

Научная статья

УДК 630

DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700970-202503-11>

Пространственные данные в мониторинге лесных экосистем

Н.Ю. Гушан¹

¹ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации (Москва, Россия)

¹ 249351@edu.fa.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Россия обладает огромными лесными массивами, которые необходимо беречь от воздействия лесных пожаров, вредителей, климатических изменений, а также хозяйственных вмешательств. Для оценки таких воздействий в настоящее время применяют новейшие инженерно-информационные технологии.

Цель. Проанализировать технические возможности ограничения инженерно-информационных технологий применительно к лесным экосистемам, а также показать, как их сочетание способствует решению прикладных задач.

Результаты. Рассмотрены современные технологии пространственного мониторинга лесных экосистем с учетом интеграции экологических и инженерных подходов. Обобщены методы сбора данных: спутниковая и авиационная съемка, наземные сенсоры, геоинформационные системы, машинное обучение и технологии искусственного интеллекта. Отмечено, что данные мониторинга имеют высокую динамику и могут содержать сложные нелинейные зависимости, что предъявляет высокие требования к разрешающим способностям и точности систем наблюдения. Проанализированы основные проблемы и предложены подходы к решению: многомасштабная интеграция данных, использование методов обработки больших данных и алгоритмов машинного обучения для фильтрации шумов и учета сложных закономерностей. Приведены примеры применения технологий в лесовосстановлении, оценке биомассы, мониторинге пожаров и состояния лесов.

Практическая значимость. Результаты проведенных исследований помогут в развитии пространственного мониторинга лесных экосистем.

Ключевые слова

Пространственный мониторинг, лесные экосистемы, дистанционное зондирование, ГИС, машинное обучение, точность данных

Для цитирования

Гушан Н.Ю. Пространственные данные в мониторинге лесных экосистем // Нелинейный мир. 2025. Т. 23. № 3. С. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700970-202503-11>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Россия занимает ведущую роль по лесным ресурсам мира – лесные массивы занимают более 20 % суши и общей площади страны (более 1,18 млрд га) [1]. Разнообразие природно-климатических условий и постоянное влияние антропогенных факторов делают состояние лесных экосистем чрезвычайно динамичным. Регулярный мониторинг изменений лесного покрова необходим для оценки последствий пожаров, вредителей, климатических изменений и хозяйственных вмешательств. При этом данные мониторинга должны поступать с высокой оперативностью и пространственной детализацией: для решения задач пожарной безопасности или лесопатологического надзора требуется практически реальное время и разрешение на уровне отдельных деревьев. Однако консервативные методы съемки (наземные обходы, пилотируемая авиация) оказываются дорогостоящими и медленными на больших территориях. Применение дистанционных технологий позволяет получать однородные данные по всей стране и выявлять изменения оперативно [2]. Например, в Германии и других странах активно применяются дроны для мониторинга состояния лесов, поскольку «высокая динамика лесов» требует своевременных и многократных наблюдений, часто на очень высоком пространственном разрешении, где традиционные технологии дистанционного зондирования достигают своих пределов.

Современный пространственный мониторинг лесов основан на интеграции экологических знаний (о биологии деревьев, экосистемных процессах) с инженерно-информационными технологиями (ДЗЗ, сенсоры, ГИС, ИИ).

Ц е л ь р а б о т ы – проанализировать технические возможности и ограничения таких технологий применительно к лесным экосистемам, а также показать, как их сочетание способствует решению прикладных задач.

В работе рассмотрены основные типы технологий наблюдения, особенности данных и проблемные места интерпретации, а также приведены конкретные примеры их использования.

Обзор применяемых технологий

Основные технологии пространственного мониторинга лесов включают в себя:

- спутниковую и авиационную съемку;
- наземные сенсоры;
- геоинформационные системы (ГИС);
- методы анализа данных (в том числе машинное обучение).

Спутниковое дистанционное зондирование (ДЗЗ). К нему относятся мультиспектральные спутники (Landsat, Sentinel-2 и др.), гиперспектральные миссии (например, EnMAP, PRISMA) и радарные (Sentinel-1 SAR, RADARSAT). Спутники позволяют охватить большие площади и дают мультиспектральные изображения растительности. Так, американский Landsat дает разрешение около 30 м, а европейский Sentinel-2 – 10–20 м при повторяемости ~5 дней. Оптические спутники обеспечивают высокое разрешение (QuickBird, WorldView) порядка 1 м или лучше, но имеют ограниченный угол обзора и высокую стоимость данных. Радиолокационные спутники позволяют наблюдать лес круглый год (например, Sentinel-1 с разрешением 10 м), но требуют сложной обработки информации и выдают иные типы признаков (микроструктура, влажность). Комбинация разных спутниковых данных (спектральные и радарные) широко применяется для определения биомассы, типов леса, плотности деревьев и др. [3].

Авиационная съемка. Лазерное сканирование (LiDAR) с борта самолетов или вертолетов обеспечивает очень высокое пространственное разрешение (десятки сантиметров) и позволяет реконструировать рельеф и трехмерную структуру кроны деревьев. LiDAR-сессии особенно ценны для построения цифровых моделей высот леса и оценки деревьев по объему и биомассе. Недостаток данной технологии заключается в высокой стоимости полетов и трудоемкой обработке.

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА). Дроны играют все более заметную роль: они сочетают маневренность авиации с относительной дешевизной и возможностью частых полетов. БПЛА могут быть оснащены RGB-камерами, мульти- или гиперспектральными камерами, тепловизорами, LiDAR-сканерами и др. Например, с помощью дронов выполняются картирование стволов и здоровья деревьев, детектирование областей засухи или вредителей и т.д. Современные исследования подчеркивают перспективность объединения LiDAR и мультиспектральных данных с дронов для мониторинга лесов [4]. Лазерное сканирование дрона, например, позволяет определять высоту и объем отдельных деревьев, а мультиспектральные изображения – оценивать содержание хлорофилла и урон биомассе.

Наземные сенсоры и сети. Для непрерывного мониторинга локальных параметров устанавливаются стационарные сенсорные узлы: метеостанции, почвенные датчики влаги, датчики CO₂, акустические сенсоры (для звуков животных или трещины деревьев) и др. Облачные вычисления и IoT (Internet of Things) позволяют объединять эти узлы в беспроводные сенсорные сети (WSN), обеспечивая мониторинг в режиме реального времени, широкое покрытие и долговременные наблюдения [5].

Например, беспроводные сенсорные сети могут автоматически передавать данные на сервер для выдачи оповещений о пожаре или резком изменении экосистемных параметров. Беспроводные сети имеют большие преимущества в масштабе и оперативности, хотя требуют решения проблем энергоснабжения и связи.

Геоинформационные системы (ГИС). ГИС – основа для хранения и анализа пространственных данных. С их помощью можно интегрировать спутниковые снимки, топографические карты, результаты наземных измерений и статистические данные в единую картографическую среду. Так в автоматизированном режиме можно построить тематические карты: типы леса, лесопатологию, пожарную опасность и др. ГИС позволяют проводить пространственный анализ (буферные зоны, корректировка на рельеф) и служат базой для систем поддержки принятия решений.

Аналитические методы (машинное обучение и ИИ). Повышение объемов данных вынуждает использовать современные алгоритмы. Методы машинного обучения (случайный лес, метод опорных векторов, нейронные сети) и глубокого обучения активно применяются для классификации спутниковых изображений (определение пород, картирование вырубок, выявление очагов болезни) и регрессии (оценка биомассы, объема). Например, для классификации пород деревьев на Sentinel-2 лучшие показатели дают гибридные модели с учетом многолетней серии снимков и топографических факторов [6]. Алгоритмы искусственного интеллекта (ИИ) помогают обрабатывать многомерные спектральные данные и выявлять сложные нелинейные зависимости. Вместе с тем они требуют больших обучающих выборок, а результаты могут зависеть от качества разметки и выбора модели. Мощные облачные платформы (Google Earth Engine и др.) предоставляют инструменты для работы с большими временными рядами спутниковых данных и готовые ML-инструменты для классификации/анализов [7].

Особенности данных

Каждый из перечисленных источников данных имеет свои особенности и ограничения. Рассмотрим их подробнее.

1. *Пространственное и временное разрешение.* У дешевых или частых наблюдений, как правило, встречается грубое разрешение. Например, Landsat покрывает территорию раз в 16 дней с разрешением 30 м, что недостаточно для деталей и часто совпадает с облачным «шумом». Для многих «лесных задач» необходимо разрешение 5–10 м или лучше, а периодичность – 5–10 дней. Sentinel-2 (разрешение 10 м, периодичность ~5 дней) и коммерческие спутники (1–3 м) обеспечили прогресс, но и у них остается проблема облаков и затенений в густом лесу [8]. Авиация решает проблему разрешения (десятки сантиметров), но не может быстро охватить сотни квадратных километров. Также применение авиации ограничено погодными условиями.

2. *Атмосферные и прочие шумы.* Оптические снимки искажены атмосферой, дымом и облаками, что требует коррекции. Радиолокационные данные «страдают» шумом растра и неопределенностью из-за погодных явлений. Геолокационные ошибки (неточное положение) могут приводить к смещению контуров. Также может возникать эффект смешанных пикселей: в одном пикселе спутника совмещаются кроны разных деревьев или открытый грунт и растительность, затрудняя классификацию по пикселю. Это особенно заметно при сравнении снимков с разным разрешением.

3. *Точность и верификация.* Недостаток данных наземного контроля ограничивает проверку результатов. Полевая таксация и учет деревьев – трудоемкий процесс, доступный лишь на малых участках. Без валидации модель классификации (например, алгоритмы машинного обучения) может давать систематические ошибки. Точность детектирования лесных нарушений или повреждений зависит от соотношения сигнал/шум.

4. *Сложность лесных экосистем.* Леса – в высшей степени неоднородные структуры. Одни и те же виды деревьев могут по-разному отражать свет в разных областях из-за климата и почв. В горных лесах рельеф вызывает сильные топографические эффекты: освещенность склона меняет спектральный сигнал деревьев [9]. Это приводит к трудностям в разграничении сходных классов (например, разной породы или стадий заболачивания). Изменчивость фенологии (сезонные изменения цвета и состояния леса) порождает нелинейные зависимости во времени: например, резкое увядание (сушь) может выглядеть как пожароопасность или начало заболевания. Эти особенности делают интерпретацию данных непростой, нередко требуя дополнительных переменных (климатических, топографических) и сложных моделей.

5. *Динамика данных.* Лесные системы характеризуются высокими темпоральными изменениями. Согласно исследованию, «высокая динамика лесов требует своевременной и многократной съемки, часто на очень высоком пространственном разрешении, где традиционные методы ДЗЗ достигают своих пределов» [10]. Периодичность наблюдений и масштаб изменений должны согласовываться: например, для мониторинга пожаров и санитарного состояния важны изменения за дни, а для углеродного цикла – за годы. Временной ряд снимков сам по себе может быть нерегулярным из-за облаков, а экосистемные процессы – нелинейными. Поэтому при анализе часто применяют агрегирование по месяцам/сезонам и методы машинного обучения для выявления закономерностей [11].

Для решения этих проблем применяются стратегии слияния данных: объединяются оптические, радарные и LiDAR-измерения, а также данные БПЛА и наземных сенсоров. Это позволяет компенсировать слабые места каждого источника. Например, при облачности используют радар Sentinel-1 для слежения за изменениями леса, а при низкой растительности – оптику для оценки хлорофилла. Облачные вычисления и специализированные инструменты (Google Earth Engine, GEE) позволяют обрабатывать большие многовременные массивы и применять параллельные алгоритмы [12]. Алгоритмы машинного обучения (случайный лес, глубокие сети) способны учитывать сложные и нелинейные взаимосвязи между признаками (спектральные индексы, текстурные параметры и т.д.), однако они требуют тщательной калибровки и большого массива обучающих данных.

Примеры применения технологий

Приведем примеры применения инженерно-информационных технологий в восстановлении лесов, оценке состояния биомассы, мониторинге лесных пожаров и других природных явлений.

Мониторинг пожаров. Космические системы позволяют выявлять очаги возгорания по температурным аномалиям и изменениям растительности. Например, Рослесхоз использует данные спутников (MODIS, Sentinel и др.) для раннего предупреждения и оценки масштабов пожаров. С вводом в строй новых спутниковых систем в 2015–2018 гг. существенно расширились возможности системы: были увеличены периодичность наблюдений и возможность гарантированного получения данных высокого пространственного разрешения (10–50 м) для уточнения площади пройденного пожара [13]. Спутниковые оповещения о пожарах сейчас могут поступать в реальном времени в мобильные приложения для лесников.

Выявление таксации и биоразнообразия. Спутниковые данные используются для оценки состава и структуры лесов. Совмещение LiDAR и мультиспектральных измерений дронов позволяет с высокой точностью определять виды деревьев и ключевые показатели здоровья леса [14]. Так, исследования показали, что мультиспектральный БПЛА с восемью полосами (аналогичен спутнику WorldView-2) в задачах классификации пород может давать точность свыше 90 % [15]. С помощью анализов серий спутниковых снимков выполняются картины вырубок, деградации и восстановления леса: сочетание временных рядов Sentinel-2 и топографических данных с алгоритмами машинного обучения позволяет различать даже сходные типы растительности.

Определение запасов углерода и биомасса. Для оценки лесного углеродного баланса и объемов биомассы строятся трехмерные модели лесного покрова. Современные методы используют облака точек LiDAR и высокодетализированные аэрофотомодели -- они позволяют получать плотность стволов и крон с точностью 10–15 % [16]. Затем эти данные масштабируются с помощью спутниковых индексов растительности и статистики. Так, в одном исследовании для горных лесов показано, что мультиспектральные и топографические признаки Sentinel-2 вкупе с RF/SVM-классификаторами дают надежные карты распространения основных видов деревьев [17]. Комплексный подход с калибровкой по наземным измерениям позволяет строить региональные оценки углеродных стоков лесов.

Лесопатологический мониторинг. Изменения спектральных характеристик крон деревьев с помощью дистанционных методов используются для раннего выявления очагов вредителей или

болезней. Например, патологии деревьев меняют отражение в красном и ближнем ИК-диапазоне; детекторы на дронах могут идентифицировать «голые» или обесцвеченные кроны. Решение таких задач часто строится на нейросетевых сегментирующих алгоритмах, анализирующих структуру кроны на высокоразрешенных снимках.

Заключение

Пространственный мониторинг лесных экосистем развивается быстрыми темпами под влиянием технологических инноваций. Современные спутниковые платформы и дроны позволяют получать все более детальные и частые данные, а интеграция разнообразных источников (спутники, беспилотники, наземные сенсоры) создает мультиспектральное представление состояния лесов. Тем не менее высокая динамика лесных процессов и сложность экосистем накладывают серьезные требования к качеству и объему данных. Основные проблемы, которые приходится решать с помощью современных технологий, – это обеспечение достаточной пространственной и временной детализации при сохранении точности, а также необходимость интерпретации больших объемов разнородной информации.

Для решения этих проблем активно применяются:

облачные вычисления и платформы big data (например, Google Earth Engine) для обработки многолетних временных рядов [18];

машинное обучение и глубокие нейросети для распознавания сложных шаблонов и устранения шумов [19];

мультигибридные подходы, объединяющие оптические, радарные и лазерные данные [20].

Кроме того, необходимо развитие наземных сетей контроля и создание открытых баз для обучения ИИ (например, OpenForest). Интеграция экологических моделей (например, динамики биомассы или распространения вредителей) с инженерными системами мониторинга позволит предсказывать возможные изменения лесов.

В целом, комбинирование экологических знаний с высокотехнологичными методами мониторинга создает потенциал для эффективного управления лесными ресурсами [21–29]. Комплексная платформа дистанционного мониторинга может стать основой для цифрового лесоводства, где оперативно собираются данные о состоянии лесов, автоматически выявляются отклонения и генерируются рекомендации по охране и управлению.

Список источников

1. Wang R., Sun Y., Zong J. et al. Remote Sensing Application in Ecological Restoration Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sens.* 2024. V. 16. № 12. P. 2204. DOI: 10.3390/rs16122204 (дата обращения: 15.07.2025).
2. Liu P., Ren C., Wang Z. et al. Evaluating the Potential of Sentinel-2 Time Series Imagery and Machine Learning for Tree Species Classification. *Remote Sens.* 2024. V. 16. № 2. P. 293. DOI: 10.3390/rs16020293 (дата обращения: 15.07.2025).
3. Ecke S., Dempewolf J., Frey J. et al. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sens.* 2022. V. 14. № 13. P. 3205. DOI: 10.3390/rs14133205 (дата обращения: 15.07.2025).
4. Lanzolla A., Spadavecchia M. Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring. *Sensors.* 2021. V. 21. № 4. P. 1172. DOI: 10.3390/s21041172 (дата обращения: 15.07.2025).
5. Savinelli B., Tagliabue G., Vignali L. et al. Integrating Drone-Based LiDAR and Multispectral Data for Tree Monitoring. *Drones.* 2024. V. 8. № 12. P. 744. DOI: 10.3390/drones8120744 (дата обращения: 15.07.2025).
6. Котельников Р.В., Луян Е.А., Барталев С.А., Еришов Д.В. Космический мониторинг лесных пожаров: история создания и развития ИСДМ-Рослесхоз // *Лесоведение.* 2019. № 5. С. 399–409. DOI: 10.1134/S0024114819050048 (дата обращения: 15.07.2025).
7. Еришов Д.В., Барталев С.А., Луян Е.А. Космический мониторинг лесов России: достижения и перспективы // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2018. Т. 15. № 6. С. 174–190.
8. Wulder M.A., Coops N.C., White J.C. et al. Remote sensing for operational monitoring of forest disturbances: A review. *Remote Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 1646–1667.
9. Zhou Y., Wang Y., Liu Y. et al. Forest Inventory Using Airborne LiDAR: A Review. *Forest Ecosystems.* 2021. V. 8. № 1. DOI: 10.1186/s40663-021-00297-3 (дата обращения: 15.07.2025).
10. Pasquarella V.J., Holden C.E., Kaufman L. et al. From imagery to ecology: leveraging time series of Landsat observations to quantify forest disturbance and ecological response. *Remote Sens. Environ.* 2022. V. 276. 113063.

11. Li W., Guo Q., Jakubowski M.K. et al. A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2012. V. 78. № 1. P. 75–84.
12. Reiche J., Lucas R., Mitchell A.L. et al. Combining satellite data for better forest monitoring. *Nature Climate Change.* 2016. V. 6. P. 120–122.
13. Бусыгин Б.С., Новиков А.В. Использование данных Sentinel-1 и Sentinel-2 для мониторинга лесных пожаров // Изв. РАН. Сер.: Географическая. 2020. № 3. С. 89–97.
14. Барталев С.А., Еришов Д.В. и др. Комплексная система спутникового мониторинга лесов России // Лесоведение. 2022. № 6. С. 453–466.
15. Asner G.P., Martin R.E., Knapp D.E. et al. Spectroscopy of canopy chemicals in tropical forests. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2011. V. 108. № 4. P. 1498–1503.
16. Хмелевская И.В., Ненахов Ю.С. Использование беспилотных летательных аппаратов в лесном мониторинге // Инженерный журнал: наука и инновации. 2022. № 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-3-2476 (дата обращения: 15.07.2025).
17. Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series. *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. P. 2897–2910.
18. Breidenbach J., Astrup R., Næsset E. et al. Empirical models for forest biomass estimation using LiDAR data. *Forest Ecol. Manag.* 2010. V. 260. P. 156–167.
19. Zhou T., Yu Q., Meng Q. Review of deep learning in forest mapping using remote sensing data. *Forest Ecol. Manag.* 2023. V. 528. 120660.
20. Данилова И.А., Борисова Н.Н. Применение ГИС для оценки и мониторинга лесных ресурсов. *Геоинформатика.* 2021. № 1. С. 23–31.
21. Кочкаров Р.А., Чиров Д.С., Тимошенко А.В., Казанцев А.М. Модель пространственно-распределенной информационной системы непрерывного мониторинга с предфрактальной динамической структурой в условиях воздействия дестабилизирующих факторов. *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт.* 2025. Т. 19. № 1. С. 4–12. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-4-12 (дата обращения: 15.07.2025).
22. Кочкаров Р.А., Балдычев М.Т., Казанцев А.М. [и др.] Алгоритм оценки структурно-функциональной устойчивости и целостности гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга // Труды МАИ. 2024. № 137. EDN: IJZRAI.
23. Шевцов В.А., Казанцев А.М., Тимошенко А.В. и др. Показатель структурной эффективности управления информационным взаимодействием в гетерогенной сети передачи данных пространственно-распределенной системы мониторинга // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2024. Т. 20. № 2. С. 124–131. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.019 (дата обращения: 15.07.2025).
24. Шевнина Ю.С., Рябов П.Е., Прокопчина С.В., Кочкаров Р.А. Подходы к прогнозированию изменения состояния обеспечивающих компонентов информационно-управляющей системы // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. Т. 12. № 2(45). DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.023 (дата обращения: 15.07.2025).
25. Кочкаров Р.А., Кочкаров А.А. Теоретико-графовый алгоритм динамического назначения средств системы непрерывного мониторинга // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77. № 9. С. 44–50. DOI: 10.18127/j20700784-202309-05 (дата обращения: 15.07.2025).
26. Тимошенко А.В., Кочкаров Р.А., Кочкаров А.А. Выделение условий разрешимости NP-полных задач для класса предфрактальных графов // Моделирование и анализ информационных систем. 2021. Т. 28. № 2. С. 126–135. DOI: 10.18255/1818-1015-2021-2-126-135 (дата обращения: 15.07.2025).
27. Казанцев А.М., Кочкаров Р.А., Тимошенко А.В., Сычугов А.А. Некоторые подходы к оценке процесса функционирования структурно-динамических систем мониторинга в условиях внешних воздействий // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2021. Т. 9. № 4(35). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.005 (дата обращения: 15.07.2025).
28. Кочкаров А.А., Яцкин Д.В., Кочкаров Р.А. Применение методов теории просачиваемости для решения задач потокового планирования в транспортных сетях с учетом их структурной динамики // Теоретическая и прикладная экономика. 2021. № 1. С. 13–20. DOI: 10.25136/2409-8647.2021.1.34965 (дата обращения: 15.07.2025).
29. Chernoritskii S.S., Gushan N.Y., Khuranova K.M. Assessment of tree biomass using remote sensing techniques: validation at the territory of the 'forest lake' educational and recreational complex. *Environmental Studies and Protection Issues – 2024: Proceedings of the International Youth Scientific and Academic Conference.* Moscow. April 19. 2024. Moscow: RUDN University, 2024. P. 74–81.

Информация об авторе

Наталья Юрьевна Гушан – аспирант
SPIN-код: не представлен

Статья поступила в редакцию 18.06.2025
Одобрена после рецензирования 27.06.2025
Принята к публикации 30.06.2025

Original article

Spatial data in monitoring forest ecosystems

N.Yu. Gushan¹¹ Financial University under the Government of the Russian Federation (Moscow, Russia)¹ 249351@edu.fa.ru

Abstract

This article explores modern technologies for spatial monitoring of forest ecosystems, taking into account the integration of ecological and engineering approaches. It summarizes various data collection methods, including satellite and aerial imagery, ground-based sensors, geographic information systems (GIS), machine learning, and artificial intelligence technologies. It is emphasized that monitoring data are highly dynamic and may exhibit complex nonlinear relationships, which imposes high demands on the spatial resolution and accuracy of observation systems. The main challenges are analyzed, and potential solutions are proposed: multi-scale data integration, the use of big data processing techniques, and machine learning algorithms to filter noise and capture complex patterns. Examples are given of the application of these technologies in forest restoration, biomass estimation, wildfire monitoring, and forest condition assessment.

Keywords

Unit of measurement, web design, user interface, adaptive layout, cascading style sheets

For citation

Gushan N.Yu. Spatial data in monitoring forest ecosystems. *Nonlinear World*. 2025. V. 23. № 3. P. 88–95. DOI: <https://doi.org/10.18127/j20700970-202503-11> (In Russian)

REFERENCES

1. Wang R., Sun Y., Zong J. et al. Remote Sensing Application in Ecological Restoration Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sens.* 2024. V. 16. № 12. P. 2204. DOI: 10.3390/rs16122204 (дата обращения: 15.07.2025).
2. Liu P., Ren C., Wang Z. et al. Evaluating the Potential of Sentinel-2 Time Series Imagery and Machine Learning for Tree Species Classification. *Remote Sens.* 2024. V. 16. № 2. P. 293. DOI: 10.3390/rs16020293 (дата обращения: 15.07.2025).
3. Ecke S., Dempewolf J., Frey J. et al. UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review. *Remote Sens.* 2022. V. 14. № 13. P. 3205. DOI: 10.3390/rs14133205 (дата обращения: 15.07.2025).
4. Lanzolla A., Spadavecchia M. Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring. *Sensors*. 2021. V. 21. № 4. P. 1172. DOI: 10.3390/s21041172 (дата обращения: 15.07.2025).
5. Savinelli B., Tagliabue G., Vignali L. et al. Integrating Drone-Based LiDAR and Multispectral Data for Tree Monitoring. *Drones*. 2024. V. 8. № 12. P. 744. DOI: 10.3390/drones8120744 (дата обращения: 15.07.2025).
6. Kotelnikov R.V., Lupyan E.A., Bartalev S.A., Ershov D.V. Kosmicheskij monitoring lesnyh pozharov: istoriya sozdaniya i razvitiya ISDM-Rosleskhoz. *Lesovedenie*. 2019. № 5. S. 399–409. DOI: 10.1134/S0024114819050048 (дата обращения: 15.07.2025) (In Russian).
7. Ershov D.V., Bartalev S.A., Lupyan E.A. Kosmicheskij monitoring lesov Rossii: dostizheniya i perspektivy. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. T. 15. № 6. S. 174–190 (In Russian).
8. Wulder M.A., Coops N.C., White J.C. et al. Remote sensing for operational monitoring of forest disturbances: A review. *Remote Sens. Environ.* 2008. V. 112. P. 1646–1667.
9. Zhou Y., Wang Y., Liu Y. et al. Forest Inventory Using Airborne LiDAR: A Review. *Forest Ecosystems*. 2021. V. 8. № 1. DOI: 10.1186/s40663-021-00297-3 (дата обращения: 15.07.2025).
10. Pasquarella V.J., Holden C.E., Kaufman L. et al. From imagery to ecology: leveraging time series of Landsat observations to quantify forest disturbance and ecological response. *Remote Sens. Environ.* 2022. V. 276. 113063.
11. Li W., Guo Q., Jakubowski M.K. et al. A New Method for Segmenting Individual Trees from the Lidar Point Cloud. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2012. V. 78. № 1. P. 75–84.
12. Reiche J., Lucas R., Mitchell A.L. et al. Combining satellite data for better forest monitoring. *Nature Climate Change*. 2016. V. 6. P. 120–122.
13. Busygina B.S., Novikov A.V. Ispol'zovanie dannyh Sentinel-1 i Sentinel-2 dlya monitoringa lesnyh pozharov. *Izv. RAN. Ser.: Geograficheskaya*. 2020. № 3. S. 89–97 (In Russian).
14. Bartalev S.A., Ershov D.V. i dr. Kompleksnaya sistema sputnikovogo monitoringa lesov Rossii. *Lesovedenie*. 2022. № 6. S. 453–466 (In Russian).
15. Asner G.P., Martin R.E., Knapp D.E. et al. Spectroscopy of canopy chemicals in tropical forests. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2011. V. 108. № 4. P. 1498–1503.
16. Hmelevskaya I.V., Nenahov Yu.S. Ispol'zovanie bespilotnyh letatel'nyh apparatov v lesnom monitoringe. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*. 2022. № 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2022-3-2476 (дата обращения: 15.07.2025) (In Russian).
17. Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series. *Remote Sens. Environ.* 2010. V. 114. P. 2897–2910.
18. Breidenbach J., Astrup R., Næsset E. et al. Empirical models for forest biomass estimation using LiDAR data. *Forest Ecol. Manag.* 2010. V. 260. P. 156–167.
19. Zhou T., Yu Q., Meng Q. Review of deep learning in forest mapping using remote sensing data. *Forest Ecol. Manag.* 2023. V. 528. 120660.
20. Danilova I.A., Borisova N.N. Primenenie GIS dlya ocenki i monitoringa lesnyh resursov. *Geoinformatika*. 2021. № 1. S. 23–31 (In Russian).
21. Kochkarov R.A., Chirov D.S., Timoshenko A.V., Kazancev A.M. Model' prostranstvenno-raspredelennoj informacionnoj sistemy nepreryvnogo monitoringa s predfraktal'noj dinamicheskoy strukturoj v usloviyah vozdeystviya destabiliziruyushchih faktorov.

- T-Comm: Telekommunikacii i transport. 2025. T. 19. № 1. S. 4–12. DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-1-4-12 (data obrashcheniya: 15.07.2025) (In Russian).
22. *Kochkarov R.A., Baldychev M.T., Kazancev A.M.* i dr. Algoritm ocenki strukturno-funkcional'noj ustojchivosti i celostnosti geterogennoj seti peredachi dannyh prostranstvenno-raspredelennoj sistemy monitoringa. Trudy MAI. 2024. № 137. EDN: IJZRAI (In Russian).
 23. *Shevcov V.A., Kazancev A.M., Timoshenko A.V.* i dr. Pokazatel' strukturnoj effektivnosti upravleniya informacionnym vzaimodejstviem v geterogennoj seti peredachi dannyh prostranstvenno-raspredelennoj sistemy monitoringa. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2024. T. 20. № 2. S. 124–131. DOI: 10.36622/1729-6501.2024.20.2.019 (data obrashcheniya: 15.07.2025) (In Russian).
 24. *Shevnina Yu.S., Ryabov P.E., Prokopchina S.V., Kochkarov R.A.* Podhody k prognozirovaniyu izmeneniya sostoyaniya obespechivayushchih komponentov informacionno-upravlyayushchej sistemy. Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. 2024. T. 12. № 2(45). DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.023 (data obrashcheniya: 15.07.2025) (In Russian).
 25. *Kochkarov R.A., Kochkarov A.A.* Teoretiko-grafovyj algoritm dinamicheskogo naznacheniya sredstv sistemy nepreryvnogo monitoringa. Uspekhi sovremennoj radioelektroniki. 2023. T. 77. № 9. S. 44–50. DOI: 10.18127/j20700784-202309-05 (data obrashcheniya: 15.07.2025) (In Russian).
 26. *Timoshenko A.V., Kochkarov R.A., Kochkarov A.A.* Vydelenie uslovij razreshimosti NP-polnyh zadach dlya klassa predfraktal'nyh grafov. Modelirovanie i analiz informacionnyh sistem. 2021. T. 28. № 2. S. 126–135. DOI: 10.18255/1818-1015-2021-2-126-135 (data obrashcheniya: 15.07.2025) (In Russian).
 27. *Kazancev A.M., Kochkarov R.A., Timoshenko A.V., Sychugov A.A.* Nekotorye podhody k ocenke processa funkcionirovaniya strukturno-dinamicheskikh sistem monitoringa v usloviyah vneshnih vozdeystvij. Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii. 2021. T. 9. № 4(35). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.35.4.005 (data obrashcheniya: 15.07.2025) (In Russian).
 28. *Kochkarov A.A., Yackin D.V., Kochkarov R.A.* Primenenie metodov teorii prosachivaemosti dlya resheniya zadach potokovogo planirovaniya v transportnyh setyah s uchetom ih strukturnoj dinamiki. Teoreticheskaya i prikladnaya ekonomika. 2021. № 1. S. 13–20. DOI: 10.25136/2409-8647.2021.1.34965 (data obrashcheniya: 15.07.2025) (In Russian).
 29. *Chernoritskij S.S., Gushan N.Y., Khuranova K.M.* Assessment of tree biomass using remote sensing techniques: validation at the territory of the 'forest lake' educational and recreational complex. Environmental Studies and Protection Issues – 2024: Proceedings of the International Youth Scientific and Academic Conference. Moscow. April 19. 2024. Moscow: RUDN University, 2024. P. 74–81.

Information about the author

Natalia Yu. Gushan – Post-graduate Student

The article was submitted 18.06.2025

Approved after reviewing 27.06.2025

Accepted for publication 30.06.2025