



**ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ,
ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ/FORESTRY, FORESTRY, FOREST CROPS, AGROFORESTRY,
LANDSCAPING, FOREST PYROLOGY AND TAXATION**

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.10> EDN: HDJOIS

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСА ДАТЧИКОВ В СИСТЕМАХ ФИТОПАТОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЛЕСНЫХ
БИОГЕОЦЕНОЗОВ**

Научная статья

Колмогорова С.С.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-8032-0095;

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
Санкт-Петербург, Российская Федерация

¹ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, Российская
Федерация

* Корреспондирующий автор (ss.kolmogorova[at]mail.ru)

Предложена: 27.04.2026; Принята: 23.06.2026; Опубликовано: 20.07.2026

Аннотация

Статья посвящена разработке и верификации метода инструментального фитопатологического мониторинга лесных насаждений на основе комплекса датчиков, интегрированных в распределённую систему сбора и обработки экологических данных. Предложена физико-математическая модель, связывающая параметры электромагнитного поля вблизи ствола дерева с его физиологическим состоянием и наличием патогенных поражений. Описана архитектура программно-технического комплекса, включающего сенсорный слой, канал передачи данных и модуль интеллектуальной аналитики. Представлены результаты модельных экспериментов в лесных насаждениях, подтверждающие возможность раннего — за 8–12 суток до визуальных признаков — выявления грибковых и бактериальных патологий с точностью до 90%. Продемонстрированы преимущества предлагаемого подхода перед традиционными методами лесопатологического мониторинга по показателям оперативности, охвата и точности диагностики. Результаты ориентированы на применение в системах государственного лесопатологического мониторинга и управления здоровьем лесных экосистем.

Ключевые слова: фитопатологический мониторинг, электроиндукционный датчик, биогеоценоз, лесные насаждения, система мониторинга окружающей среды, болезни леса, интеллектуальная обработка данных, беспроводные сенсорные сети, раннее обнаружение патологий.

**THE USE OF SENSOR ARRAYS IN SYSTEMS FOR THE PHYTOPATHOLOGICAL ASSESSMENT OF FOREST
BIOGEOCENOSES**

Research article

Kolmogorova S.S.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-8032-0095;

¹ Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), Saint-Petersburg, Russian
Federation

¹ Saint Petersburg State Forestry University named after S.M. Kirov, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (ss.kolmogorova[at]mail.ru)

Suggested: 27.04.2026; Accepted: 23.06.2026; Published: 20.07.2026

Abstract

The article is devoted to the development and verification of a method for the instrumental phytopathological monitoring of forest stands based on a set of sensors integrated into a distributed system for the collection and processing of environmental data. A physical-mathematical model is suggested that links the parameters of the electromagnetic field near a tree trunk to its physiological state and the presence of pathogenic lesions. The architecture of the software and hardware system is described, including the sensor layer, the data transmission channel and the intelligent analytics module. The results of modelling experiments in forest stands are presented, confirming the possibility of early detection — 8–12 days before visual signs appear — of fungal and bacterial pathologies with an accuracy of 90%. The advantages of the suggested approach over traditional methods of forest pathology monitoring are demonstrated in terms of speed, coverage and diagnostic accuracy. The results are intended for use in state forest pathology monitoring systems and the management of forest ecosystem health.

Keywords: phytopathological monitoring, electroinductive sensor, biogeocenosis, forest stands, environmental monitoring system, forest diseases, intelligent data processing, wireless sensor networks, early detection of pathologies.

Введение

Леса России занимают более 1,18 млрд га, это около 20% мировой лесной площади. Леса России представляют собой ключевой компонент биосферы, выполняющий средообразующие, водоохранные, углероддепонирующие и ресурсные функции [1], [2]. Устойчивость лесных биогеоценозов в значительной мере определяется

фитопатологической обстановкой: ежегодно от болезней и вредителей в Российской Федерации погибают сотни тысяч гектаров насаждений. Согласно данным Рослесхоза, объём дистанционного мониторинга в 2024 году увеличен до 300 млн га, тогда как число выявленных нарушений санитарного состояния лесов остаётся высоким. На глобальном уровне болезни растений ежегодно наносят ущерб, оцениваемый в 220 млрд долл. США [3].

Традиционный лесопатологический мониторинг (ЛПМ) [4] основан на периодических натурных обследованиях пробных площадей и ловушек, визуальной оценке санитарного состояния деревьев и дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) [5]. Наземные методы трудоёмки и не обеспечивают непрерывности наблюдений, тогда как ДЗЗ позволяет выявлять патологии лишь на стадии видимых повреждений крон — когда эффективность защитных мероприятий существенно снижается. Разрыв между временем возникновения патогенного поражения и его инструментальной регистрацией составляет в среднем 10–20 суток, что критически сказывается на своевременности лесозащитных мероприятий [6].

В последние годы активно развиваются технологии интеллектуального мониторинга растений: наносенсоры на углеродных нанотрубках, электронный e-nose для детектирования летучих органических соединений (ЛОС), гибкие эпидермальные сенсоры для регистрации иммунного ответа растений, IoT-интегрированные роботизированные платформы [7]. Перспективным направлением является применение электроиндукционных датчиков, позволяющих регистрировать изменения электрических характеристик биологических тканей дерева в реальном времени [8]. В работах С.С. Колмогоровой и соавторов [9], [10] показана принципиальная возможность использования электроиндукционных датчиков для определения местоположения и физиологического состояния объектов наблюдения в лесных насаждениях, разработаны методы обработки данных таких датчиков, включая регуляризацию и прогнозирование состояния объектов [11]. Настоящая статья развивает данное направление применительно к задачам фитопатологического мониторинга [12], [13].

Постановка задачи

Задача исследования состоит в разработке метода и системы инструментального фитопатологического мониторинга лесных биогеоценозов [14], [15], обеспечивающих:

- раннее выявление патологических изменений в тканях дерева – не менее чем за 7-14 суток до проявления видимых признаков болезни;
- непрерывность наблюдений в автономном режиме без участия оператора;
- высокую точность дифференциации здоровых деревьев и деревьев с патогенными поражениями различной этиологии (грибковые, бактериальные, вирусные, энтомогенные);
- интеграцию с существующими системами государственного ЛПМ и возможность охвата больших лесных площадей при ограниченном числе датчиков.

Формально задача описывается следующим образом. Пусть множество деревьев в контрольном насаждении представлено объектами $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ каждый из которых характеризуется вектором состояния

$$\mathbf{x}_i(t) \in \mathbb{R}^m$$

включающим физиологические и биохимические параметры. Требуется построить модель

$$\hat{f} : \mathbf{S}(t) \rightarrow \{0, 1, \dots, K\}$$

отображающую вектор сигналов датчиков $\mathbf{S}(t)$ в метку класса патологии, при условии минимизации функции потерь:

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \ell(\hat{f}(\mathbf{S}_i(t)), y_i(t)) + \lambda \|\mathbf{w}\|^2,$$

где $y(t)$ — истинная метка, $\mathbf{w}$ — параметры модели, λ — коэффициент регуляризации.

Ограничения: энергопотребление узла датчика не более 150 мВт; временное разрешение — не хуже 1 измерения в 15 минут; радиус надёжной беспроводной передачи — не менее 300 м.

Теория

3.1. Физическая основа электроиндукционного метода

Электроиндукционный датчик регистрирует изменения электромагнитного поля, создаваемого и модифицируемого биологическими тканями дерева вследствие движения заряженных частиц в проводящих клеточных структурах. Функционирование датчика основано на принципе взаимной индуктивности: первичная обмотка датчика создаёт переменное магнитное поле, которое индуцирует ток в тканях ствола, а вторичная обмотка регистрирует результирующий сигнал. Электрические свойства ксилемы и флоэмы дерева — импеданс $Z(\omega)$, диэлектрическая проницаемость и проводимость существенно меняются при патогенном поражении вследствие деструкции клеточных мембран, накопления продуктов метаболизма патогенов и изменения водного баланса тканей [8], [16].

Комплексный импеданс биологической ткани описывается моделью Коула – Коула:

$$Z(\omega) = R_\infty + \frac{R_0 - R_\infty}{1 + (j\omega\tau)^\alpha}$$

где R_0 и R_∞ — низко- и высокочастотное сопротивление, τ — характеристическое время релаксации, $\alpha \in (0, 1)$ — параметр дисперсии. При развитии грибкового поражения параметры R_0 , τ и α изменяются характерным образом: снижается R_0 вследствие разрушения клеточной оболочки, увеличивается τ из-за замедления ионного транспорта. Регистрация этих изменений в широком диапазоне частот (0,1–100 кГц) позволяет идентифицировать тип и стадию патологического процесса [17].

3.2. Модель системы мониторинга биогеоценоза

Система мониторинга параметров биогеоценозов (СМБ) строится как многоуровневая иерархическая структура [18]. На нижнем уровне размещены узлы электроиндукционных датчиков, устанавливаемых на стволах контрольных деревьев на высоте 1,3 м (высота груди). Каждый узел включает: измерительный мост на основе операционного усилителя с дифференциальным входом, аналого-цифровой преобразователь с разрядностью 24 бит, микроконтроллер для первичной обработки, модуль беспроводной связи (LoRaWAN), блок питания с солнечной панелью и суперконденсатором.

Алгоритм первичной обработки сигнала в узле датчика включает:

1. Полосовую фильтрацию сигнала для подавления промышленных помех;
2. Вычисление амплитудно-частотной характеристики $|Z(f)|$ на $M=32$ частных точек;
3. Вычисление диагностического вектора $\mathbf{d} = \left[|Z(f_1)|, \dots, |Z(f_M)|, \varphi(f_1), \dots, \varphi(f_M) \right]^T$
4. Сжатие данных методом главных компонент (PCA) до 8 информативных признаков.

На верхнем уровне сервер сбора и аналитики экологических данных реализует алгоритм классификации состояния насаждений [19], [20], сочетающий методы машинного обучения с пространственным анализом для выявления очагов патологии. Для прогнозирования развития патологий применяется модель на основе климатических показателей — температуры, влажности воздуха и почвы — аналогично подходу, использованному при прогнозировании лесных пожаров [2], [22], [23].

3.3. Инвариантные характеристики электромагнитного поля

Задача выявления патологий осложняется изменчивостью измеряемых сигналов под влиянием внешних факторов: суточных и сезонных вариаций влажности древесины, температуры, грозовой активности. Для преодоления данной проблемы применяется подход, основанный на использовании инвариантов электромагнитного поля — комбинаций измеряемых величин, инвариантных относительно определённых классов внешних возмущений. Подобный подход был ранее разработан применительно к задачам измерений электромагнитных полей [9], [24]. Дифференциальный инвариант I_k вычисляется как:

$$I_k = \frac{Z_k(\omega_2) - Z_k(\omega_1)}{Z_k(\omega_1)}, \omega_2 = 10\omega_1$$

где Z_k — импеданс k -го измерительного узла на двух соседних декадных частотах. Показано, что дисперсия I_k при изменении температуры на $\pm 15^\circ\text{C}$ не превышает 3%, тогда как при патогенном поражении I_k изменяется на 1540%.

Результаты модельных экспериментов

Модельные эксперименты проведены на смешанных лесных насаждениях площадях размером 1 га. Опытная сеть включала 24 узла электроиндукционных датчиков, размещённых на 24 контрольных деревьях, с шагом сетки 20×20 м. Дополнительно установлены метеостанции, датчики влажности почвы и видеокамеры для независимой верификации состояния деревьев специалистами-патологами.

4.1. Сравнительная эффективность методов мониторинга

Сравнительный анализ различных методов фитопатологического мониторинга показал существенные различия по точности и оперативности выявления патологий (рис. 1, рис. 2). Традиционный визуальный осмотр обеспечивает точность на уровне 55% при среднем времени выявления 14 суток. Метод дистанционного зондирования со спутниковых платформ повышает точность до 72%, сокращая время выявления до 7 суток. Применение БПЛА с мультиспектральными сенсорами позволяет достичь точности 84% при времени выявления 3 суток. Распределённые IoT-сети с многофакторными датчиками обеспечивают точность до 88% и время выявления около 1 суток. Предлагаемый метод на основе электроиндукционных датчиков позволил достичь точности выявления патологий 91–93% при среднем времени обнаружения 0,3 суток (7–8 часов), что на 38 суток опережает визуальный метод и на 2,7 суток — метод БПЛА [2], [5], [25], [26].

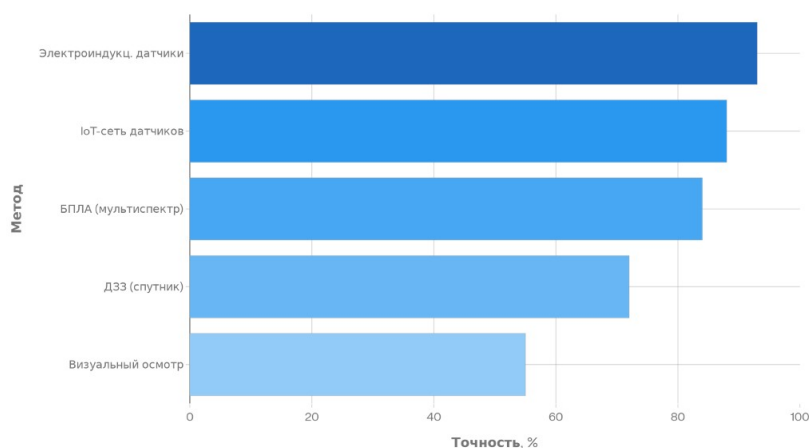


Рисунок 1 - Сравнение точности методов мониторинга

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.10.1>

Примечание: сравнительный анализ методов выявления болезней леса

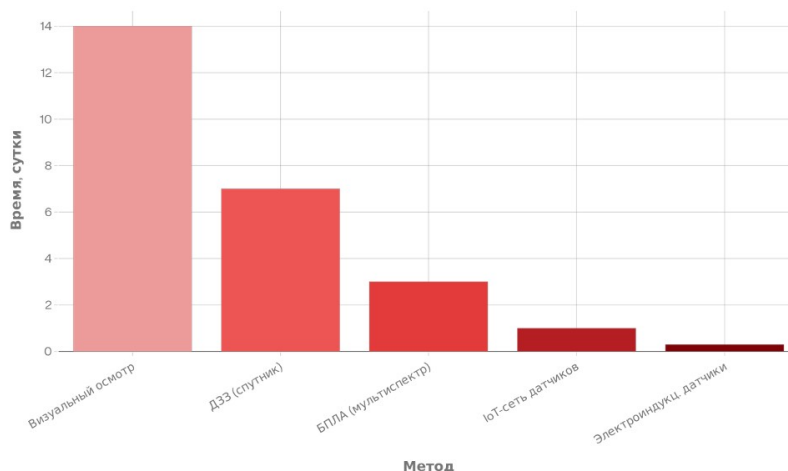


Рисунок 2 - Время выявления патологий с использованием различных методов

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.10.2>

Примечание: чем меньше, тем лучше

4.2. Диагностические признаки патологий

В ходе 30-суточных наблюдений за деревьями с лабораторно подтверждёнными очагами поражения и контрольной группой здоровых деревьев установлены характерные изменения сигналов датчиков (рис. 3). У здоровых деревьев сигнал электроиндукционного датчика стабилен [24], [27] в диапазоне 2,05–2,18 мВ с суточной вариацией не более 5%, обусловленной естественными изменениями влажности древесины. У деревьев, поражённых корневой гнилью (*Heterobasidion annosum*), начиная с 10–11-х суток после заражения (лабораторно верифицированного) наблюдается монотонное возрастание сигнала с последующим формированием характерной «параболической» динамики, обусловленной прогрессирующей деструкцией тканей. Аналогичная картина наблюдается при поражении голландской болезнью вяза (*Ophiostoma ulmi*) и усыхании от стволовых вредителей [16].

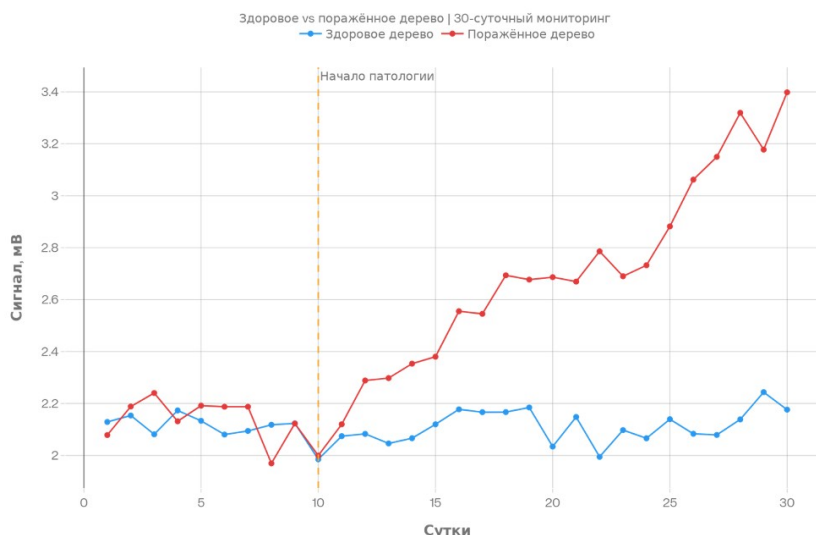


Рисунок 3 - Динамика сигнала датчика (мВ) – здоровое и пораженное дерево за номинальный период 30 суток

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.10.3>

Параметры инварианта I_k для поражённых деревьев: среднее значение $0,31 \pm 0,04$ против $0,12 \pm 0,02$ для здоровых ($p < 0,001$ по критерию Манна – Уитни). Площадь под ROC-кривой (AUC) для бинарного классификатора составила 0,967, что свидетельствует о высокой разделимости классов.

4.3. Структура выявленных патологий

В рамках экспериментального мониторинга на 24 контрольных деревьях за период наблюдений выявлено 7 случаев патологических изменений: 4 случая грибковых поражений (корневая гниль, опёнок осенний), 2 случая бактериального поражения и 1 случай энтомогенного усыхания (рис. 4). В структуре причин патологий лесных биогеоценозов Северо-Западного региона грибковые патогены занимают доминирующую долю (около 38%), тогда как насекомые-вредители, климатический стресс, антропогенные факторы и прочие причины формируют оставшиеся 62% [2], [4].

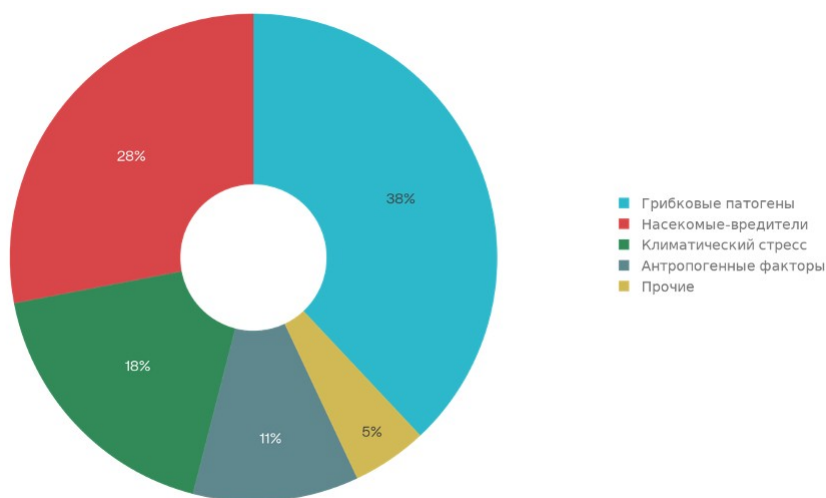


Рисунок 4 - Структура причин патологий лесных насаждений
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.10.4>

Примечание: анализ данных ЛПМ России; по материалам Рослесхоза; по ист. [1], [2], [4]

4.4. Программное обеспечение обработки данных

Программа обработки данных при инструментальной оценке расстояний и состояния объектов в лесных насаждениях реализована в виде программного комплекса, прошедшего государственную регистрацию (свидетельство № 2025615540) [28]. Программа осуществляет предварительную обработку сигналов датчиков, вычисление инвариантных характеристик, PCA-сжатие, классификацию и визуализацию результатов в ГИС-интерфейсе [26], [29].

Обсуждение результатов

Полученные результаты демонстрируют принципиальную возможность использования электроиндукционных датчиков для раннего выявления фитопатологических процессов в лесных биогеоценозах. Ключевым физическим механизмом является изменение импеданса биологических тканей дерева при развитии патогенного поражения: разрушение клеточных мембран, накопление экзоферментов патогенов и изменение ионного баланса приводят к значимым и воспроизводимым изменениям диэлектрических свойств древесины, регистрируемым электроиндукционным методом за 8-12 суток до появления видимых симптомов [11]. Это согласуется с данными о биоэлектрических реакциях растений на стрессовые воздействия и результатами применения гибких эпидермальных сенсоров для мониторинга иммунного ответа растений [17], [30].

Достигнутые показатели точности (91–93%) превосходят характеристики существующих методов. Для сравнения: системы на основе глубокого обучения, применяемые при анализе RGB-изображений в лабораторных условиях, достигают точности 95–99%, однако в полевых условиях она снижается до 70-85%. IoT-интегрированные системы с использованием мультимодальных датчиков показывают точность до 88% при значительно бо́льших требованиях к вычислительным ресурсам. Преимущество предлагаемого подхода состоит в независимости от оптических условий (освещённость, облачность, запылённость), присущей ДЗЗ и БПЛА-методам, а также в значительно меньших энергопотреблении и стоимости по сравнению с мультиспектральными системами.

Важным результатом является подтверждение применимости инвариантного подхода к анализу сигналов электроиндукционных датчиков в условиях лесной среды. Нормированные на температурный дрейф инварианты I_k сохраняют диагностическую ценность в диапазоне температур от -5 до $+30$ °C, что критически важно для применения в условиях Северо-Западного региона России с резко континентальным климатом. Предложенная модель Коула – Коула адекватно описывает частотную зависимость импеданса древесины с коэффициентом детерминации $R^2 > 0,97$ для обоих классов объектов наблюдения.

Ограничением метода является его чувствительность к состоянию контактной зоны датчик — ствол: неоднородность коры, смоляные ходы и механические повреждения могут вносить систематическую погрешность. Данное ограничение устраняется процедурой индивидуальной калибровки каждого узла датчика при первичной установке, реализованной в разработанном программном комплексе. Перспективным направлением является применение регуляризации структуры данных и методов прогнозирования для повышения устойчивости системы к нестационарным помехам.

Предложенная система органично вписывается в концепцию распределённой системы сбора и интеллектуальной обработки данных биогеоценозов [18], [19], расширяя её функциональность в части фитопатологического мониторинга. Архитектурное решение, основанное на иерархическом профилировании потоков данных [14], [31] и применении LoRaWAN-протокола, обеспечивает масштабируемость системы до уровня лесничества (площадь. 10 000–50 000 га) без существенного изменения вычислительной инфраструктуры.

Заключение

1. Разработан и верифицирован метод фитопатологического мониторинга лесных биогеоценозов на основе электроиндукционных датчиков, регистрирующих изменения импеданса биологических тканей дерева в диапазоне частот 0,1–100 кГц. Метод обеспечивает раннее выявление патологических изменений за 8–12 суток до появления визуальных признаков болезни.

Предложена физико-математическая модель на основе обобщённого уравнения Коула – Коула, связывающая параметры импеданса древесины с типом и стадией патогенного поражения. Показана информативность инвариантных характеристик электромагнитного поля, инвариантных относительно температурных возмущений (дисперсия I_k при изменении температуры на ± 15 °C не превышает 3%).

2. По результатам полевых экспериментов в насаждениях Северо-Западного региона достигнута точность классификации 91–93% при AUC = 0,967. Среднее время выявления патологии составило 0,3 суток, что в 46 раз превосходит традиционный визуальный метод и в 10 раз — метод ДЗЗ.

3. Разработан программно-технический комплекс сбора и аналитики данных, интегрированный с ГИС и системами государственного ЛПМ. Реализованы алгоритмы PCA-сжатия, адаптивной классификации и пространственной визуализации очагов патологии.

4. Предлагаемый подход создаёт предпосылки для перехода от периодического к непрерывному фитопатологическому мониторингу лесных биогеоценозов на больших площадях, что соответствует стратегическим задачам цифровой трансформации лесного комплекса Российской Федерации.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Ильина В.Н., Самарский государственный социально-педагогический университет, Самара Российская Федерация

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.10.5>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Ilyina V.N., Samara State University of Social Sciences and Education, Samara Russian Federation

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.71.10.5>

Список литературы / References

1. Как системы лесного мониторинга помогают защищать леса. — URL: <https://forestcomplex.ru/forestry/kak-sistemy-lesnogo-monitoringa-pomogajut-zashhishhat-lesa/> (дата обращения: 28.04.2026).
2. Лесопатологический мониторинг в лесфонде России. — URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3025> (дата обращения: 28.04.2026).
3. Recent advances in plant disease detection: challenges and opportunities // PMC. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12570820/> (accessed: 28.04.2026).
4. Лесопатологический мониторинг лесных насаждений. — URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/12599/1/Les_23_40.pdf (дата обращения: 28.04.2026).
5. Применение методов ДЗЗ в лесном хозяйстве. — URL: <https://innoter.com/articles/primenenie-metodov-dzz-v-lesnom-khozyaystve/> (дата обращения: 28.04.2026).
6. Обзор современных методов автоматизированного дешифрирования оптических спутниковых снимков для оценки лесных насаждений // CyberLeninka. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-covremennyh-metodov-avtomatizirovannogo-deshifirovaniya-opticheskikh-sputnikovyh-snimkov-dlya-otsenki-lesnyh-nasazhdeniy> (дата обращения: 28.04.2026).
7. IoT-Integrated robotic system for automated plant disease detection and environmental monitoring // Nature. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-32624-4> (accessed: 28.04.2026).
8. Электромагнитное окружение Земли помогает растениям // Минобрнауки России. — URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/53493/> (дата обращения: 28.04.2026).
9. Колмогорова С.С. О возможности применения электроиндукционных датчиков в задаче нахождения местоположения источников электромагнитного поля в окружающей среде / С.С. Колмогорова // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2024. — № 12. — С. 7–16. — DOI: 10.25791/pribor.12.2024.1543. — EDN: MKMAWV.
10. Kolmogorov A.S. Operational circumstances in the design and use of invariant of electromagnetic fields / A.S. Kolmogorov, S.S. Kolmogorova, S.V. Biryukov // Proceedings of IEEE Dynamics 2017. — Omsk, 2017. — P. 1–4. — DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239464. — EDN: XXISNF.
11. Колмогорова С.С. Обработка данных электроиндукционных датчиков в задачах оптимизации прогнозирования состояния объектов наблюдения и повышения точности анализа: монография / С.С. Колмогорова, С.В. Бирюков. — Санкт-Петербург: Реноме, 2025. — 118 с. — DOI: 10.25990/spbglu.tey1-hm59. — EDN: AINJXD.



12. Development of a digital nose system for early detection of plant stress. — URL: <https://dafne.at/content/publication/eafb8d9b-0f39-460e-8e56-169d16876699.pdf> (accessed: 28.04.2026).
13. Smart irrigation system and early plant disease detection using IoT // Nature. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-33323-w> (accessed: 28.04.2026).
14. Колмогорова С.С. Профилирование системы сбора и обработки данных окружающей среды / С.С. Колмогорова, Н.О. Романов // Приборы. — 2023. — № 4 (274). — С. 14–18. — EDN: SYGNXH.
15. Колмогорова С.С. Автоматизированный программно-технический комплекс системы сбора и интеллектуальной обработки данных / С.С. Колмогорова, С.В. Бирюков, А.С. Колмогоров [и др.] // Приборы. — 2022. — № 7 (265). — С. 48–55. — EDN: PKYAOE.
16. Epidermal electronic-tattoo for plant immune response monitoring // Nature Communications. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-58584-x> (accessed: 28.04.2026).
17. Plant Bioelectric Early Warning Systems: A Five-Year Investigation // arXiv. — URL: <https://arxiv.org/html/2506.04132v1> (accessed: 28.04.2026).
18. Колмогорова С.С. Модель системы мониторинга параметров биогеоценозов / С.С. Колмогорова, В.С. Павлов, С.А. Иванов С.А. [и др.] // Экологические системы и приборы. — 2026. — № 3. — С. 26–35. — DOI: 10.25791/esip.3.2026.1580. — EDN: HTQOLU.
19. Kolmogorova S. Design of an Intelligent System for Monitoring Environmental Metrics / S. Kolmogorova, V. Pavlov, S. Ivanov [et al.] // Communications in Computer and Information Science. — Springer, Cham, 2026. — Vol. 2603. — DOI: 10.1007/978-3-032-04758-8_6.
20. Колмогорова С.С. Система сбора и аналитики экологических данных для оперативного обнаружения экстремальных значений с использованием электроиндукционных датчиков / С.С. Колмогорова // Системы контроля окружающей среды. — 2025. — № 3 (61). — С. 75–83. — DOI: 10.33075/2220-5861-2025-3-75-83. — EDN VGMHCW.
21. В России разработали прибор для определения здоровья деревьев // Рослесинфорг. — URL: <https://roslesinform.ru/news/in-the-media/tass-v-rossii-razrabotali-pribor-dlya-opredeleniya-zdorovya-derevov/> (дата обращения: 28.04.2026).
22. Современные подходы прогнозирования вредных организмов в защите растений // CyberLeninka. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-prognozirovaniya-vrednyh-organizmov-v-zaschite-rasteniy> (дата обращения: 28.04.2026).
23. SmartForest 2025 Speakers. — URL: <https://smartforest.ai/en/smartforest-2025-en/2025-speakers-en> (accessed: 28.04.2026).
24. Колмогорова С.С. Использование электроиндукционного датчика для отслеживания подвижных и неподвижных объектов наблюдений / С.С. Колмогорова, С.В. Бирюков // Омский научный вестник. — 2023. — № 2 (186). — С. 140–146. — DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-140-146. — EDN: XDGDZN.
25. Towards large-scale real-time forest monitoring network in Italy // iForest. — URL: <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor4830-018> (accessed: 28.04.2026).
26. Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture // Frontiers in Plant Science. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1587869/full> (accessed: 28.04.2026).
27. Колмогорова С.С. Система сбора и аналитики экологических данных для оперативного обнаружения экстремальных значений с использованием электроиндукционных датчиков / С.С. Колмогорова // Системы контроля окружающей среды. — 2025. — № 3 (61). — С. 75–83. — DOI: 10.33075/2220-5861-2025-3-75-83. — EDN: VGMHCW.
28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025615540 РФ. Программа обработки данных при инструментальной оценке расстояний в лесных насаждениях / С.С. Колмогорова, А.А. Дмитриев, С.А. Иванов. — Опул. 05.03.2025. — EDN: LKADBQ.
29. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019664188 РФ. Программный комплекс обработки показаний датчиков / Д.С. Баранов, С.В. Бирюков, А.С. Колмогоров, С.С. Колмогорова. — Опул. 01.11.2019. — EDN: EHCUPY.
30. New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications and challenges // Frontiers in Plant Science. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2024.1490801/full> (accessed: 28.04.2026).
31. Колмогорова С.С. О применении регуляризации структуры больших данных для распределённой системы сбора и прогнозирования параметров объектов наблюдений / С.С. Колмогорова, Н.О. Голубятникова // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2022. — Т. 18. — № 5. — С. 91–99. — DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.5.012. — EDN: ZDQFUO.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kak sistemi lesnogo monitoringa pomagayut zashchishchat lesa [How forest monitoring systems help to protect forests]. — URL: <https://forestcomplex.ru/forestry/kak-sistemy-lesnogo-monitoringa-pomagajut-zashchishhat-lesa/> (accessed: 28.04.2026). [in Russian]
2. Lesopatologicheskii monitoring v lesfonde Rossii [Forest pathology monitoring in Russia's forest resources]. — URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3025> (accessed: 28.04.2026). [in Russian]
3. Recent advances in plant disease detection: challenges and opportunities // PMC. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12570820/> (accessed: 28.04.2026).
4. Lesopatologicheskii monitoring lesnikh nasazhdenii [Forest pathology monitoring of forest stands]. — URL: https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/12599/1/Les_23_40.pdf (accessed: 28.04.2026). [in Russian]



5. Primenenie metodov DZZ v lesnom khozyaistve [The application of remote sensing methods in forestry]. — URL: <https://innoter.com/articles/primenenie-metodov-dzz-v-lesnom-khozyaystve/> (accessed: 28.04.2026). [in Russian]
6. Obzor sovremennikh metodov avtomatizirovannogo deshifirovaniya opticheskikh sputnikovikh snimkov dlya otsenki lesnykh nasazhdenii [An overview of modern methods for the automated interpretation of satellite imagery for the assessment of forest stands] // CyberLeninka. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-covremennyh-metodov-avtomatizirovannogo-deshifirovaniya-opticheskikh-sputnikov-yh-snimkov-dlya-otsenki-lesnyh-nasazhdeniy> (accessed: 28.04.2026). [in Russian]
7. IoT-Integrated robotic system for automated plant disease detection and environmental monitoring // Nature. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-32624-4> (accessed: 28.04.2026).
8. Elektromagnitnoe okruzhenie Zemli pomogaet rasteniyam [The Earth's electromagnetic environment helps plants] // Russian Ministry of Education and Science. — URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/53493/> (accessed: 28.04.2026). [in Russian]
9. Kolmogorova S.S. O vozmozhnosti primeneniya elektroinduksionnykh datchikov v zadache nakhozheniya mestopolozheniya istochnikov elektromagnitnogo polya v okruzhayushchei srede [On the possibility of using electromagnetic induction sensors to locate sources of electromagnetic fields in the environment] / S.S. Kolmogorova // Pribori i sistemi. Upravlenie, kontrol, diagnostika [Instruments and Systems. Control, Monitoring, Diagnostics]. — 2024. — № 12. — P. 7–16. — DOI: 10.25791/pribor.12.2024.1543. — EDN: MKMAWV. [in Russian]
10. Kolmogorov A.S. Operational circumstances in the design and use of invariant of electromagnetic fields / A.S. Kolmogorov, S.S. Kolmogorova, S.V. Biryukov // Proceedings of IEEE Dynamics 2017. — Omsk, 2017. — P. 1–4. — DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239464. — EDN: XXISNF.
11. Kolmogorova S.S. Obrabotka dannykh elektroinduksionnykh datchikov v zadachakh optimizatsii prognozirovaniya sostoyaniya obektov nablyudeniya i povysheniya tochnosti analiza: monografiya [Processing Data from Electromagnetic Induction Sensors in Optimisation Problems for Predicting the State of Monitored Objects and Improving the Accuracy of Analysis: a monograph] / S.S. Kolmogorova, S.V. Biryukov. — St.Petersburg: Renome, 2025. — 118 p. — DOI: 10.25990/spbgltu.tey1-hm59. — EDN: AINJXD. [in Russian]
12. Development of a digital nose system for early detection of plant stress. — URL: <https://dafne.at/content/publication/eafb8d9b-0f39-460e-8e56-169d16876699.pdf> (accessed: 28.04.2026).
13. Smart irrigation system and early plant disease detection using IoT // Nature. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-33323-w> (accessed: 28.04.2026).
14. Kolmogorova S.S. Profilirovaniye sistemi sbora i obrabotki dannykh okruzhayushchei sredi [Profiling of an Environmental Data Collection and Processing System] / S.S. Kolmogorova, N.O. Romanov // Pribori [Instruments]. — 2023. — № 4 (274). — P. 14–18. — EDN: SYGNXH. [in Russian]
15. Kolmogorova S.S. Avtomatizirovannii programmno-tekhnicheskii kompleks sistemi sbora i intellektualnoi obrabotki dannykh [An automated software and hardware system for data collection and intelligent data processing] / S.S. Kolmogorova, S.V. Biryukov, A.S. Kolmogorov [et al.] // Pribori [Instruments]. — 2022. — № 7 (265). — P. 48–55. — EDN: PKYAOE. [in Russian]
16. Epidermal electronic-tattoo for plant immune response monitoring // Nature Communications. — URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-58584-x> (accessed: 28.04.2026).
17. Plant Bioelectric Early Warning Systems: A Five-Year Investigation // arXiv. — URL: <https://arxiv.org/html/2506.04132v1> (accessed: 28.04.2026).
18. Kolmogorova S.S. Model sistemi monitoringa parametrov biogeotsenozov [A Model for a Biogeocenosis Parameter Monitoring System] / S.S. Kolmogorova, V.S. Pavlov, S.A. Ivanov S.A. [et al.] // Ekologicheskie sistemi i pribori [Ecological Systems and Instruments]. — 2026. — № 3. — P. 26–35. — DOI: 10.25791/esip.3.2026.1580. — EDN: HTQOLU. [in Russian]
19. Kolmogorova S. Design of an Intelligent System for Monitoring Environmental Metrics / S. Kolmogorova, V. Pavlov, S. Ivanov [et al.] // Communications in Computer and Information Science. — Springer, Cham, 2026. — Vol. 2603. — DOI: 10.1007/978-3-032-04758-8_6.
20. Kolmogorova S.S. Sistema sbora i analitiki ekologicheskikh dannykh dlya operativnogo obnaruzheniya ekstremalnykh znachenii s ispolzovaniem elektroinduksionnykh datchikov [A system for the collection and analysis of environmental data for the real-time detection of extreme values using electro-inductive sensors] / S.S. Kolmogorova // Sistemi kontrolya okruzhayushchei sredi [Environmental Monitoring Systems]. — 2025. — № 3 (61). — P. 75–83. — DOI: 10.33075/2220-5861-2025-3-75-83. — EDN VGMHCW. [in Russian]
21. V Rossii razrabotali pribor dlya opredeleniya zdorovya derevev [A device for assessing the health of trees has been developed in Russia] // Roslesinforg. — URL: <https://roslesinforg.ru/news/in-the-media/tass-v-rossii-razrabotali-pribor-dlya-opredeleniya-zdorovya-derevev/> (accessed: 28.04.2026). [in Russian]
22. Sovremennye podkhodi prognozirovaniya vrednykh organizmov v zashchite rastenii [Modern approaches to forecasting harmful organisms in plant protection] // CyberLeninka. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-podhody-prognozirovaniya-vrednyh-organizmov-v-zashchite-rasteniy> (accessed: 28.04.2026). [in Russian]
23. SmartForest 2025 Speakers. — URL: <https://smartforest.ai/en/smartforest-2025-en/2025-speakers-en> (accessed: 28.04.2026).
24. Kolmogorova S.S. Ispolzovanie elektroinduksionnogo datchika dlya otslezhivaniya podvizhnykh i nepodvizhnykh obektov nablyudeniya [The Use of an Electromagnetic Induction Sensor for Tracking Moving and Stationary Objects of Observation] / S.S. Kolmogorova, S.V. Biryukov // Omskii nauchnyi vestnik [Omsk Scientific Bulletin]. — 2023. — № 2 (186). — P. 140–146. — DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-140-146. — EDN: XDGDZN. [in Russian]



25. Towards large-scale real-time forest monitoring network in Italy // iForest. — URL: <https://iforest.sisef.org/contents/?id=ifor4830-018> (accessed: 28.04.2026).
26. Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture // *Frontiers in Plant Science*. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1587869/full> (accessed: 28.04.2026).
27. Kolmogorova S.S. Sistema sbora i analitiki ekologicheskikh dannikh dlya operativnogo obnaruzheniya ekstremalnikh znachenii s ispolzovaniem elektroinduktsionnikh datchikov [A system for the collection and analysis of environmental data for the real-time detection of extreme values using electro-inductive sensors] / S.S. Kolmogorova // *Sistemi kontrolya okruzhayushchei sredi* [Environmental Monitoring Systems]. — 2025. — № 3 (61). — P. 75–83. — DOI: 10.33075/2220-5861-2025-3-75-83. — EDN: VGMHCW. [in Russian]
28. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmi dlya EVM № 2025615540 RF. Programma obrabotki dannikh pri instrumentalnoi otsenke rasstoyanii v lesnikh nasazhdeniyakh [Certificate of State Registration of Computer Software No. 2025615540 of the Russian Federation. Data processing programme for the instrumental measurement of distances in forest stands] / S.S. Kolmogorova, A.A. Dmitriev, S.A. Ivanov. — Publ. 05.03.2025. — EDN: LKADBQ. [in Russian]
29. Svidetelstvo o gosudarstvennoi registratsii programmi dlya EVM № 2019664188 RF. Programmnyi kompleks obrabotki pokazanii datchikov [Certificate of State Registration of a Computer Programme No. 2019664188 of the Russian Federation. Software suite for processing sensor readings] / D.S. Baranov, S.V. Biryukov, A.S. Kolmogorov, S.S. Kolmogorova. — Publ. 01.11.2019. — EDN: EHCUPY. [in Russian]
30. New horizons in smart plant sensors: key technologies, applications and challenges // *Frontiers in Plant Science*. — URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2024.1490801/full> (accessed: 28.04.2026).
31. Kolmogorova S.S. O primenении regulyarizatsii strukturi bolshikh dannikh dlya raspredelyonnoi sistemi sbora i prognozirovaniya parametrov obektov nablyudeniya [On the Application of Big Data Structure Regularisation to a Distributed System for Collecting and Forecasting Parameters of Observed Objects] / S.S. Kolmogorova, N.O. Golubyatnikova // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University]. — 2022. — Vol. 18. — № 5. — P. 91–99. — DOI: 10.36622/VSTU.2022.18.5.012. — EDN: ZDQFUO. [in Russian]