Yu.S. Galkin, V.S. Shalaev, Yu.P. Baty` rev. V.N. Potapov, V.P. Semenova, Ch.D. E`senaliev // Lesnoj vestnik. – 2010. – № 7. – S. 37-39.
9. Myasoedov, S.A. Programmnoe obespechenie dlya avtomatizacii deshifirovaniya kosmicheskix snimkov. – Tekst : elektronnyj / S.A. Myasoedov // Interekspo Geo-Sibir'. – 2021. – № 6. – S. 207–212. – DOI: 10.33764/2618-981H-2021-6-207-212. – Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnoe-obespechenie-dlya-avtomatizatsii-deshifirovaniya-kosmicheskix-snimkov> (data obrashcheniya: 01.12.2025).
10. Obshchaya struktura rossijskogo zakonodatel'stva, reguliruyushchego s'emku Zemli iz kosmosa // Zemlya iz kosmosa: zakonodatel'stvo, pravovoe regulirovanie i sudebnaya praktika : pod obshchej redakciej A.A. Balagurova. – Moskva, 2014. – S. 7–29.
11. Ob utverzhdenii perechnya informacii, vlyuchaemoj v otchet ob ispol'zovanii lesov, poryadka fikscii etoj informacii, formy i poryadka predstavleniya otcheta ob ispol'zovanii lesov, a takzhe trebovaniy formatu otcheta ob ispol'zovanii lesov v elektronnoj forme. Prikaz Minprirody Rossii ot 19.03.2025 № 115. – Tekst : elektronnyj. – Rezhim dostupa: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minprirody-rossii-ot-19032025-n-115-ob-utverzhdenii/> (data obrashcheniya: 01.12.2025).
12. Ermoshkin, E.S. Sovremennye sredstva avtomatizirovannogo deshifirovaniya kosmicheskix snimkov i ih ispol'zovanie v processe sozdaniya i obnovleniya kart. – Tekst : elektronnyj / E.S. Ermoshkin // ESRI CIS ArcReview. GIS i kartografiya. – 2009. – № 1 (48). – Rezhim dostupa: <https://arcreview.esri-cis.ru/2009/03/11/image-decryption/> (data obrashcheniya: 01.12.2025).