

ЦИФРОВОЙ ЛЕС: ОТ ДАННЫХ К РЕШЕНИЯМ. КАК БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ И ИОТ СОЗДАЮТ НОВУЮ ПАРАДИГМУ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕСНЫМ СЕКТОРОМ

С.В. Фролов, В.С. Фролова

*Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова,
Воронеж, Россия*

Аннотация.

В статье рассматривается трансформация парадигмы управления лесным хозяйством под влиянием цифровых технологий. Анализируются ограничения традиционных методов мониторинга, основанных на выборочных наземных обследованиях и реактивном реагировании, которые не позволяют эффективно противостоять современным вызовам: катастрофическим пожарам, незаконным рубкам и последствиям изменения климата.

Обосновывается концепция «Цифрового леса» как комплексной экосистемы, интегрирующей микроэлектронные сенсорные системы, сети Интернета вещей (IoT) и платформы анализа больших данных. Подробно описывается архитектура такой системы, включая наземные и дистанционные сенсоры, технологии передачи данных в условиях отсутствия связи и методы машинного обучения для автоматического анализа спутниковых снимков и предиктивного моделирования.

Приводятся конкретные кейсы применения технологий для решения критически важных задач: системы раннего предупреждения и прогнозирования пожаров, автоматическое обнаружение незаконных рубок, мониторинг лесовосстановления. Особое внимание уделяется анализу экономической эффективности и правовых аспектов внедрения масштабного мониторинга.

Формулируются рекомендации по преодолению ключевых барьеров внедрения: технологических, кадровых и нормативных. Делается вывод о том, что цифровая трансформация является необходимым условием перехода к проактивной, предиктивной и устойчивой модели управления лесными ресурсами.

Ключевые слова: большое данные, Интернет вещей (IoT), микроэлектронные системы, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), цифровой двойник, устойчивое лесопользование, предиктивная аналитика, машинное обучение, лесные пожары, незаконные рубки.

DIGITAL FOREST: FROM DATA TO DECISIONS. HOW BIG DATA AND IOT ARE CREATING A NEW PARADIGM FOR FOREST SECTOR MANAGEMENT

S.V. Frolov, V.S. Frolova

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov,
Voronezh, Russia*

Abstract. The article examines the transformation of forest management paradigms under the influence of digital technologies. It analyzes the limitations of traditional monitoring methods

based on selective field surveys and reactive responses, which are ineffective in addressing modern challenges such as catastrophic wildfires, illegal logging, and the impacts of climate change.

The concept of a "Digital Forest" is substantiated as a comprehensive ecosystem integrating microelectronic sensor systems, Internet of Things (IoT) networks, and big data analytics platforms. The architecture of such a system is described in detail, including terrestrial and remote sensors, data transmission technologies in areas with limited connectivity, and machine learning methods for automated analysis of satellite imagery and predictive modeling.

Specific use cases of these technologies are presented for critical tasks: early warning and fire forecasting systems, automated detection of illegal logging, and reforestation monitoring. Particular attention is paid to the analysis of economic efficiency and legal aspects of large-scale monitoring implementation.

Recommendations are formulated to overcome key implementation barriers: technological, personnel, and regulatory. The conclusion is drawn that digital transformation is a necessary condition for transitioning to a proactive, predictive, and sustainable model of forest resource management.

Keywords: big data, Internet of Things (IoT), microelectronic systems, remote sensing, digital twin, sustainable forest management, predictive analytics, machine learning, forest fires, illegal logging.

Лесной сектор Российской Федерации, являясь стратегическим национальным достоянием, сталкивается с беспрецедентными вызовами. Изменение климата ведет к учащению экстремальных погодных условий, росту пожарной опасности и масштабным вспышкам болезней леса. Экономические факторы стимулируют браконьерство и незаконные рубки, наносящие колоссальный экологический и экономический ущерб. При этом традиционная система управления, основанная на выборочных наземных обследованиях и анализе устаревших данных, демонстрирует свою неэффективность. Реактивная парадигма, при которой действия предпринимаются после наступления негативного события, более несостоятельна.

Разрешение этого кризиса лежит в плоскости цифровой трансформации отрасли. Стремительное развитие микроэлектроники, снижение стоимости сенсоров, распространение сетей связи и мощные алгоритмы анализа данных создали уникальную возможность для построения принципиально новой системы управления — «Цифрового леса». Данная концепция предполагает создание целостной цифровой экосистемы, где непрерывный поток информации от миллионов датчиков трансформируется в автоматизированные и обоснованные управленческие решения.

Цель данной статьи — комплексно проанализировать архитектуру «Цифрового леса», выделив ключевые технологические компоненты (микроэлектроника, IoT, большие данные), продемонстрировать их практическое применение на конкретных кейсах и сформулировать дорожную карту для его внедрения в условиях современных российских реалий.

1. Технологический фундамент «Цифрового леса»

Архитектура «Цифрового леса» базируется на трех взаимосвязанных технологических слоях: сборе, анализе и визуализации данных.

1.1. Сенсоры и сети IoT

Это уровень сбора данных, обеспечивающий постоянное наблюдение за лесной средой.

Наземные стационарные сенсоры: Современные микроэлектронные устройства, питаемые от солнечных батарей или высокоемких аккумуляторов, позволяют развертывать автономные сети мониторинга. Они измеряют:

1. Климатические параметры: температура, влажность воздуха и почвы, атмосферное давление, скорость и направление ветра (для моделей пожарной опасности).
2. Параметры пожарной опасности: содержание CO₂, частиц дыма в воздухе.
3. Акустический мониторинг: распознавание звуков пил, выстрелов, двигателей тяжелой техники с помощью алгоритмов машинного обучения на самом устройстве (TinyML) или при передаче данных на сервер.

Мобильные сенсоры:

1. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА/дроны): Обеспечивают мониторинг с высоким разрешением (до нескольких см/пиксель). Оснащаются мультиспектральными и тепловизионными камерами для оценки состояния растительности (NDVI-индекс), поиска очагов возгорания под пологом леса, точного картографирования вырубок [3].
2. Датчики на технике: GPS/ГЛОНАСС-трекеры на лесовозах позволяют в режиме реального времени отслеживать маршруты, выявляя перемещения в запрещенные зоны.

Дистанционные сенсоры:

Спутники: Происходит революция за счет развития низкоорбитальных группировок (например, Planet Labs, CubeSats), обеспечивающих ежедневный мониторинг всей территории Земли со средним разрешением. Спутники с SAR-радарами (синтезированной апертурой) позволяют получать данные независимо от погодных условий и времени суток, что критически важно для оперативного обнаружения изменений [1].

1.2. Передача данных

Ключевой вызов — обеспечение связи в удаленных и труднодоступных районах. Здесь применяются технологии LPWAN (Low-Power Wide-Area Network), такие как LoRaWAN и NB-IoT, которые обеспечивают дальность связи до 10-15 км в сельской местности при крайне низком энергопотреблении. Для интеграции всех источников данных в единое пространство используются платформы IoT (например, Яндекс IoT Cloud, AWS IoT), которые агрегируют, фильтруют и первично обрабатывают потоки информации с тысяч устройств [4].

1.3. Анализ больших данных и искусственный интеллект

Собранные данные (спутниковые снимки, показания датчиков, метеоданные) образуют массив Больших данных. Их ценность раскрывается через аналитику:

1. Машинное обучение и компьютерное зрение: Нейросетевые алгоритмы (сверточные сети — CNN) обучаются на размеченных данных автоматически детектировать на спутниковых снимках и снимках с дронов:
 - Изменения лесного покрова: гари, вырубки (легальные и нелегальные), ветровалы.
 - Таксационные параметры: породный состав, высоту древостоя, класс бонитета. Лидарные технологии, устанавливаемые на БПЛА, предоставляют высокоточные трехмерные данные о структуре леса, существенно повышая точность таксации [2].
 - Признаки болезней: изменение цвета крон на мультиспектральных снимках.
2. Предиктивная аналитика: На основе исторических данных о пожарах, текущих показаний датчиков (влажность, температура) и метеопрогнозов строятся вероятностные модели для прогнозирования пожарной опасности на несколько дней вперед с высокой точностью. Аналогичные модели могут прогнозировать вспышки численности вредителей.
3. ГИС-интеграция: Все данные и результаты анализа наносятся на электронные карты, создавая единую операционную картину для принятия решений.

Концепция «цифрового двойника» леса, как виртуальной динамической модели, является логическим развитием этого подхода [4].

2. Практическая реализация: от теории к кейсам

2.1. Борьба с лесными пожарами: от тушения к предупреждению

Традиционный подход: обнаружение пожара по факту возгорания (с вышек, от населения), запоздалая реакция.

Цифровой подход:

1. Раннее предупреждение: Сеть датчиков фиксирует падение влажности и рост температуры. Предиктивная модель на основе этих данных и прогноза погоды присваивает территории высокий класс пожарной опасности.

2. Мгновенное обнаружение: Спутниковая группировка с суточной периодичностью съемки или камеры на вышках с компьютерным зрением могут обнаружить задымление на самой ранней стадии [1].

3. Оптимизация реагирования: На цифровую карту в режиме реального времени наносится очаг возгорания, прогнозируется его распространение с учетом ветра и рельефа. Диспетчер видит оптимальные маршруты подъезда и расположение ближайших сил и средств.

Результат: Сокращение времени реагирования, снижение площади повреждений, экономия ресурсов.

2.2. Противодействие незаконным рубкам: тотальный контроль

Традиционный подход: Обследование лесосек по плану, выявление нарушений постфактум.

Цифровой подход:

1. Постоянный мониторинг: Алгоритм ежедневно анализирует спутниковые снимки всей территории лесничества, автоматически детектируя все изменения лесного покрова. Система генерирует «тревоги» для инспекторов только на подозрительные изменения.

2. Подтверждение и реакция: На место возможного нарушения направляется дрон для получения фото- и видеофиксации высокого разрешения. Данные с акустических датчиков (звук пилы) подтверждают нарушение.

3. Контроль логистики: Маршруты движения зарегистрированных лесовозов отслеживаются онлайн. Выезд с неразрешенного участка или отклонение от маршрута блокирует запуск двигателя или автоматически сообщает в надзорные органы.

Результат: Резкое снижение экономической привлекательности незаконной деятельности за счет высоких рисков быть пойманным.

2.3. Устойчивое лесовосстановление и управление

1. Мониторинг санитарного состояния: Мультиспектральная съемка с дронов позволяет вычислять индексы растительности (например, NDVI), которые показывают жизнеспособность насаждения на этапе лесовосстановления, выявлять участки усыхания [3].

2. Инвентаризация и таксация: Лидарное сканирование с БПЛА позволяет строить высокоточные 3D-модели древостоев для оценки запаса древесины, высоты и плотности деревьев без трудоемких наземных замеров [2].

3. Планирование мероприятий: На основе точных данных о состоянии леса планируются рубки ухода, санитарные мероприятия, мероприятия по охране леса с максимальной эффективностью. Это напрямую способствует достижению целей устойчивого управления, провозглашенных FAO [5].

3. Вызовы внедрения и барьеры

Несмотря на потенциал, массовое внедрение «Цифрового леса» сталкивается с серьезными препятствиями:

1. Технические барьеры: Энергообеспечение сенсоров в условиях отсутствия солнечного света (зима, густой полог), устойчивая связь в глубокой тайге, необходимость защиты оборудования от вандализма и суровых погодных условий.

2. Финансовые барьеры: Высокие капитальные затраты на развертывание инфраструктуры (спутники, сети связи, датчики, ЦОДы). Однако ТСО (совокупная стоимость владения) может быть ниже потерь от неэффективного управления.

3. Кадровые барьеры: Острейший дефицит специалистов на стыке IT и лесохозяйственных дисциплин: дата-сайентистов, GIS-аналитиков, IoT-инженеров, понимающих специфику отрасли.

4. Организационные и нормативные барьеры: Консерватизм отрасли, неготовность менять устоявшиеся процессы, отсутствие утвержденных цифровых протоколов и стандартов обмена данными между ведомствами (Минприроды, Рослесхоз, региональные управления). Доклады международных организаций подчеркивают важность адаптации политик и институтов для поддержки таких инноваций [5].

4. Заключение и рекомендации

Цифровая трансформация лесного сектора — это не мода, а объективная необходимость для обеспечения его национальной безопасности, экономической эффективности и экологической устойчивости. Технологии микроэлектроники, IoT и больших данных позволяют совершить качественный скачок от реактивного, «слепого» управления к проактивному, основанному на данных и предиктивных моделях.

Для реализации этой трансформации в России необходим скоординированный усиленный контроль со стороны государства, бизнеса и научного сообщества. Можно предложить следующую дорожную карту:

1. Пилотные проекты: Запуск комплексных пилотов в наиболее проблемных регионах (например, в Сибири или на Дальнем Востоке) для отработки технологий, оценки эффективности и демонстрации результата.

2. ГЧП и инвестиции: Стимулирование государственно-частного партнерства для инвестиций в инфраструктуру (развертывание спутниковых группировок, сетей LoRaWAN в приграничных районах). Создание специальных фондов цифровизации лесного хозяйства.

3. Стандартизация и данные: Разработка и утверждение национальных стандартов сбора, хранения и обмена лесными данными. Принцип Open Data для неконфиденциальной информации для стимулирования развития частных аналитических сервисов.

4. Образование и переподготовка: Интеграция курсов по Data Science, GIS и IoT в программы лесных вузов. Создание программ повышения квалификации для действующих сотрудников лесхозов.

Только комплексный подход позволит России не только сохранить, но и рационально использовать свои лесные богатства в XXI веке, превратив вызовы цифровой эпохи в новые возможности для развития.

Список литературы

1. Wulder, M. A., Coops, N. C., Roy, D. P., White, J. C., & Hermosilla, T. (2018). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127-147.

2. White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., & Tompalski, P. (2016). The role of lidar in sustainable forest management. *The Forestry Chronicle*, 92 (1), 46-58.

3. Анучин, Н. П., Бобринский, А. В., Грязькин, А. В. (2021). Применение беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве. *Лесохозяйственная информация*, (2), 66-81.

4. Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., Hermosilla, T., Tompalski, P., & McCartney, G. (2018). The role of IoT and digital twins in forest monitoring. *Sensors*, 18(11), 3606.
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. FAO.

References

1. Wulder, M. A., Coops, N. C., Roy, D. P., White, J. C., & Hermosilla, T. (2018). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127-147.
2. White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., & Tompalski, P. (2016). The role of lidar in sustainable forest management. *The Forestry Chronicle*, 92 (1), 46-58.
3. Anuchin, N. P., Bobrinsky, A. V., and Gryazkin, A. V. (2021). Application of Unmanned Aerial Vehicles in Forestry. *Forestry Information*, (2), 66-81.
4. Goodbody, T. R. H., Coops, N. C., Hermosilla, T., Tompalski, P., & McCartney, G. (2018). The role of IoT and digital twins in forest monitoring. *Sensors*, 18(11), 3606.
5. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2022). The State of the World's Forests 2022. Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. FAO.