

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Научно-практический журнал

Выпуск 1 (5) I 2026

ISSN 3033-6813

GEOINFORMATION MODELING

gmlgeo.ru

Научно-практический журнал

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Geoinformation modeling

Выпуск 1 (5), 2026

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т:

М. Р. Вагизов, доктор технических наук, доцент (главный редактор),
К. А. Мартын, ассистент (ответственный редактор)
Е. П. Истомин, доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник науки и высоких технологий РФ
Е. Н. Черемисина, доктор технических наук, профессор
С. П. Присяжнюк, доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки и техники РФ
А. С. Алексеев, доктор географических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ
А. В. Матерухин, доктор технических наук, профессор
В. А. Григорьев, доктор технических наук, профессор, президент Северо-Западного отделения Академии инженерных наук имени А. М. Прохорова
Х. Г. Мусин, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, заслуженный лесовод РФ
А. М. Заяц, кандидат технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы Санкт-Петербурга
В. Г. Бурлов, доктор технических наук, профессор, почётный наставник
Д. А. Ковалёв, кандидат технических наук, доцент
А. С. Дурова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
П. И. Кузин, кандидат технических наук, доцент
С. А. Назаревич кандидат технических наук, доцент

Учредитель:
Автономная некоммерческая организация по развитию
природного потенциала территорий «Уникальные ландшафты»

Адрес редакции: г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Ульянка,
ул. Стойкости, д. 37, литера А. пом.56
E-mail: geogml@bk.ru
Сайт: https://www.gmlgeo.ru

Издатель: «Евразийское Информационное Агентство»
(EIA Global Media Group).

Подписано в печать: 31.05.2026.
Технический редактор: Вагизова А. В.
Редактор: Мартын К. А.

ISSN 3033-6813

© АНО РППТ УНЛАНД, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

Мартын И.А., Жуков П.В., Пугач Н.В. Синтез технологий: цифровые двойники и iot в сельском хозяйстве 4

Дзениш М.С., Черниховский Д.М. Глобальные цифровые модели высот для оценки характеристик лесных насаждений (на примере Лисинской части Учебно-опытного лесничества Ленинградской области) 10

Варфоломеева А.К., Митюшина С.А., Сафонова Т.В., Мокряк А.В. Обзор маломощных гидрометеорологических iot-платформ для питания цифровых двойников 20

Эстер М.В., Фёдоров В. А. Геопространственный мониторинг бореальных лесов в задачах оценки углеродного баланса и пожарных рисков: современное состояние и перспективы 32

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

Седин Л.И. Системный анализ функции качества процессов производственных систем.44

Винниченко А. В., Лепёхин А. А. Интеграция методов бережливого производства для оптимизации хронометража операций в киберфизических системах коллаборативного производства 59

Батмазова А.А., Гайдукова Е.В., Захаров И.Д. Программный комплекс «*hmdistance*»: автоматизация гидрометеорологических исследований.....71

Семенов В.А. Системный анализ и разработка квалиметрических мер для идентификации динамических рисков критических элементов организационной системы.....82

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

Григорьева Ю. В. Территориальный брендинг как инструмент формирования геоэкологической туристской привлекательности малого поселения 88

Белая А.К. Экологическое прогнозирование на основе данных дистанционного зондирования Земли..... 104

УДК 004.6:551.46

[1]Мартын И.А., [1]Жуков П.В., [1]Пугач Н.В.

СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЙ: ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ И IOT В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

[1]Мартын Ирма Андреевна
доцент
кафедра прикладной информатики, ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: irma_martyn@mail.ru

[1]Жуков Павел Викторович
студент 2 курса
кафедра прикладной информатики, ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: zhukov.pavel.03@mail.ru

[1]Пугач Никита Вячеславович
студент 3 курса
кафедра прикладной информатики, ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург

Аннотация. Статья представляет инновационный подход к созданию доступных систем умного полива. Методология объединяет аппаратную часть IoT-устройства с аналитикой, позволяя разрабатывать и тестировать IoT-решения без значительных затрат. Система включает цифровой двойник участка с растениями и с/х культурами, алгоритмы автономного управления поливом и веб-интерфейс для мониторинга. Решение масштабируется от виртуального прототипа к реальному оборудованию, демонстрируя эффективность для задач в области земледелия.

Ключевые слова: цифровые двойники, IoT, сельское хозяйство.

SYNTHESIS OF TECHNOLOGIES: DIGITAL TWINS AND IOT IN AGRICULTURE

Absract. The article presents an innovative approach to creating affordable smart irrigation systems. The methodology combines the hardware of an IoT device with analytics, allowing you to develop and test IoT solutions without significant costs. The system includes a digital twin of a plot with plants and agricultural crops, algorithms for autonomous irrigation management and a web interface for monitoring. The solution scales from a virtual prototype to real-world equipment, demonstrating efficiency for agricultural tasks.

Keywords: digital twins, IoT, agriculture.

Ключевая идея разработки построена на создании интерактивного веб-сервиса, позволяющего проектировать цифровые двойники дачных участков с последующей AI-оптимизацией систем полива на основе агрономических данных и метеопрогнозов.

Основные компоненты системы включают: конструктор участка, базу агрономических знаний и систему оптимизации полива.

Разработка системы проводилась на языке Python с использованием внешних погодных API и базой данных PostgreSQL.

Ядром клиентской части системы является интерактивный графический конструктор, корректная работа которого обеспечивается рядом математических алгоритмов:

- Алгоритм трансформации координат: процедура scaleGeographicToPixels отвечает за проекцию реальных географических координат участка (широты и долготы), полученных от API Яндекс. Карт, в плоскую декартовую систему координат (экранные пиксели) элемента HTML5 Canvas. Это позволяет соблюсти масштаб участка при отрисовке.
- Алгоритмы пространственных преобразований: математика работы с вращением и изменением размеров фигур опирается на преобразования. Реализованы функции rotatePoint (для пересчета вершин прямоугольников при их повороте пользователем) и isPointInRotatedRectangle (для корректной обработки событий клика мыши по повернутому объекту).
- Алгоритм автоматической генерации полива: на текущем этапе реализована базовая логика расстановки точек полива, при которой для каждого размещенного на плане растения алгоритм автоматически создает одну точку подачи воды со смещением вправо. В перспективе алгоритм будет дополнен расчетом радиуса орошения на основе типа выбранного растения.
- Алгоритм управления состояниями: логика сохранения и загрузки проекта основана на глубокой сериализации графа объектов Canvas в формат JSON. Сформированный JSON-пакет передается через REST API в базу данных Supabase для персистентного хранения.
- Проектирование IoT-устройства (концептуальный уровень). Физический уровень системы (IoT-устройство) спроектирован с упором на модульность и низкую себестоимость. Выбор в качестве центрального микроконтроллера платформы ESP32 обусловлен наличием встроенного модуля Wi-Fi, высокой тактовой частотой и достаточным количеством GPIO-выводов для подключения периферии [1].

Аппаратная часть включает следующие функциональные блоки:

- Измерительный блок: аналоговый емкостной датчик влажности почвы, цифровой датчик температуры и влажности окружающего воздуха.
- Исполнительный блок: твердотельный релейный модуль для коммутации нагрузки (электромагнитного клапана подачи воды или водяного насоса).
- Модуль питания (понижающий преобразователь напряжения).

Сетевое взаимодействие контроллера с сервером базируется на упрощенном протоколе обмена. Устройство инициирует сеанс связи, отправляя HTTP GET-запрос на сервер, передавая свой идентификатор и текущее состояние датчиков. В теле HTTP-ответа сервер возвращает бинарную команду на включение или отключение релейного модуля, формируя тем самым замкнутый цикл управления [1,3].

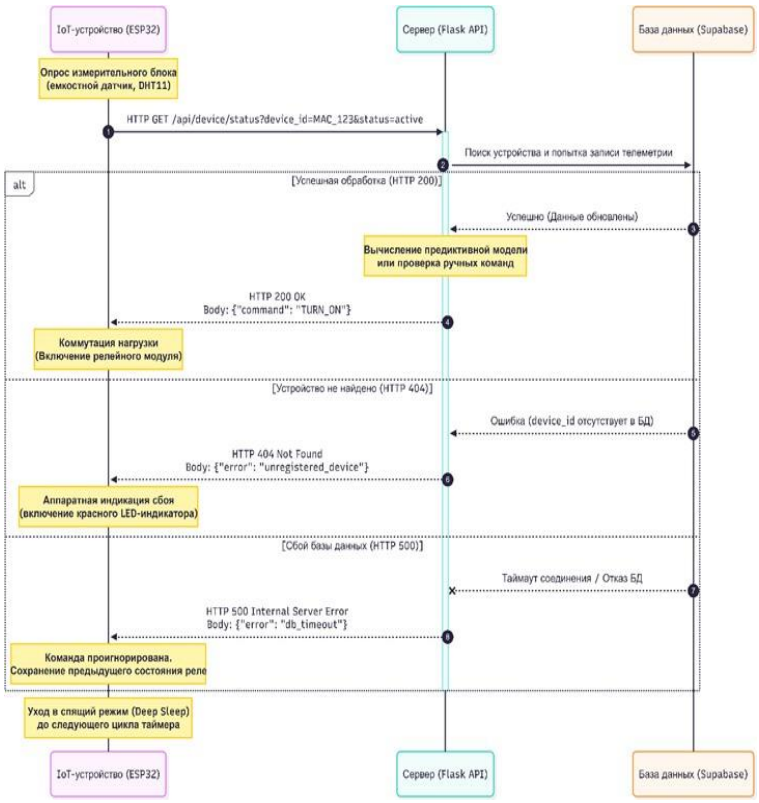


Рисунок 1. Диаграмма последовательности передачи данных между сервером и IoT-устройством
Figure 1. Data transmission sequence diagram between the server and the IoT device

Функциональность системы начинается с проектирования участка (визуальное создание плана участка), далее пользователь подбирает растения, оптимизирует полив (алгоритм расставляет в цифровом двойнике оптимальное количество поливательных устройств указанного типа в зависимости от требования к поливу типа растений) [2]. Визуальное представление этапов представлено на рис.2-3.

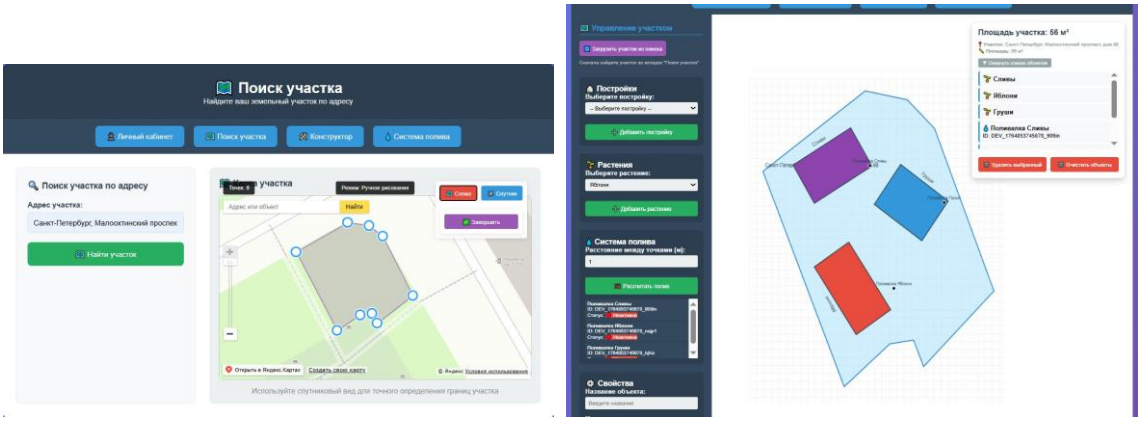


Рисунок 2. Планирование участка на веб-сервисе
Figure 2. Site planning on the web service

Интеграция цифрового двойника с региональными агроклиматическими базами, персонализированные модели полива на основе машинного обучения и адаптивные алгоритмы, учитывающие микроклимат участка, поможет снизить расход воды до 40% [3].

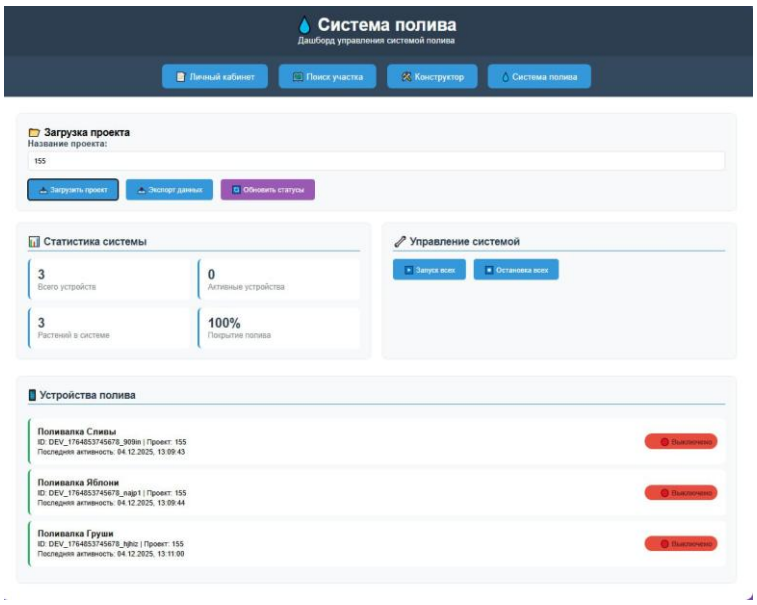


Рисунок 3. Отслеживание системы полива
Figure 3. Tracking the irrigation system

Интерфейс Личного кабинета (профиля пользователя) предназначен для первоначальной настройки учетных данных садовода и вывода сводной аналитической информации по всем текущим проектам. Страница построена на базе семантических HTML5-форм. Реализованы текстовые поля для ввода ФИО, адреса электронной почты, номера телефона и текстового описания особенностей грунта или рельефа [4].

Интегрирован асинхронный модуль загрузки изображения профиля (аватара пользователя) с валидацией типа файла на стороне клиента (допускаются форматы JPEG и PNG размером до 2 Мб). При нажатии кнопки «Сохранить изменения» JavaScript-обработчик перехватывает событие отправки формы, формирует JSON-объект и отправляет его через Fetch-запрос на серверный эндпоинт /save_user_data [3]. В правой части интерфейса расположен дашборд статистики. Он отправляет фоновый запрос к БД и динамически выводит агрегированные счетчики: общее количество созданных проектов, суммарное число размещенных на Canvas растений, количество зафиксированных строений и текущий статус подключенных аппаратных IoT-контроллеров (активно / неактивно) (Рис.4-5).

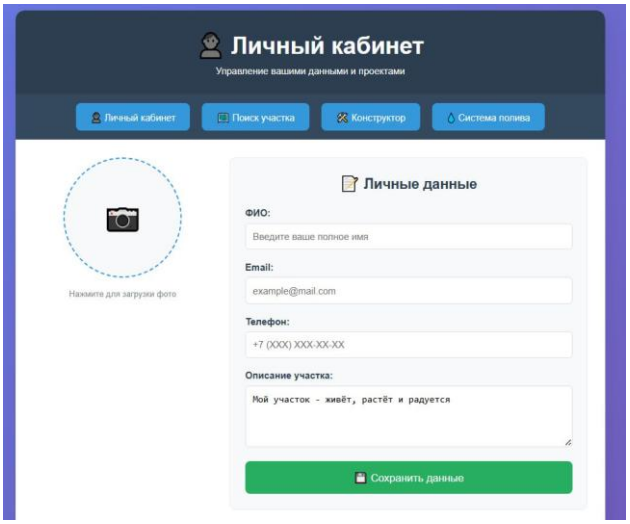


Рисунок 4. Интерфейс личного кабинета.
Figure 4. The interface of the personal account.

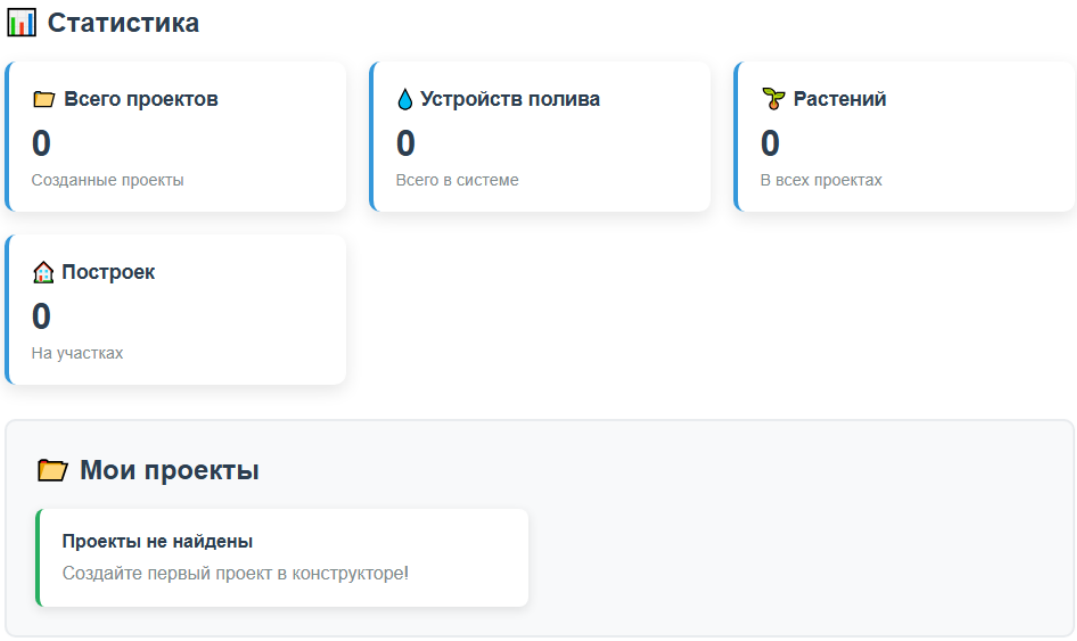


Рисунок 5. Интерфейс статистики.
Figure 5. The statistics interface.

Платформа объединяет цифровое проектирование, агрономические знания и AI-оптимизацию для создания эффективных систем полива, адаптированных под конкретные участки и регионы.

Список используемой литературы

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов. – Введ. 2016-06-01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 34 с.
2. Бьюман, Д. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика / Д. Бьюман. – Москва: Вильямс, 2021. – 1040 с.
3. Гринберг, М. Разработка веб-приложений с использованием Flask на языке Python / М. Гринберг. – Москва: ДМК Пресс, 2022. – 326 с.
4. Кольцов, А. С. Автоматизация систем капельного орошения на базе платформы Интернета вещей / А. С. Кольцов, В. Н. Петров // Вестник аграрной науки. – 2024. – № 2 (101). – С. 112–118.

References

1. GOST R ISO/IEC 25010-2015. System and software engineering. Requirements and evaluation of the quality of systems and software (SQuaRE). Quality models of systems and software products. – Introduction. 2016-06-01. Moscow: Standartinform, 2015. 34 p.
2. Beauman, D. Databases. Design, implementation and maintenance. Theory and practice / D. Beuman. Moscow: Williams, 2021. 1040 p.
3. Greenberg, M. Development of web applications using Flask in Python / M. Greenberg. – Moscow: DMK Press, 2022. – 326 p.
4. Koltsov, A. S. Automation of drip irrigation systems based on the Internet of Things platform / A. S. Koltsov, V. N. Petrov // Bulletin of Agrarian Science. – 2024. – № 2 (101). – Pp. 112-118.

SYNTHESIS OF TECHNOLOGIES: DIGITAL TWINS AND IOT IN AGRICULTURE

Martyn Irma A.
Associate Professor
Department of Applied Informatics,
Russian State Hydrometeorological University
Saint-Petersburg
E-mail: irma_martyn@mail.ru

Zhukov Pavel V.
2nd year student
Department of Applied Informatics,
Russian State Hydrometeorological University
Saint-Petersburg
E-mail: zhukov.pavel.03@mail.ru

Pugach Nikita V.
3rd year student
Department of Applied Informatics,
Russian State Hydrometeorological University
Saint-Petersburg

© Мартын И.А., Жуков П.В., Пугач Н.В., 2026

УДК 528.94:630*5:528.9

[1]Дзениш М.С., [1]Черниховский Д.М.

ГЛОБАЛЬНЫЕ ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ВЫСОТ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ ЛИСИНСКОЙ ЧАСТИ УЧЕБНО-ОПЫТНОГО ЛЕСНИЧЕСТВА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)

[1]Дзениш Маргарита Сергеевна
аспирант 2 курса ИЛиП
кафедра лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Санкт-Петербург
E-mail: margo_makeeva@bk.ru

[1]Черниховский Дмитрий Михайлович
доктор сельскохозяйственных наук, доцент
профессор кафедры лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем, ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова,
Санкт-Петербург
E-mail: cherndm2006@yandex.ru

Аннотация. В статье исследуются возможности применения современных глобальных цифровых моделей высот для оценки характеристик лесных насаждений на территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества. Проведён сравнительный анализ высот, полученных на основе моделей AW3D30 DSM, Copernicus DEM и ASTER GDEM.Модели AW3D30 DSM и Copernicus DEM продемонстрировали лучшие оценки качества по сравнению с ASTER GDEM. Также было выполнено построение моделей высот лесного полога посредством вычитания цифровой модели рельефа из глобальных моделей поверхности, а также исследовано влияние площади выделов, категорий земель, конфигурации участков на значения высот лесного полога. Получены регрессионные зависимости между высотой центра фазы рассеяния и основными таксационными параметрами древостоев, позволяющие оценивать среднюю высоту насаждений и запасы древесины по материалам дистанционного зондирования без выполнения полного комплекса наземных измерений. Продемонстрирована возможность применения предложенного подхода для оценки запасов углерода, аккумулированного лесными экосистемами. Результаты исследования подтверждают эффективность применения глобальных цифровых моделей высот при оценке высот и запасов лесных насаждений, а также оценке биомассы. Полученные закономерности могут использоваться для упрощенных оценок лесных ресурсов, определения количества углерода в надземной биомассе, а также совершенствования методов мониторинга лесов.

Ключевые слова: таксационные характеристики, цифровая модель высот, модель высот лесного полога, цифровая модель рельефа, высота центра фазы рассеяния, регрессионный анализ.

GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODELS IN THE ASSESSMENT OF THE CHARACTERISTICS OF FOREST STANDS (ILLUSTRATED BY THE LISINSK PART OF THE EDUCATIONAL AND EXPERIMENTAL FORESTRY OF THE LENINGRAD REGION)

Abstract. The article explores the possibilities of using modern global digital elevation models to analyze the structure of the forest canopy and determine the taxation characteristics of forest plantations in the

territory of the Lisinsk part of the Educational and Experimental Forestry. The work is based on the application of remote sensing data and geoinformation technologies in the creation of digital models of terrain and surface. During the study, a comparative analysis of the AW3D30 DSM, Copernicus DEM and ASTER GDEM models was carried out, the results of which showed that the AW3D30 DSM and Copernicus DEM models are characterized by high accuracy and are suitable for solving problems of forest inventory and monitoring of forest ecosystems, whereas ASTER GDEM is characterized by lower accuracy and significant deviations in altitude parameters. Models of forest canopy heights were also constructed by subtracting a digital relief model from global surface models, and the influence of allotments, land categories, site configurations, and terrain features on elevation indicators was studied. Regression dependences between the height of the scattering phase center and the main taxation parameters of stands have been obtained, which make it possible to estimate the average height of plantings and wood stocks based on remote sensing materials without performing a full range of ground-based measurements. The possibility of applying the proposed approach to estimate carbon reserves accumulated by forest ecosystems is demonstrated. The results of the study confirm the effectiveness of using global digital elevation models in analyzing the structure of the forest canopy, assessing biomass, carbon balance, and improving forest monitoring methods.

Keywords: taxation characteristics, digital elevation model, forest canopy elevation model, digital relief model, height of the scattering phase center, regression analysis.

Введение. Цифровое моделирование лесного полога является одним из перспективных направлений исследований. Глобальные модели рельефа и поверхности, создаваемые на основе данных дистанционного зондирования Земли, активно используются для оценки состояния лесов, определения высоты древостоев, запасов древесины и объёмов биомассы. Цифровые модели высот представляют собой трёхмерные растровые модели земной поверхности, в которых каждой ячейке соответствует усреднённое значение высоты. Выделяют два основных типа цифровых моделей высот. Модели поверхности отражают высоты всех объектов, расположенных на местности, включая растительность и инженерные сооружения. Модели рельефа характеризуют исключительно высоту земной поверхности. Разница указанных моделей характеризует высоту лесного полога и может использоваться при оценке различных характеристик лесов.

Развитие технологий дистанционного зондирования и методов обработки пространственной информации существенно расширяет возможности цифрового моделирования лесного полога. Повышение пространственного и временного разрешения спутниковых данных, интеграция технологий лазерного сканирования, радиолокационной съёмки и методов искусственного интеллекта позволяют получать более точные и детализированные сведения о лесных экосистемах. Применение разновременных данных обеспечивает возможность мониторинга динамики лесного покрова, выявления последствий рубок, лесных пожаров, ветровалов и иных природных и антропогенных воздействий. Современные методы машинного обучения обеспечивают автоматизированную классификацию лесных насаждений и повышают точность прогнозирования изменений лесного покрова. В перспективе цифровые модели высот будут всё шире использоваться при решении задач устойчивого лесоуправления, оценки углеродного баланса, мониторинга биоразнообразия и формирования систем оперативного экологического контроля на региональном и глобальном уровнях.

Обработка пространственной информации выполнялась с использованием программных комплексов QGIS и SAGA GIS. Исходные материалы лесоустройства были экспортированы из систем WinGIS и WinPLP в формат .shp с применением системы координат WGS-84 / UTM36N. Пространственные данные для трёх участковых лесничеств были объединены в единый векторный слой, после чего произведена подготовка и систематизация атрибутивных данных. В процессе исследования рассматривались такие лесотаксационные показатели, как категория земель, площадь выдела, преобладающая древесная порода, класс бонитета, тип леса, возраст насаждений, полнота древостоя, средняя высота и запас древесины на гектар. Для построения цифровой модели рельефа использовались оцифрованные топографические карты. После трансформирования картографических материалов в ГИС были сформированы векторные слои горизонталей и высотных

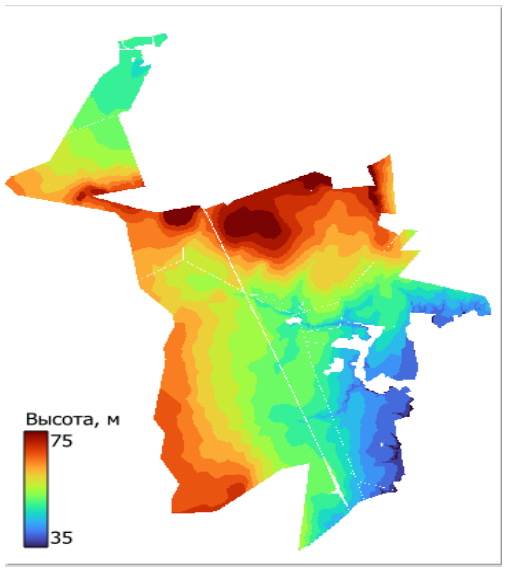
отметок, на основе которых создавались цифровые модели рельефа. Статистическая обработка данных выполнялась средствами Statgraphics и MicrosoftExcel.

В качестве объекта исследования выбрана Лисинская часть Учебно-опытного лесничества, расположенная в Тосненском районе Ленинградской области. Площадь территории составляет около 28 тыс. га. Лесной массив характеризуется равнинным рельефом и продолжительной историей лесохозяйственного освоения. Последнее лесоустройство на территории лесничества проводилось в 2021 году. Площадь земель лесного фонда представлена на 94,2% лесными землями, из которых сосняки занимают 27,9%, ельники – 36,2%, березняки – 23,3%, осинники – 11,4%, насаждения прочих пород – 1,1%.

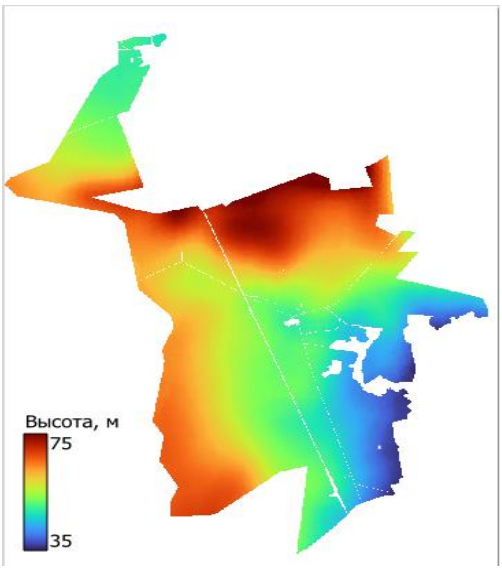
Для решения поставленных задач использовались открытые глобальные цифровые модели высот ASTER GDEM, AW3D30 и Copernicus DEM. Полученные фрагменты моделей были приведены к единой системе координат и обрезаны по границам исследуемой территории.

Модель AW3D30 создана на основе стереосъёмки спутника ALOS и отличается высокой точностью при пространственном разрешении порядка 30 м. ASTER GDEM разработана по данным сенсора ASTER спутника Terra. Модель Copernicus DEM сформирована на основе WorldDEM и дополнена сведениями других глобальных моделей [1].

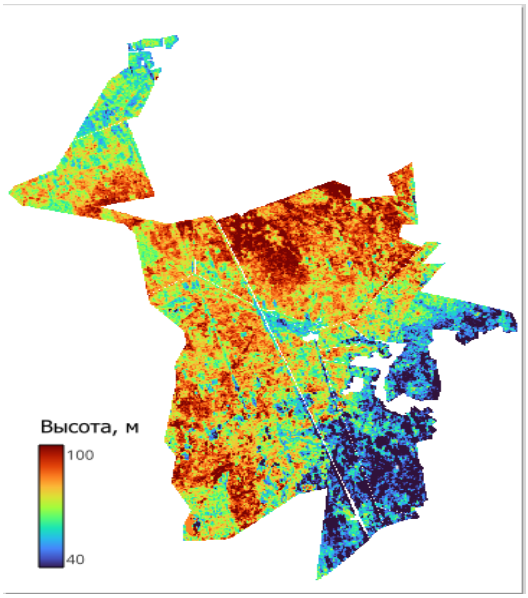
Для оценки качества моделей использовались контрольные точки высот, выделенные по топографическим картам. Отдельно анализировались точки, расположенные на открытых участках территории (110 шт.) и точки на участках, покрытых лесной растительностью (351 шт.).



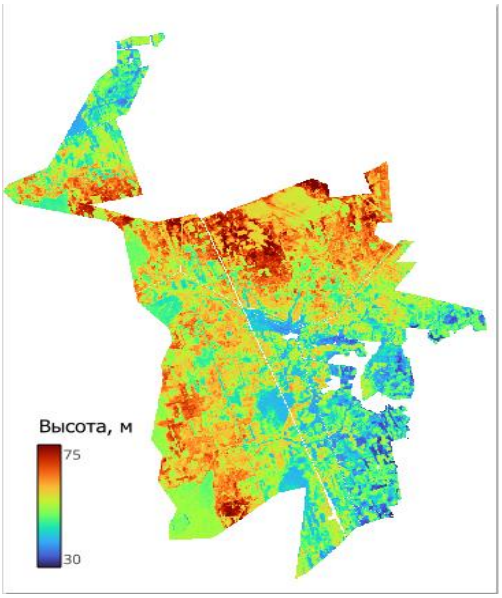
а



б



в



г

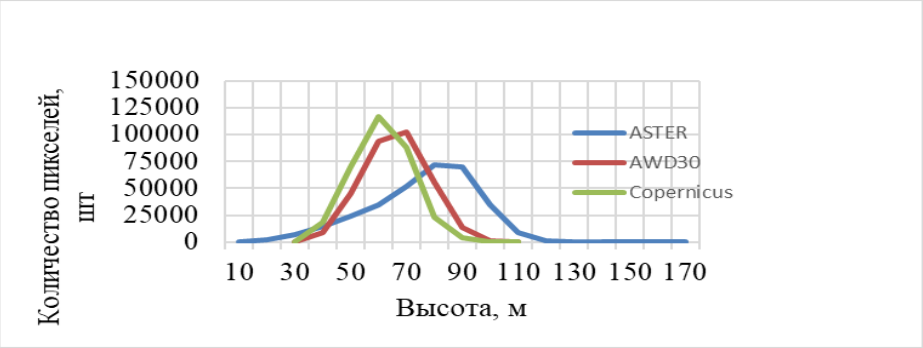
Рисунок 1.Цифровые модели высот рельефа и поверхности: а – ЦМР, построенная методом ближайшего соседа (NN), б – ЦМР, построенная методом одинарного кригинга, в – ЦМВ ASTER GDEM, г – ЦМВAW3D30

Figure 1. Digital elevation and surface models: a – CMR, constructed by the nearest neighbor (NN) method, b – CMR, constructed by the ordinary kriging method, c – CMB ASTER GDEM, d – CMB AW3D30

Наиболее высокие показатели точности продемонстрировали модели Copernicus DEM и AW3D30. Для модели ASTER GDEM отмечены наиболее высокие значения ошибок и наиболее существенное варьирование высот.

При сравнении цифровых моделей рельефа (далее — ЦМР) лучшие результаты были получены для модели, сформированной методом ближайшего соседа. Для данной модели зафиксированы минимальные значения среднеквадратической ошибки.

Далее для сформированных цифровых моделей высот (далее — ЦМВ) была проведена оценка статистических характеристик и построены гистограммы распределения высот. На рис. 2 представлены гистограммы распределения высот фрагментов глобальных ЦМВ, а также их основные статистические параметры.



ЦМВ	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
Copernicus GDEM	66,73	67,16	10,33	33,29	111,2
AW3D30	71,93	72	11,07	35	114
ASTER GDEM v.2	72,08	75	18,57	2	173

Рисунок 2.Характеристики распределения высот модельной территории на основе глобальных ЦМВ ASTER GDEM v.2, AW3D30 DSM и Copernicus DEM: а – гистограммы распределения высот, б – краткие статистические характеристики

Figure 2. Characteristics of the height distribution of the model territory based on the global CMV ASTER GDEM v.2, AW3D30 DSM and Copernicus DEM: a – histograms of height distribution, b – brief statistical characteristics

Путём вычитания цифровой модели рельефа из глобальных моделей поверхности были сформированы модели высот лесного полога (далее — МВЛП) [4]. Вопросам определения характеристик лесных экосистем на основе глобальных ЦМВ и влияния древесно-кустарниковой растительности на точность моделей высот посвящено значительное количество исследований, выполненных в различных странах мира [2, 3, 5–10]. Выполнен анализ высот различных категорий земель с учётом площади выделов. Полученные результаты показали, что для болот и нелесных земель площадь выдела оказывает заметное влияние на средние показатели высоты. Для лесных территорий подобная зависимость выражена существенно слабее. Полученные данные подтверждают влияние конфигурации участка, его размеров и соседства с лесными массивами на значения высот, определяемые по глобальным моделям (табл. 1).

Таблица 1. Средние высоты и стандартные отклонения групп и отдельных категорий земель, определенные на основе разницы глобальных ЦМВ AWD30 и Copernicusc ЦМР по группам площадей
Table 1. Average heights and standard deviations of groups and individual land categories, determined on the basis of the difference between the global digital height modelAWD30 and the Copernicusc digital terrain modelby area groups.

Модель высот лесного полога	Площадь выдела, га			
	<= 1	1,1-3	3,1-5	> 5
Болото (84 шт.)				
$МВЛП_{AWD30}$	8,27±2.25	7,86±3,02	3,75±2,1	2,28±1,26
$МВЛП_{Copernicus}$	3,77±1,85	4,81±2,93	3,4±2,47	1,31±1,0
Нелесные земли (462 шт.)				
$МВЛП_{AWD30}$	7,19±2,19	7,74±3,36	7,48±3,57	3,74±2,39
$МВЛП_{Copernicus}$	4,74±2,03	4,75±2,77	5,0±3,04	2,26±1,9
Лесные земли, покрытые лесной растительностью (10615 шт.)				
$МВЛП_{AWD30}$	15,08±2,97	15,93±3,53	15,79±3,68	15,01±3,68
$МВЛП_{Copernicus}$	9,94±2,61	10,45±3,2	10,27±3,44	9,72±3,33

В работе [4] подчёркивается, что на величины высот ЦМВ оказывают воздействие такие характеристики участка, как его площадь и конфигурация, положение в рельефе, а также близость к территориям с выраженными перепадами высот — в частности, к лесным опушкам, линиям электропередач, вырубкам и др. Установлено, что средние высоты нелесных участков компактной или вытянутой формы (включая ЛЭП, дороги, трассы, противопожарные разрывы) зависят от высотных показателей примыкающих к ним лесных территорий.

Дисперсионный анализ позволил выявить статистически значимые различия высот между группами площадей (табл. 2). Наиболее выраженные различия были зафиксированы при разделении участков на категории площадью до и более 5 га. Несмотря на различия абсолютных высотных показателей между моделями AW3D30 и Copernicus DEM, результаты статистического анализа для обеих моделей оказались сходными.

Таблица 2. Результаты дисперсионного анализа влияния площади выдела на среднюю высоту по материалам ЦМВ AWD30 и Copernicus
Table 2. The results of the dispersion analysis of the effect of the allotment area on the average height based on digital height modelAWD30 and Copernicus materials

Модель высот лесного полога	Группы по величине площади выдела			
	4 группы (0 – 1 га, 1.1 – 3 га, 3.1 – 5 га, более 5 га)	3 группы (0 – 3 га, 3.1 – 5 га, более 5 га)	2 группы (0 – 5 га, 5.1 и более)	2 группы (0 – 3 га, 3.1 и более)
Болото (84 шт.)				
$МВЛП_{AWD30}$	10,49 (0,0000) (1,2) – (3,4)	15,86 (0,0034) (1) – (2, 3)	20,56 (0,0000) 1 – 2	30,81 (0,0000) (1 – 2)
$МВЛП_{Copernicus}$	7,72 (0,0001) (1,2,3) – (4)	10,68 (0,0001) (1,2) – (3)	20,10 (0,0000) 1 – 2	15,73 (0,0002) 1 – 2
Нелесные земли (462 шт.)				
$МВЛП_{AWD30}$	8,87 (0,0002) (1,2,3) – (4)	12,79 (0,0034) (1,2) – (3)	25,62 (0,0000) 1 – 2	11,50 (0,0008) 1 – 2
$МВЛП_{Copernicus}$	6,82 (0,0000) (1,2,3) – (4)	10,25 (0,0000) (1,2) – (3)	20,36 (0,0000) 1 – 2	7,82 (0,0054) 1 – 2
Лесные земли, покрытые лесной растительностью (10614 шт.)				

МВЛП$_{AWD30}$	13,32 (0,0000) (1,4) – (2,3)	5,70 (0,0034) (1,2) – (3)	10,74 (0,0010) 1 – 2	1,60 (0,2053) (1,2)
МВЛП$_{Copernicus}$	8,88 (0,0000) (1,4) – (2,3)	5,73 (0,0033) (1,2) – (3)	11,46 (0,0007) 1 – 2	4,05 (0,0442) (1,2)

Примечание: в ячейках таблицы приведены значения критерия Фишера (*F-ratio*), в скобках – уровень значимости дисперсионного анализа (*p-value*), далее – результаты множественного рангового теста сравнения средних значений высот между группами (номера групп в скобках обозначают группы со статистически неразличимыми средними высотами, через тире показаны группы со статистически различимыми средними

Впроцессеисследованиябылиустановленылинейныезависимостимеждувысотойцентрафазырассеянияиосновнымитаксационнымихарактеристиками древостоев. Анализ выполнялся для основных древесных пород — сосны, ели, берёзы и осины — с учётом разделения по возрастным группам. Полученные регрессионные уравнения (табл. 3) позволяют определять высоту насаждений и запасы древесины на основе данных дистанционного зондирования и цифровых моделей высот.

Таблица 3. Регрессионные уравнения зависимостей средней высоты $\bar{h}$(м) и среднего запаса $\bar{M}$(м^3/га) насаждений основных преобладающих пород от средней высоты центра фазы рассеяния $\bar{h}_S$(м). В скобках указано количество выделов (шт.)

Table3. Regression equations of the average height (m) and average stock (m3/ha) of the main prevailing species from the average height of the center of the scattering phase (m). The number of sections (pcs.) is indicated in parentheses.

Характеристика	Группа возраста				
	Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные	Все группы возраста
Сосна					
Средняя высота, м	$\bar{h} = 0{,}84\bar{h}_S$ $R^2 = 48{,}63$ (129)	$\bar{h} = 1{,}29\bar{h}_S$ $R^2 = 90{,}76$ (421)	$\bar{h} = 1{,}3\bar{h}_S$ $R^2 = 93{,}2$ (555)	$\bar{h} = 1{,}4\bar{h}_S$ $R^2 = 90{,}76$ (1692)	$\bar{h} = 1{,}36\bar{h}_S$ $R^2 = 90{,}88$ (2797)
Средний запас, м^3/га	$\bar{M} = 10{,}54\bar{h}_S$ $R^2 = 52{,}64$ (129)	$\bar{M} = 16{,}17\bar{h}_S$ $R^2 = 91{,}9$ (421)	$\bar{M} = 15{,}92\bar{h}_S$ $R^2 = 93{,}43$ (555)	$\bar{M} = 14{,}39\bar{h}_S$ $R^2 = 91{,}09$ (1692)	$\bar{M} = 14{,}91\bar{h}_S$ $R^2 = 91{,}33$ (2797)
Ель					
Средняя высота, м	$\bar{h} = 0{,}83\bar{h}_S$ $R^2 = 73{,}26$ (791)	$\bar{h} = 1{,}17\bar{h}_S$ $R^2 = 92{,}85$ (1337)	$\bar{h} = 1{,}25\bar{h}_S$ $R^2 = 95{,}62$ (663)	$\bar{h} = 1{,}39\bar{h}_S$ $R^2 = 94{,}82$ (1107)	$\bar{h} = 1{,}24\bar{h}_S$ $R^2 = 92{,}12$ (3898)
Средний запас, м^3/га	$\bar{M} = 8{,}19\bar{h}_S$ $R^2 = 65{,}35$ (791)	$\bar{M} = 15{,}57\bar{h}_S$ $R^2 = 89{,}54$ (1337)	$\bar{M} = 16{,}19\bar{h}_S$ $R^2 = 93{,}86$ (663)	$\bar{M} = 14{,}61\bar{h}_S$ $R^2 = 93{,}27$ (1107)	$\bar{M} = 14{,}75\bar{h}_S$ $R^2 = 89{,}48$ (3898)
Береза					
Средняя высота, м	$\bar{h} = 0{,}57\bar{h}_S$ $R^2 = 57{,}17$ (302)	$\bar{h} = 1{,}22\bar{h}_S$ $R^2 = 89{,}85$ (684)	$\bar{h} = 1{,}22\bar{h}_S$ $R^2 = 95{,}61$ (308)	$\bar{h} = 1{,}21\bar{h}_S$ $R^2 = 95{,}32$ (1200)	$\bar{h} = 1{,}21\bar{h}_S$ $R^2 = 93{,}43$ (2494)
Средний запас,	$\bar{M} = 4{,}27\bar{h}_S$	$\bar{M} = 11{,}09\bar{h}_S$	$\bar{M} = 12{,}7\bar{h}_S$	$\bar{M} = 11{,}69\bar{h}_S$	$\bar{M} = 11{,}55\bar{h}_S$

Характеристика	Группа возраста				
	Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные	Все группы возраста
м³/га	$R^2 = 49{,}88$ (302)	$R^2 = 89{,}57$ (684)	$R^2 = 95{,}25$ (308)	$R^2 = 94{,}73$ (1200)	$R^2 = 92{,}62$ (2494)
Осина					
Средняя высота, м	$\bar{h} = 1{,}09\bar{h}_S$ $R^2 = 76{,}65$ (31)	$\bar{h} = 1{,}3\bar{h}_S$ $R^2 = 77{,}31$ (40)	$\bar{h} = 1{,}34\bar{h}_S$ $R^2 = 90{,}72$ (32)	$\bar{h} = 1{,}24\bar{h}_S$ $R^2 = 95{,}92$ (1130)	$\bar{h} = 1{,}24\bar{h}_S$ $R^2 = 95{,}58$ (1233)
Средний запас, м³/га	$\bar{M} = 8{,}81\bar{h}_S$ $R^2 = 68{,}24$ (31)	$\bar{M} = 12{,}94\bar{h}_S$ $R^2 = 79{,}17$ (40)	$\bar{M} = 16{,}05\bar{h}_S$ $R^2 = 92{,}46$ (32)	$\bar{M} = 13{,}42\bar{h}_S$ $R^2 = 94{,}09$ (1130)	$\bar{M} = 13{,}43\bar{h}_S$ $R^2 = 93{,}81$ (1233)

Одним из возможных направлений применения разработанного подхода является расчёт запасов углерода, аккумулированного лесными экосистемами. Для определения запасов углерода использовались данные о запасе древесины и конверсионные коэффициенты[1]. Расчет проводился по формуле:

$$CP_{ij} = V_{ij} * KP_{ij},$$

где:

CP_{ij} – запас углерода в биомассе древостоев группы возраста i преобладающей породы j, тонн С;

V_{ij} – объёмный запас стволовой древесины насаждений группы возраста I преобладающей породы j, м3/га;

Сравнение результатов, полученных по материалам лесоустройства и по регрессионным моделям, показало небольшое расхождение — около 4,7 %, что подтверждает надёжность предложенного метода (табл. 4).

Таблица 4. Запасы углерода в биомассе древостоев основных преобладающих пород, тонн С
Table 4. Carbon reserves in the biomass of the main dominant tree species, tons of C

Преобладающая порода	Группа возраста				Всего
	Молодняки	Средневозрастные	Приспевающие	Спелые и перестойные	
Сосна	6617	68278	136346	376775	588016
	5664	57478	117190	353848	534180

[1]Конверсионные коэффициенты для пересчета запасов древесины в запасы углерода по основным лесообразующим породам приведены в Приказе Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27 мая 2022 года №371 «Об утверждении методик количественного определения объёмов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (зарегистрирован в Минюсте России 29 июля 2022 года, регистрационный №69451) // Официальный интернет-портал правовой информации. 2022. 29 июля.

Ель	100900	263654	152729	264168	781452
	128331	237203	137373	257858	760765
Береза	16440	120819	72336	266173	475768
	20245	114216	64284	258763	457508
Осина	1956	6876	6700	318731	334263
	2130	5170	5034	312734	325068
Итого	125913	459627	368111	1225847	2179498
	156370	414067	323881	1183203	2077521

В верхней строке таблицы приведены значения запасов углерода, определенных на основе материалов лесоустройства, а в нижней — показатели, рассчитанные на основе регрессионных зависимостей запаса древесины от центра фазы рассеяния ЦМВ AWD30.

Заключение. Проведённое исследование продемонстрировало перспективность использования современных глобальных цифровых моделей высот для оценки основных характеристик лесных насаждений. Применение данных дистанционного зондирования Земли совместно с геоинформационными технологиями позволяет проводить обработку и анализ цифровых моделей рельефа и поверхности, а на их основе оценивать высоты и запасы лесных насаждений.

По результатам сравнительного анализа высот установлено, что модели AW3D30 DSM и Copernicus DEM обладают более высокой точностью и меньшим варьированием по сравнению с ASTER GDEM.

Построенные цифровые модели рельефа показали высокую степень соответствия контрольным высотным отметкам. Наиболее точные результаты были получены для ЦМР, сформированной методом ближайшего соседа.

Установлено, что для ряда категорий нелесных земель площадь выдела оказывает статистически значимое влияние на средние значения разницы высот моделей поверхности и рельефа. Для лесных территорий подобная зависимость выражена существенно слабее, что связано с относительной однородностью древесного покрова. Кроме того, установлено, что на показатели высоты влияют конфигурация участков, особенности рельефа, а также близость к границам лесных массивов, просекам и другим открытым пространствам.

Особую значимость имеют выявленные регрессионные зависимости между высотой центра фазы рассеяния и основными таксационными характеристиками древостоев. Полученные уравнения позволяют определять среднюю высоту насаждений и запасы древесины основных преобладающих пород по данным дистанционного зондирования без необходимости проведения полного комплекса наземных измерений. Это позволяет проводить оценку и мониторинг лесных ресурсов по упрощенным технологиям, что особенно актуально для удалённых и труднодоступных территорий.

Практическая значимость исследования также определяется возможностью применения разработанного подхода для оценки запасов углерода, аккумулированного лесными экосистемами. Полученные результаты продемонстрировали близость расчётов, выполненных на основе регрессионных моделей и материалов лесоустройства, что подтверждает надёжность и перспективность предложенной методики. Данный аспект особенно актуален в условиях возрастающего внимания к вопросам климатического регулирования, углеродного баланса и экологического мониторинга.

Таким образом, результаты проведённого исследования свидетельствуют о том, что современные глобальные цифровые модели высот являются эффективным источником пространственной информации о лесных экосистемах и могут успешно использоваться для оценки отдельных характеристик лесов, запасов надземной биомассы и запасов углерода.

Перспективы дальнейшего развития данного направления связаны с расширением применения высокоточных спутниковых данных, технологий лазерного сканирования, радиолокационной съёмки и методов искусственного интеллекта для повышения точности оценки лесных характеристик. Интеграция разновременных данных дистанционного зондирования позволит не только определять текущее состояние лесных экосистем, но и анализировать их динамику во времени, выявлять процессы деградации лесов, последствия пожаров, санитарных нарушений и климатических изменений.

В дальнейшем возможно совершенствование регрессионных моделей за счёт увеличения объёма полевых измерений, расширения перечня исследуемых древесных пород и учёта дополнительных факторов, оказывающих влияние на структуру лесного полога. Это позволит повысить точность прогнозирования таксационных показателей и адаптировать разработанные методики к различным природно-климатическим условиям.

Отдельное перспективное направление связано с интеграцией глобальных цифровых моделей высот с данными беспилотных летательных аппаратов и спутников нового поколения, обладающих более высоким пространственным разрешением. Такой подход обеспечит возможность формирования детализированных трёхмерных моделей лесных экосистем и повысит оперативность получения информации о состоянии лесного фонда.

Практическое применение разработанных методов может быть дополнительно расширено в области устойчивого лесоуправления, оценки углеродного баланса и реализации климатических проектов, связанных с контролем накопления и эмиссии углерода. Полученные результаты также могут использоваться при создании систем автоматизированного мониторинга лесов, поддержке принятия управленческих решений и совершенствовании национальных систем учёта лесных ресурсов. В условиях глобальных климатических изменений и возрастающей антропогенной нагрузки значение подобных технологий будет неуклонно возрастать, что делает дальнейшее развитие методов дистанционного анализа лесных экосистем особенно актуальным и перспективным направлением научных исследований.

Список использованной литературы

1. *Флоринский И.В.*Геоморфометрия сегодня // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27, № 2. С. 394-447. DOI 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.
2. *Avtar R., Sawada H.* Use of DEM data to monitor height changes due to deforestation // Arabian Journal of Geosciences. 2013. vol. 6. no. 12. pp. 4859–4871.DOI:10.1007/s12517-012-0768-2
3. *Gallant J.C., Read A.M., Dowling T.I.* Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2012. vol. 39. no. 14. pp. 275–280.DOI:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-275-2012
4. *Kellndorfer, J., Walker, W., Pierce, L., Dobson, C., Fites, J.A., Hunsaker, C. and Clutter, M.*Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets // Remote Sensing of Environment. 2004. vol. 93. pp. 339–358.
5. *Miliaresis G., Delikaraoglou D.* Effects of Percent Tree Canopy Density and DEM Misregistration on SRTM/NED Vegetation Height Estimates // Remote Sensing. 2009. vol. 1. pp. 36–49.
6. *Ni W., Sun G., Zhang Z., Guo Z., He Y.*Co-Registration of Two DEMs: Impacts on Forest Height Estimation from SRTM and NED at Mountainous Areas // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. vol. 11. no. 1. pp. 273–277.doi: 10.1109/LGRS.2013.2255580
7. *Sexton J.O., Bax T., Siqueira P., Swenson J.J., Hensley S.*A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America // Forest Ecology and Management. 2009. vol. 257. pp. 1136–1147.
8. *Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K*. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter // Remote Sensing of Environment. 2003. vol. 88. pp. 401–411.
9. *Ye Z., Long J., Zhang T., Lin B., Lin H.* L-Band Synthetic Aperture Radar and Its Application for Forest Parameter Estimation, 1972 to 2024: A Review // Plants.2024, 13, 2511. https://doi.org/10.3390/plants13172511
10. *Zhang Z, Ni W., Fu A., Guo Z., Sun G., and Wang D.*Estimation of forest structural parameters from Lidar and SAR data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2008. vol. 37. pp. 1121–1126.

References

1. *Avtar R., Sawada H.* Use of DEM data to monitor height changes due to deforestation.*Arabian Journal of Geosciences*. 2013. vol. 6. no. 12. pp. 4859–4871. DOI:10.1007/s12517-012-0768-2
2. *FlorinskyI.V.*Geomorphometrytoday.*TheInterCarto. InterGIS*. 2021. Vol. 27, No. 2. pp. 394-447. DOI

10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448. (In Russ.)
3. *Gallant J.C., Read A.M., Dowling T.I.* Removal of tree offsets from SRTM and other digital surface models.*International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. vol. 39. no. 14. pp. 275–280. DOI:10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-275-2012
4. *Kellndorfer, J., Walker, W., Pierce, L., Dobson, C., Fites, J.A., Hunsaker, C. and Clutter, M.* Vegetation height estimation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Datasets.*Remote Sensing of Environment*. 2004. vol. 93. pp. 339–358.
5. *Miliaresis G., Delikaraoglou D.* Effects of Percent Tree Canopy Density and DEM Misregistration on SRTM/NED Vegetation Height Estimates.*Remote Sensing*. 2009. vol. 1. pp. 36–49.
6. *Ni W., Sun G., Zhang Z., Guo Z., He Y.*Co-Registration of Two DEMs: Impacts on Forest Height Estimation from SRTM and NED at Mountainous Areas.*IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2014. vol. 11. no. 1. pp. 273–277. doi: 10.1109/LGRS.2013.2255580
7. *Sexton J.O., Bax T., Siqueira P., Swenson J.J., Hensley S.*A comparison of lidar, radar, and field measurements of canopy height in pine and hardwood forests of southeastern North America.*Forest Ecology and Management*. 2009. vol. 257. pp. 1136–1147.
8. *Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K*. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter.*Remote Sensing of Environment*. 2003. vol. 88. pp. 401–411.
9. *Ye Z., Long J., Zhang T., Lin B., Lin H.* L-Band Synthetic Aperture Radar and Its Application for Forest Parameter Estimation, 1972 to 2024: A Review. *Plants,*2024, 13, 2511. https://doi.org/10.3390/plants13172511
10. *Zhang Z, Ni W., Fu A., Guo Z., Sun G., and Wang D.*Estimation of forest structural parameters from Lidar and SAR data.*The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. vol. 37. pp. 1121–1126.

GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODELS IN THE ASSESSMENT OF THE CHARACTERISTICS OF FOREST STANDS (ILLUSTRATED BY THE LISINSK PART OF THE EDUCATIONAL AND EXPERIMENTAL FORESTRY OF THE LENINGRAD REGION)

Dzenish Margarita S.,
2nd year postgraduate student at ILiP
Department of Forest Taxation, Forest Management and GIS,
St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov
Saint-Petersburg
E-mail: margo_makeeva@bk.ru

Chernikhovskiy Dmitry M.,
Associate professor, DSc (Agriculture),
professor of the Department of Forest inventory, forest management and GIS,
St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov
Saint-Petersburg

© Дзениш М.С., Черниховский Д.М., 2026

УДК 004.75

[1]Варфоломеева А.К., [1]Митюшина С.А., [1]Сафонова Т.В., [2]Мокряк А.В.

ОБЗОР МАЛОМОЩНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ IOT-ПЛАТФОРМ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

[1]Варфоломеева Амина Кирилловна
студентка 3 курса, ФГБОУ ВО «Российский Государственный Гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург
E-mail: azzzigdreams@gmail.com

[1]Митюшина Светлана Анатольевна
студентка 3 курса, ФГБОУ ВО «Российский Государственный Гидрометеорологический университет», г. Санкт-Петербург
E-mail: **mityushina.sa@gmail.com**

[1]Сафонова Татьяна Владимировна
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики ФГБОУ ВО «Российский Государственный Гидрометеорологический университет»
г. Санкт-Петербург
E-mail: tatyana.vsafonova@gmail.com

[2]Мокряк Анна Васильевна
научный сотрудник ФГБОУ ВО Санкт-петербургский университет ГПС МЧС России
г. Санкт-Петербург
E-mail: mokryakanna@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются маломощные гидрометеорологические IoT-платформы как альтернатива и дополнение к существующим системам видеомониторинга лесных пожаров, в частности к системе «Лесной дозор». Анализируются архитектура таких платформ, включая беспроводные сенсорные сети (WSN) и энергоэффективные технологии связи LoRaWAN и NB-IoT, а также их интеграция с цифровыми двойниками для перехода от описательного мониторинга к предиктивной аналитике. Приведён обзор зарубежных решений: немецких систем Silvanet и IQ Fire-Watch, выделены их преимущества и недостатки, включая стоимость развёртывания, зависимость от инфраструктуры и покрытие территории. Выявлены основные проблемы: энергоснабжение удалённых сенсорных узлов, нестабильность автономных источников, достоверность недорогих датчиков, помехи передачи данных и масштабируемость сетей. В качестве перспектив указаны развитие периферийных вычислений, использование методов искусственного интеллекта, технологий сбора энергии и комбинирование различных систем для создания универсальных решений мониторинга лесных массивов.

Ключевые слова*:* цифровой двойник, IoT, гидрометеорологические системы, энергосбор, лесные пожары, автономные сенсорные сети.

A REVIEW OF LOW-POWER HYDROMETEOROLOGICAL IOT PLATFORMS FOR POWERING DIGITAL TWINS

Annotation. This article examines low-power hydrometeorological IoT platforms as an alternative and complement to existing forest fire video monitoring systems, particularly the Forest Watch system. The architecture of such platforms, including wireless sensor networks (WSNs) and energy-efficient LoRaWAN and NB-IoT communication technologies, is analyzed, as well as their integration with digital twins to transition from descriptive monitoring to predictive analytics. A review of international solutions, including the German Silvanet and IQ Fire-Watch systems, is provided, highlighting their advantages and disadvantages, including deployment costs, infrastructure dependence, and coverage. Key challenges are identified: power supply for remote sensor nodes, instability of autonomous sources, reliability of inexpensive sensors, data transmission interference, and network scalability. Promising opportunities include the development of edge computing, the use of artificial intelligence methods, energy harvesting technologies, and the combination of various systems to create universal forest monitoring solutions.

Keywords: digital twin, IoT, hydro meteorological systems, energy collection, wildfires, autonomous sensor networks.

Введение. Гидрометеорология – сфера, которая влияет на нашу повседневную жизнь больше, чем нам кажется. Это не просто прогнозы погоды, но и помощь в прогнозировании в других сферах, таких как сельское хозяйство, лесничество и экомониторинг. Для оперативности получения данных в сферу гидрометеорологии внедряют современные технологии.

Нынешние тренды – цифровые двойники и IoT-платформы. Цифровой двойник – это копия реальных физических процессов в цифровой среде, которые помогают прогнозировать обстановку в режиме реального времени. Используя технологии искусственного интеллекта, данные датчиков и обработку больших данных, на выходе получается платформа, которая образует сеть подключенных датчиков и метеостанций, которые в реальном времени собирают, передают и анализируют данные о погоде и состоянии окружающей среды через Интернет. Использование Интернета дает гибкость в настройке конфигураций, повышает точность данных, что помогает в принятии решений при планировании в разных отраслях. Также это преобразует подход к мониторингу таких показателей, как состояние почв, воды, лесных массивов в целом, давая новые возможности для экологического контроля таких аномалий как лесные пожары.

Согласно проведенным исследованиям, каждый год лесные пожары вызывают 20% глобальных выбросов CO2 и наносят финансовый ущерб около $140 млрд. [11].

В настоящее время для обнаружения пожаров используется система мониторинга «Лесной дозор». Она опирается на данные видеонаблюдения для раннего обнаружения лесных пожаров, использует искусственный интеллект для обработки данных. Она базируется на сотовых вышках как источниках связи, так как камеры установлены именно на них [1]. Но из-за этого система становится «тяжелой», появляются слепые зоны, а погодные условия, например туман, снижает эффективность работы принципов, на которых построена система.

Как дополнение к системе могут использоваться альтернативные данные и источники информации для помощи работе системы. Маломощные гидрометеорологические системы стали хорошим дополнение, которое не требует много затрат на внедрение, но помогает уточнить данные и закрыть пробелы.

В данной статье будут описываться существующие маломощные гидрометеорологические IoT-платформы для помощи нахождения лесных пожаров как альтернатива и/или дополнение к уже существующей системе видеомониторинга.

Обзор предметной области. В отличие от традиционных стационарных метеостанций, современные IoT-платформы представляют собой распределённые системы, состоящие из автономных сенсорных узлов, способных осуществлять непрерывный сбор, обработку и передачу данных в режиме реального времени. Такой подход позволяет значительно увеличить пространственное покрытие мониторинга и получать более детализированную информацию о состоянии окружающей среды.

Основу таких систем составляют беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Networks, WSN), в которых нижний уровень (Sensor Nodes) оснащён датчиками температуры, влажности, давления, скорости и направлении ветра и концентрации газов [6]. Эти узлы выполняют первичное измерение параметров среды и формируют поток данных. Передача данных осуществляется через

промежуточный уровень (Forwarding), включающий шлюзы и базовые станции, обеспечивающие передачу информации с использованием энергоэффективных технологий связи, таких как LoRaWAN и NB-IoT, относящихся к классу LPWAN [3]. Применение данных технологий позволяет осуществлять передачу данных на большие расстояния при минимальном энергопотреблении. На верхнем уровне (Cloud) реализуется хранение, обработка и анализ поступающей информации. Данный уровень обеспечивает интеграцию с цифровыми моделями и системами поддержки принятия решений, включая цифровые двойники, что позволяет осуществлять мониторинг и прогнозирование состояния окружающей среды (рисунок 1).

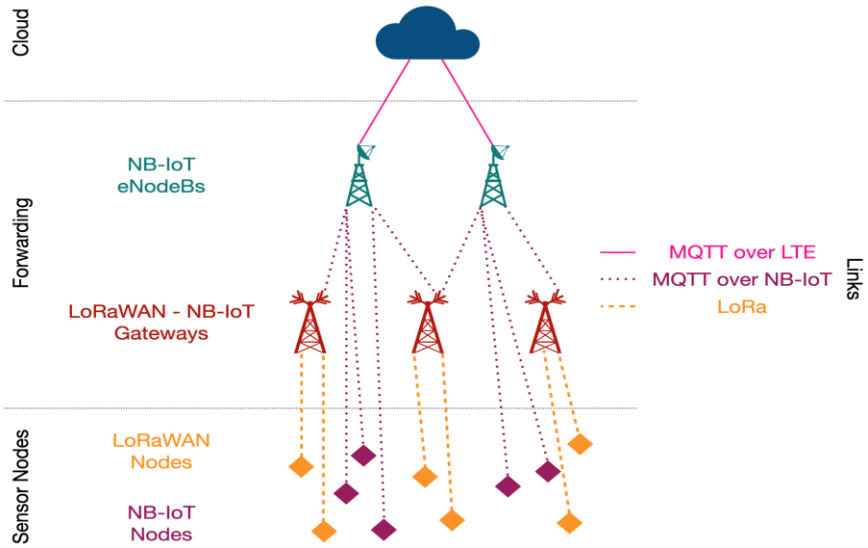


***Рисунок 1**. Архитектура IoT системы*
***Figure 1**. Architecture of IoT system*

Особенностью гидрометеорологических IoT-систем является их эксплуатация в условиях ограниченной инфраструктуры — лесные массивы, горные районы, поймы рек. Это формирует ключевые требования:

- низкое энергопотребление,
- высокая автономность,
- устойчивость к климатическим воздействиям,
- минимальное обслуживание.

Низкое энергопотребление обосновывается выбором беспроводного протокола передачи данных, энергоэффективным компонентам и импульсным режимом работы. Для объективной оценки эффективности была составлена сравнительная таблица [13]:

Таблица 1. Сравнительная таблица технологий IoT
Table 1. IoT technologies comparison chart

Параметр	Технология LoRaWAN	Технология NB-IoT
Ток в режиме сна	Очень низкий (2-5 мкА)	Низкий (5-10 мкА)
Типичный срок службы одной батарейки 3000мАч (при отправке 100 байт/час)	Около 12 лет	Около 10 лет
Эксплуатационные расходы	нет	Низкие – нужна SIM-карта, регулярная плата
Рекомендуемый сценарий	Разреженные леса, удаленные районы	Пригородные леса с покрытием сотовой связи

Основная разница между технологиями LoRaWAN и NB-IoT кроется в механизме организации связи. LoRaWAN использует асинхронный метод, что позволяет оконечным устройствам находиться в режиме глубокого сна до 99% времени с потреблением тока в пределах 2–5 мкА. Пиковый ток при передаче пакета не превышает 32–45 мА. В свою очередь, технология NB-IoT требует синхронизации сотовой сети, что увеличивает базовый ток потребления в режиме ожидания (до 5–12 мкА) и пиковый ток при передаче (до 120–250 мкА). В результате при идентичном графике отправки сообщений (пакет в 100 байт/час) и емкости источника питания в 3000 мАч, прогнозируемый срок службы узла LoRaWAN достигает 12 лет, тогда как для NB-IoT этот показатель составляет около 10 лет [14].

Интеграция с цифровыми двойниками. Дополнительным фактором развития является интеграция IoT-платформ с цифровым двойником (ЦД) [4], что позволяет перейти от статических моделей природных объектов к динамическим системам, функционирующим в режиме реального времени. Это способствует формированию прогноза развития процессов, например, распространение лесных пожаров.

В отсутствии сенсорных данных цифровой двойник представляет собой, по сути, геоинформационную или трёхмерную модель территории, основанную на усреднённых характеристиках и исторических данных. Подключение распределённой сети датчиков обеспечивает непрерывное обновление параметров модели, что трансформирует её в инструмент оперативного анализа и прогнозирования.

Сенсорные узлы IoT-платформ осуществляют сбор гидрометеорологических параметров (температура, влажность, скорость и направление ветра, концентрация газов), которые используются в ЦД для корректировки его состояния, что позволяет учитывать локальные особенности среды, включая микроклимат отдельных участков территории (оврагов, просек, участков с различной плотностью растительности), которые не фиксируются спутниковыми или авиационными средствами наблюдения.

Таблица 2. Сенсоры гидрометеорологических IoT-платформ
Table 2. Sensors of hydrometeorological IoT platforms

Тип сенсора	**Что измеряет**	**Зачем используется**	**Энергопотребление**
Температурный датчик	Температура воздуха	Оценка пожароопасности, перегрев среды	Низкое
Датчик влажности воздуха	Относительная влажность	Определение сухости воздуха (риск возгорания)	Низкое
Датчик давления	Атмосферное давление	Анализ погодных изменений	Низкое
Анемометр	Скорость и направление ветра	Прогноз распространения огня	Среднее
Датчик влажности почвы	Влажность грунта	Оценка горючести растительности	Низкое
Газовый сенсор (CO, CO_2)	Концентрация газов	Раннее обнаружение тления и пожара	Среднее
Датчик дыма	Частицы в воздухе	Обнаружение	Среднее

(PM2.5/PM10)		дыма	
Инфракрасный сенсор	Тепловое излучение	Обнаружение очагов возгорания	Среднее
УФ-датчик	Уровень солнечной радиации	Оценка высыхания среды	Низкое

Ключевая цель — переход от описательного мониторинга к предиктивной аналитике. Вместо того чтобы констатировать факт пожара, система рассчитывает возможные сценарии распространения. На основе текущих метеорологических условий и параметров окружающей среды можно спрогнозировать направление и скорость распространения огня, формируя сценарии развития чрезвычайной ситуации на заданный временной интервал.

Существующие решения. Как ранее уже упоминалось, в России для обнаружения пожаров используется система «Лесной дозор», которая на основе данных с камер видеонаблюдения и технологий компьютерного зрения позволяет обнаружить пожары на лесных массивах в радиусе 20-30 км [1]. Это позволяет обнаруживать пожары на этапе костра. Для питания таких камер они устанавливаются на вышки сотовой связи, позволяя им всегда иметь питание и Интернет для передачи данных на сервер для обработки. Система автоматизирована и может работать без участия человека для проверки информации. Искусственный интеллект обрабатывает изображения и при подозрительном задымлении подает сигнал оператору с точными координатами очага, если это позволяет рельеф. Данная система была разработана как альтернатива регулярному авиапатрулированию, что позволило сделать процесс лесного мониторинга дешевле [2]. Система состоит из программной и аппаратной частей. Система имеет ряд минусов. Зависимость от инфраструктуры – главная сложность при развертывании в условиях глухой тайги. Учитывая такие погодные явления, как туман, плотная облачность, система может “запутаться”. Дополнительная сложность – охват сложного рельефа в зоне видимости камер, из-за чего появляется слепая зона. Алгоритмам системы сложнее анализировать изображения, за дым может быть принята и пыль, и туманность, что приводит к ложным срабатываниям (рисунок 2, 3).

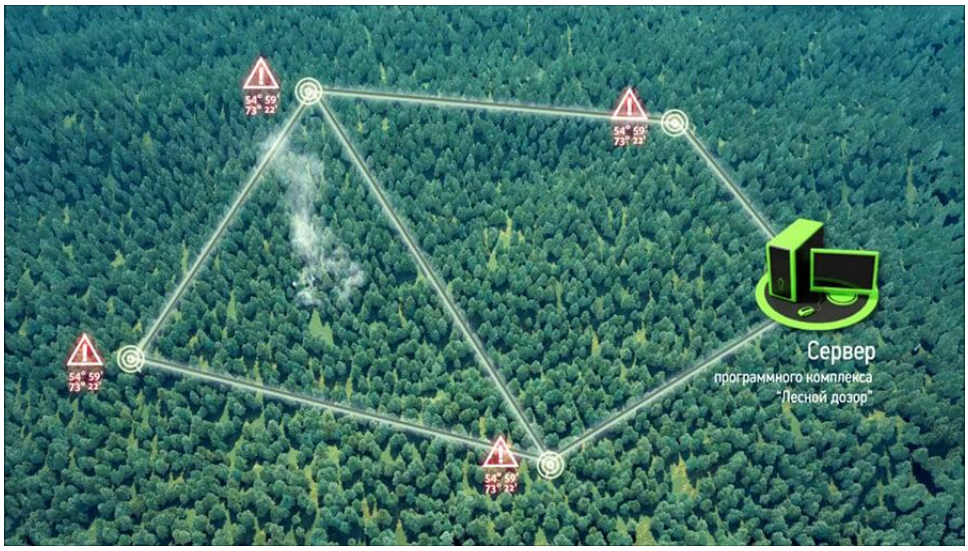


***Рисунок 2**. Программная часть системы «Лесной дозор»*
***Figure 2.** Software part of «Lesnoy Dozor»*

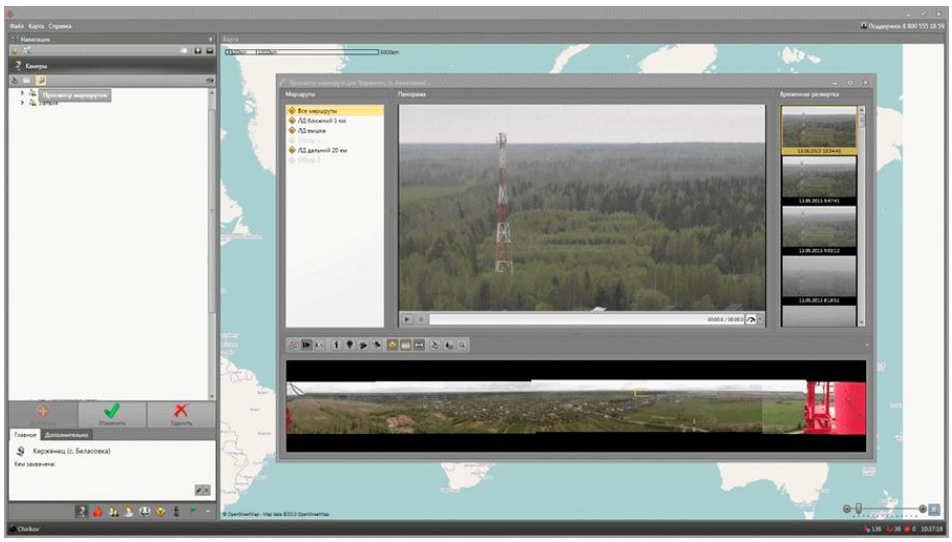


Рисунок 3. *Аппаратная часть системы «Лесной дозор»*
Figure 3. *Hardware part of «Lesnoy Dozor»*

Немецкий стартап Dryad Networks разработал комплексную IoT-систему, предназначенную для сверхраннего обнаружения лесных пожаров и мониторинга здоровья леса – Silvanet. Главная особенность – система обнаруживает возгорания на стадии тления, то есть в первые 60 минут после возникновения. Для этого используются датчики, которые распределены по всему лесному массиву, в которых стоит модуль газоанализа и встроенный модуль ИИ, TinyML, которые на месте распознают специфическую комбинацию газов, а на сервер передает только статус «опасности» [10]. Данные передаются для верификации и визуализации, а не обработки и принятия решений системой. Это позволяет экономить энергию, так как датчик большую часть времени «молчит» и отправляет сигнал только при подозрении на пожар. Анализ данных происходит мгновенно. Алгоритм обучен так, что ложные запахи как выхлопные газы или дым от сигарет не мешают работе системы. При обучении была собрана библиотека «отпечатков», которые по химическому составу газа могут определить степень пожара, что горит (материал), а также радиус источника возгорания. Система имеет функцию прогнозирования распространения, объединяя данные с датчиков с текущими метеорологическими показателями, такими как ветер и влажность, чтобы предсказать, куда двинется огонь. Одного датчика хватает примерно на 1 га леса [9]. Для эффективной работы по лесному массиву вручную ставятся сотни и тысячи датчиков. Несмотря на невысокую стоимость одного датчика, из-за их количества стоимость развертывания становится высокой. Риск повреждения и неизбежность выхода из строя устройств требует периодического аудита сети. Но несмотря на все это система имеет долгий срок службы. Датчики имеют солнечные батареи, что сводит к минимум стоимость их обслуживания, а для передачи данных используется ячеистая сеть типа LoRaWAN [3]. Mesh-шлюзы обеспечивают передачу данных от датчика к датчику внутри леса, помогая покрывать большие площади без прямой видимости. У системы есть приложение на ПК и мобильные устройства, что обеспечивает своевременность получения оповещений об опасности [10] (рисунок 4).

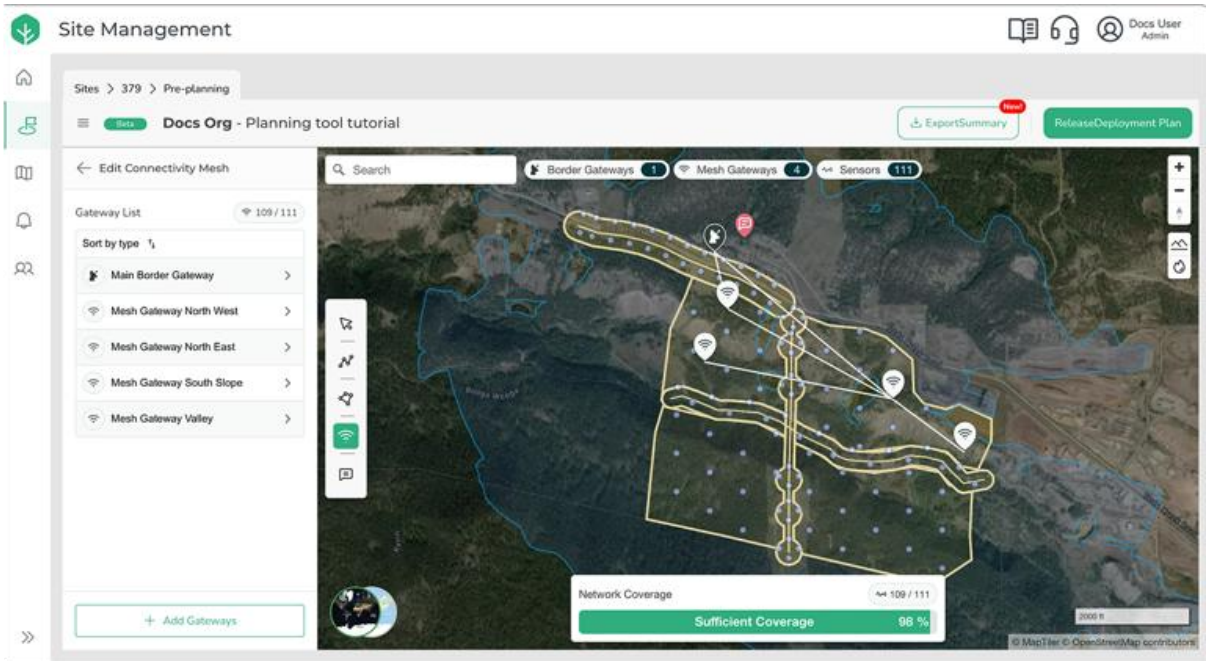


Рисунок 4. Интерфейс программы Silvanet
Figure 4. Interface of Silvanet

IQ Fire-Watch – автоматизированная мультисенсорная система раннего обнаружения лесных пожаров, разработанная IQ Wireless в сотрудничестве с Немецким аэрокосмическим центром (DLR) [9]. Она была разработана как замена традиционным наблюдательным вышкам с людьми. В основе лежат мультиспектральные датчики и искусственный интеллект для обработки данных. Оптический блок вращается на 360 градусов, сканируя местность каждые 5-6 минут. В дневное время система использует данные с монохромного датчика. В ночное – с ближнего инфракрасного диапазона. Для подтверждения данных используется цветная камера видеонаблюдения. Аппаратный комплекс (датчики + камера) устанавливаются на вышки сотовой связи и работают полностью автономно. Тем самым у системы всегда есть питание и связь для передачи данных. Камера и датчики в среднем покрывают территорию в радиусе 20 км, в идеальных условиях радиус доходит до 60 км. Площадь покрытия одним датчиком достигает 125 тысяч гектаров. ИИ в системе работает с сырыми данными без сжатия, позволяя уловить изменения даже в мельчайших пикселях. Отличительная особенность системы – это постоянное использование метеоданных и метод обратной засечки при обнаружении очага. Каждая камера определяет азимут на дым, позволяя сократить погрешность в определении координат очага до 5 метров. Система также использует цифровую модель рельефа. Это значит, что система «знает» высоту каждого оврага и горы, уменьшая количество «слепых» зон на карте. Учитывая весь вышеперечисленный функционал, можно сделать вывод, что стоимость развертывания такой системы очень высокая. Зависимость от сетевой инфраструктуры также делает ее менее гибкой. Но успешные примеры внедрения такой системы говорят об ее актуальности и эффективности. В Португалии заповедник около города Синтра, оба признанные Объектом всемирного наследия ЮНЕСКО, использует систему для обнаружения пожаров [12] (рисунок 5, 6).



Рисунок 5. Система обнаружила пожар
Figure 5. System detected fire

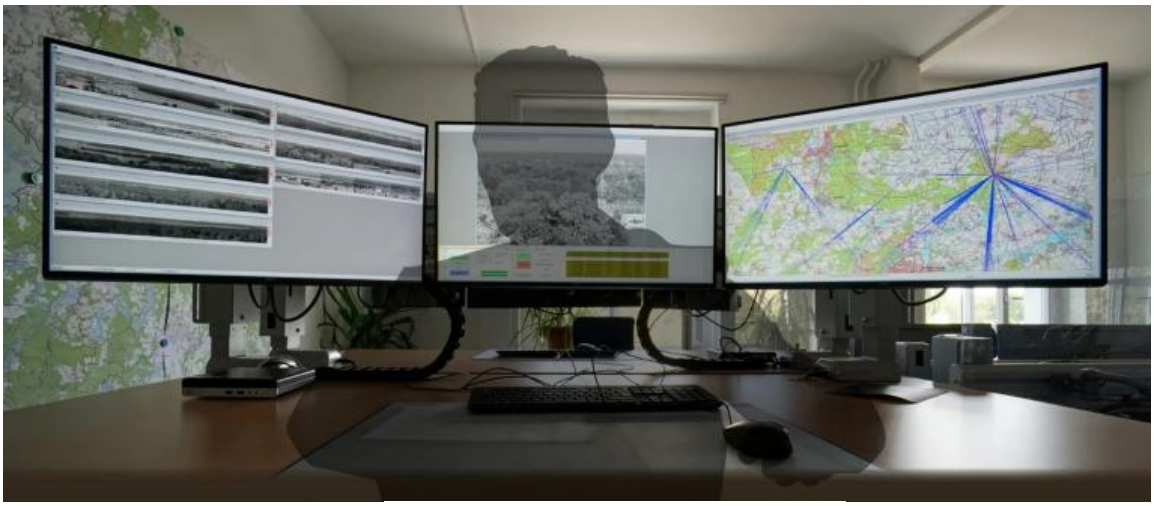


Рисунок 6. Рабочее место оператора
Figure 6. Operator`s workplace

Проблемы и перспективы. Несмотря на быстрый рост технологий, маломощные гидрометеорологические IoT-платформы сталкиваются с рядом серьёзных ограничений.

Основная проблема заключается в энергоснабжении сенсорных узлов. В условиях удалённого размещения замена элементов питания становится сложной и дорогостоящей задачей. При этом возникает компромисс между частотой измерений и сроком службы системы: увеличение частоты сбора и передачи данных приводит к ускоренному расходу энергии и сокращению времени автономной работы [3].

Одно из ограничений представляет собой нестабильность автономных источников энергии, напрямую зависящих от внешних условий, таких как освещённость, погодные факторы, сезонные изменения и затенение, что может приводить к перебоям в работе системы. При проектировании сенсорных систем важно учитывать климатические особенности региона эксплуатации. Например, в условиях средней полосы России, где зимние температуры регулярно опускаются ниже –15 °C, реальная емкость литиевых химических источников тока (например, Li-SOCl2) падает на 30–40% от номинала из-за замедления химических реакций и роста внутреннего сопротивления. Для помощи организации регулярных сервисных работ была составлена математическая модель расчета срока автономной работы датчика T, которая выражается формулой:

$$T = C\ \text{факт} \div (I\ \text{сред} * 8760) \quad (1)$$

где С факт – это реальная емкость батареи с учетом падения, I сред – средний ток потребления устройства, 8760 – количество часов в не високосном году. Например, для расчета срока службы датчика в средней полосе с характерной типичной холодной зимой стоит использовать минимальную границу реальной емкости батареи – для датчика с объемом батареи 3000 мАч емкость падает до 1800 мАч. Из-за импульсивной природы работы датчика он потребляет немного тока – около 0.03 мА. Если устройство отправляет данные один раз в час, а остальное время проводит в режиме сна, то по расчетам такой датчик проработает минимум 6,5 лет. Без учета климатического фактора в виде суровой зимы, расчетный срок службы составил бы 11,5 лет, что привело бы к преждевременному отказу сети в зимний период.

Для улучшения расчета срока службы батареи можно интегрировать более тяжелые модели оценивания энергопотребления узлов беспроводной сети. Из этого следует, что система потребует больших мощностей, что противоречит концепции легковесности маломощных IoT-систем. Учитывая, что все факторы, влияющие на объем батареи, все равно сложно определить и предугадать, небольшая нестабильность – это компромисс, на который приходится идти при развертывании такой системы.

Существенной проблемой остаётся надёжность получаемых данных. Маломощные IoT-платформы часто используют недорогие сенсоры, которые подвержены дрейфу показаний, влиянию внешних факторов и постепенной деградации. В связи с этим возникает необходимость регулярной калибровки и валидации измерений. При этом в ряде исследований отмечается отсутствие единых стандартов оценки точности и долговременной стабильности сенсоров, что усложняет использование таких данных в задачах моделирования и прогнозирования [8].

Дополнительно ограничивается обеспечение устойчивой передачи данных. В сложных природных условиях наблюдаются потери сигнала и снижение качества связи. Кроме того, при увеличении числа сенсорных узлов в сети возникают коллизии передачи данных, особенно в системах, использующих технологию LoRaWAN, что может приводить к задержкам и потере информации [3].

В конце концов, с ростом числа подключённых устройств возникает проблема масштабируемости [3]. Увеличение плотности сенсорной сети приводит к перегрузке каналов связи, а также усложняет управление потоками данных, их обработку и хранение, что требует внедрения дополнительных механизмов фильтрации, агрегации и контроля качества данных.

Перспективы развития технологии. Одним из ключевых направлений развития гидрометеорологических IoT-платформ является расширение функциональности и использование в составе систем цифровых двойников [4]. В этом случае IoT-платформы выступают в роли источника данных для моделей гидрологических и метеорологических процессов, а также для систем управления водными ресурсами и природными территориями. Непрерывное поступление данных с сенсорных узлов позволяет обеспечивать актуализацию моделей в реальном времени и повышать точность прогнозирования.

Перспективно растёт внедрение концепции периферийных вычислений (edge computing), предполагающей перенос части вычислений непосредственно на уровень сенсорных узлов или локальных шлюзов [3]. Такой подход позволяет снизить нагрузку на каналы связи, уменьшить энергопотребление и повысить оперативность реакции системы. На уровне устройств может осуществляться предварительная обработка данных, включая фильтрацию шумов, агрегацию информации и выявление аномалий.

Важную роль играет интеграция IoT с методами ИИ. Использование алгоритмов машинного обучения открывает возможности для прогнозирования гидрометеорологических явлений, а также для восстановления пропущенных данных и повышения качества измерений [7], что особенно актуально в условиях нестабильной связи и ограниченных энергетических ресурсов.

Существенная перспектива заключается в создании полностью автономных систем на основе технологий сбора энергии (energy harvesting) [5]. Использование солнечной энергии, ветра и температурных градиентов позволяет снизить зависимость от батарейных источников питания и увеличить срок эксплуатации устройств. При этом оптимальным решением является применение

комбинированных систем энергоснабжения, обеспечивающих более стабильную работу в различных природных условиях.

Кроме того, дальнейшее развитие IoT-платформ связано с внедрением методов повышения качества данных. К ним относятся алгоритмы фильтрации выбросов, восстановления пропущенных значений и автоматической оценки достоверности измерений [8]. Это особенно важно при использовании недорогих сенсоров, подверженных погрешностям и нестабильности.

Заключение. Таким образом, маломощные гидрометеорологические IoT-платформы представляют собой перспективное направление развития систем экологического мониторинга. Их использование позволяет организовать распределённые сети наблюдений, обеспечивающие сбор данных в реальном времени в условиях ограниченной инфраструктуры.

Интеграция таких платформ с цифровыми двойниками и методами анализа данных способствует переходу от традиционного мониторинга к предиктивным системам, способным не только фиксировать текущее состояние окружающей среды, но и прогнозировать развитие природных процессов. Это особенно важно для задач раннего обнаружения и предотвращения чрезвычайных ситуаций, включая лесные пожары и паводки.

В целом, развитие маломощных IoT-платформ, а также их интеграция с технологиями искусственного интеллекта и автономного энергопитания, создаёт основу для построения интеллектуальных систем управления природными ресурсами и повышения эффективности экологического мониторинга.

В будущем, комбинирование методов из разных систем может помочь в разработке более универсального решения, которое поможет интегрировать разные технологии и использовать опыт конкурентов для создания упрощенных систем для небольших лесных массивов с целью экономии средств на их мониторинг, а для больших – решить проблему с ограниченностью видения и «слепыми» зонами, что особенно важно для предотвращения сильного ущерба от возгораний.

Список использованных источников

1. Документация к системе «Лесной Дозор» [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://lesdozor.ru/ (дата обращения: 28.04.26).
2. Водолажская Ю. В., Сафонова Н. Л., Бирук Р. А., Немченков А. Е. Использование системы видеонаблюдения «Лесной дозор» в Воронежской области // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2014. – №1.
3. Раза У., Суриябандара М., Кулкарни П. Энергосберегающие сети дальнего радиуса действия: обзор // IEEE Communications Surveys & Tutorialsю – 2017. – №19(2).
4. Фуллер А., Фан Ж., Дэй Ч., Барлоу К. Цифровой двойник: технологии, обеспечивающие развитие // IEEE Access. – 2020. – №8.
5. Дельгадо К., Санз Й. М., Блондиа К., Фамэй Дж. Безбатарейные связи LoRaWAN, используемые для урожая: модели и характеристики // IEEE Internet of Things. – 2021. – №8(4).
6. Кузнецов Д.А. Беспроводные сенсорные сети в экологическом мониторинге. — М.: Наука. – 2021.
7. Мираз М., Али М., Эксэлл П., Пикин Р. Обзор Интернета вещей (IoT), Интернета всего (IoE) и Интернета нано-вещей (IoNT). // Internet Technologies and Applications (ITA). – 2015. – №2015.
8. Налахурти Н. и др. Препятствия и возможности при калибровке дешевых экологических датчиков // Sensors. – 2024. – №21(11).
9. Документация к системе IQ FireWatch [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.iq-firewatch.com/ (дата обращения: 26.04.26)
10. Документация к системе Silvanet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docs.dryad.app/dryad-documentation (дата обращения: 26.04.26).
11. Компания Dryad завершила раунд финансирования серии A на сумму 10,5 млн. евро для вывода на мировой рынок технологии сверхраннего обнаружения лесных пожаров [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.dryad.net/post/dryad-closes-10-5m-in-series-a-funding-to-bring-ultra-early-wildfire-detection-to-global-market (дата обращения: 26.04.26).
12. Мафовски Н. Борьба с лесными пожарами [Электронный ресурс] // Отчет Baumer о внедрении. – 2023. Режим доступа: https://media.baumer.com/Baumer_VT-IQwireless-Forest-fire-detection_EN_20210729_AR.pdf (дата обращения: 26.04.26).

13. Таблица протоколов IoT 2025: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT - сравнение, дальность [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://inner.su/articles/tablitsa-protokolov-iot-2025-lorawan-sigfox-nb-iot-sravnenie-dalnost/ (дата обращения: 16.06.26).
14. LoRaWAN против NB-IoT: чем они отличаются и чем сопоставимы? [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mokosmart.com/lorawan-vs-nb-iot-how-do-they-compare-and-differ/ (16.06.26)

References

1. Documentation for the Forest Watch system [Electronic resource]. Access: https://lesdozor.ru/ (accessed on April 28, 2026).
2. Vodolazhskaya Yu. V., Safonova N. L., Biruk R. A., Nemchenkov A. E. Using the Forest Watch video surveillance system in the Voronezh region // Problems of Ensuring Safety in the Elimination of Consequences of Emergencies. - 2014. - No. 1.
3. Raza U., Kulkami P., Sooriyabandara M. Low Power Wide Area Networks: An Overview // IEEE Communications Surveys & Tutorials - 2017. - No. 19 (2).
4. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research // IEEE Access. – 2020. – №8.
5. Delgado C., Sanz J. M., Blondia K., Famaey J. Battery-Less LoRaWAN Communications using Energy Harvesting: Modeling and Characterization // IEEE Internet of Things. – 2021. – №8(4).
6. Kuznetsov D.A. Wireless sensor networks in environmental monitoring. Moscow: Nauka. – 2021.
7. Miraz M., Ali M., Excell P., Picking R. A review on Internet of Things (IoT), Internet of Everything (IoE), and Internet of Nanothings (IoNT). // Internet Technologies and Applications (ITA). – 2015. – №2015.
8. Nalakhurti N. et al. Challenges and Opportunities in Calibrating Low-Cost Environmental Sensors // Sensors. – 2024. – №21 (11).
9. Documentation for the IQ FireWatch system [Electronic resource]. Access mode: https://www.iq-firewatch.com/ (date of access: 04/26/26).
10. Documentation for the Silvanet system [Electronic resource]. Access mode: https://docs.dryad.app/dryad-documentation (accessed: 26.04.26).
11. Dryad Closes €10.5 Million Series A Financing Round to Bring Ultra-Early Wildfire Detection Technology to Global Market [Electronic Resource]. Available at: https://www.dryad.net/post/dryad-closes-10-5m-in-series-a-funding-to-bring-ultra-early-wildfire-detection-to-global-market (Accessed: 26.04.26).
12. Mafovsky N. Forest Fire Fighting [Electronic Resource] // Baumer Implementation Report. – 2023. Available at: https://media.baumer.com/Baumer_VT-IQwireless-Forest-fire-detection_EN_20210729_AR.pdf (Accessed: 26.04.26).
13. IoT Protocol Table 2025: LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT - Comparison, Range [Electronic resource]. Available at: https://inner.su/articles/tablitsa-protokolov-iot-2025-lorawan-sigfox-nb-iot-sravnenie-dalnost/ (date of access: 16.06.26).
14. LoRaWAN vs. NB-IoT: How Are They Different and Compared? [Electronic resource]. Available at: https://www.mokosmart.com/lorawan-vs-nb-iot-how-do-they-compare-and-differ/ (date of access: 16.06.26)

A REVIEW OF LOW-POWER HYDROMETEOROLOGICAL IOT PLATFORMS FOR POWERING DIGITAL TWINS

[1]**Varfolomeeva Amina K.**,
third-year student, Russian State Hydrometeorological University,
Saint Petersburg
Email: azzzigdreams@gmail.com

[1]**Mityushina Svetlana A.,**
third-year student, Russian State Hydrometeorological University,
Saint Petersburg

Email: mityushina.sa@gmail.com

[1]**Safonova Tatyana V.,**
candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Applied Informatics, Russian State Hydrometeorological University,
Saint Petersburg
Email: tatyana.vsafonova@gmail.com

[2]**Mokryak Anna V.,**
researcher, Saint Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations Russia
Saint Petersburg
Email: mokryakanna@mail.ru

© Варфоломеева А.К., Митюшина С.А., Сафонова Т.В., Мокряк А.В., 2026

УДК 528.8:630*43:546.26

[1]Эстер М.В., [2]Фёдоров В. А.

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МОНИТОРИНГ БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ УГЛЕРОДНОГО БАЛАНСА И ПОЖАРНЫХ РИСКОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

[1]Эстер Мария Вадимовна
Общество с ограниченной ответственностью «Центр космических технологий и услуг»
614038, Россия, г. Пермь, ул. Лаврова, 14
ester.maria17@mail.ru

[2]Фёдоров Виктор Аркадьевич
Ассистент кафедры Автоматизации технологических процессов и производств
Высшая школа технологий и энергетики
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна
198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4
fedorovbrook@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены современные подходы к геопространственному мониторингу бореальных лесов в задачах оценки углеродного баланса и пожарных рисков. Выполнен анализ основных компонентов углеродного запаса лесных экосистем, включая надземную и подземную биомассу, мёртвую древесину и почвенный углерод. Рассмотрены существующие методы оценки углеродного запаса, основанные на полевых измерениях, аллометрических моделях и данных дистанционного зондирования Земли. Особое внимание уделено влиянию лесных пожаров на трансформацию углеродного цикла и изменению структуры древостоя. Проведён обзор современных источников пространственных данных, применяемых для мониторинга лесных территорий, а также возможностей их использования при оценке биомассы, последствий пожаров и состояния лесного покрова. Показано, что перспективным направлением развития является интеграция мультисенсорных данных и создание цифровых моделей лесных экосистем, обеспечивающих более детальное описание структуры леса и поддержку принятия решений в области устойчивого лесопользования.

Ключевые слова: бореальные леса, геопространственный мониторинг, углеродный баланс, лесные пожары, дистанционное зондирование Земли, цифровые двойники лесных экосистем.

GEOSPATIAL MONITORING OF BOREAL FORESTS FOR CARBON BALANCE ASSESSMENT AND WILDFIRE RISK EVALUATION: CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS

Abstract. The paper reviews current approaches to geospatial monitoring of boreal forests for carbon balance assessment and wildfire risk evaluation. The main components of forest carbon stocks, including aboveground and belowground biomass, deadwood, and soil carbon, are analysed. Existing methods for carbon stock estimation based on field measurements, allometric models, and remote sensing data are discussed. Particular attention is paid to the impact of wildfires on carbon cycle dynamics and forest stand structure. The study also reviews contemporary sources of spatial data used for forest monitoring and examines their potential for biomass assessment, disturbance detection, and post-fire analysis. The results indicate that the integration of multisensor data and the development of digital forest ecosystem models

represent promising directions for improving the accuracy and completeness of forest monitoring and supporting sustainable forest management decisions.

***Keywords*:** boreal forests, geospatial monitoring, carbon balance, wildfires, remote sensing, digital twins of forest ecosystems.

Введение. Бореальные леса являются крупнейшим наземным биомом планеты и образуют непрерывный лесной пояс, охватывающий северные территории Евразии и Северной Америки. По различным оценкам, на бореальные леса приходится около 30 % мировой площади лесов, при этом более 60 % бореальной лесной зоны сосредоточено на территории Российской Федерации. Российская тайга представляет собой крупнейший массив бореальных лесов мира и играет важнейшую роль в поддержании глобального климатического равновесия, регулировании биогеохимических циклов, сохранении биоразнообразия и формировании значительной части мировых запасов органического углерода. Благодаря огромным площадям и способности аккумулировать углерод в древесной растительности, мертвой органике и лесных почвах бореальные экосистемы рассматриваются как один из ключевых компонентов климатической системы Земли [1].

В последние десятилетия интерес к исследованию бореальных лесов существенно возрос в связи с необходимостью оценки их вклада в глобальный углеродный цикл. Лесные экосистемы одновременно выступают в роли поглотителей атмосферного углекислого газа и потенциальных источников его эмиссии. Накопление углерода происходит за счет процессов фотосинтеза и формирования биомассы, тогда как его высвобождение связано с естественным отмиранием древесной растительности, разложением органического вещества и воздействием различных нарушающих факторов. В связи с этим точность оценки углеродного запаса лесов становится одной из ключевых задач современных экологических и климатических исследований [2].

Одним из наиболее значимых факторов, влияющих на углеродный баланс бореальных лесов, являются природные пожары. В условиях изменения климата во многих регионах мира наблюдается увеличение частоты и интенсивности лесных пожаров, приводящих к существенным потерям биомассы и выбросам углерода в атмосферу. Кроме прямой эмиссии парниковых газов, пожары вызывают долговременные изменения структуры древостоя, породного состава и процессов восстановления лесных экосистем. Углеродный баланс и пожарная динамика бореальных лесов представляют собой тесно взаимосвязанные процессы, требующие комплексного анализа.

Оценка углеродного запаса и пожарных рисков на региональном и глобальном уровнях невозможна без использования современных методов пространственного мониторинга. Традиционные наземные методы обследования лесов обеспечивают высокую точность измерений, однако обладают ограниченной пространственной репрезентативностью и значительными трудозатратами. В связи с этим все большую роль приобретают геоинформационные технологии и данные дистанционного зондирования Земли, позволяющие осуществлять регулярное наблюдение за состоянием лесных экосистем на больших территориях [3].

Современные средства геопространственного мониторинга обеспечивают получение информации о распределении лесного покрова, запасах биомассы, последствиях пожаров и динамике восстановления лесов. Развитие спутниковых систем наблюдения, беспилотных авиационных комплексов, методов аэрофотосъемки и лазерного сканирования создает предпосылки для перехода от локальных оценок к пространственно непрерывным моделям лесных экосистем. Вместе с тем сохраняются существенные проблемы, связанные с неоднородностью исходных данных, различиями пространственного разрешения и необходимостью интеграции информации из различных источников.

Целью настоящей статьи является анализ современного состояния геопространственного мониторинга бореальных лесов в задачах оценки углеродного баланса и пожарных рисков, а также рассмотрение перспективных направлений развития методов пространственного анализа лесных экосистем.

Основные компоненты углеродного баланса бореальных лесов. Углеродный баланс бореальных лесов определяется совокупностью процессов накопления, перераспределения и высвобождения углерода между различными компонентами лесной экосистемы. В отличие от

многих других природных экосистем, бореальные леса характеризуются значительной долей углерода, сосредоточенного не только в живой биомассе, но и в лесной подстилке, мертвой древесине и почвенном органическом веществе. По этой причине оценка углеродного запаса требует комплексного учета нескольких взаимосвязанных пулов углерода, отличающихся как механизмами формирования, так и скоростью обмена с атмосферой [4].



Рисунок 1. Основные компоненты углеродного баланса бореальных лесов
Figure 1. Major Carbon Pools in Boreal Forest Ecosystems

Надземная биомасса традиционно рассматривается как наиболее доступный для количественной оценки компонент углеродного баланса лесных экосистем. В бореальных лесах она представлена древесными стволами, кронами, ветвями и подростом различного возраста. Именно этот компонент является основным объектом лесотаксационных измерений и большинства методов дистанционного мониторинга.

Несмотря на то, что надземная биомасса составляет лишь часть общего углеродного запаса бореальных лесов, ее динамика наиболее тесно связана с процессами роста древостоя, хозяйственной деятельностью и воздействием природных нарушений. В связи с этим оценка надземной биомассы широко используется при расчете углеродного бюджета лесных территорий, а также при построении региональных и глобальных моделей углеродного цикла. Особую роль играет пространственная структура древостоя. Неоднородность вертикального распределения растительности, различия в породном составе и наличие нескольких ярусов лесной растительности могут существенно влиять на точность оценки биомассы, особенно при использовании дистанционных методов наблюдения [5].

Подземная биомасса является одним из наименее изученных компонентов углеродного баланса бореальных лесов. В большинстве исследований ее оценка выполняется не напрямую, а посредством аллометрических зависимостей между надземной и подземной частью древесных растений. В условиях бореальных экосистем вклад корневых систем в общий запас углерода может быть весьма значительным и зависит от породного состава, возраста насаждений, гидрологического режима и характеристик почвы. Однако получение пространственно распределенных данных о подземной биомассе остается сложной задачей, поскольку существующие методы дистанционного мониторинга практически не позволяют выполнять ее непосредственное измерение. По этой причине неопределенность оценки корневой биомассы является одним из существенных источников погрешности при расчете полного углеродного запаса лесных экосистем [6].

Одним из важных компонентов углеродного баланса бореальных лесов также является мертвая древесина, представленная сухостоем, валежником и древесными остатками различной степени разложения. В отличие от живой биомассы данный пул одновременно отражает как процессы накопления углерода в предшествующие периоды развития леса, так и процессы его постепенного возврата в атмосферу. Роль мертвой древесины особенно возрастает после пожаров, ветровалов, вспышек численности вредителей и других нарушений лесных экосистем. В таких условиях объем сухостойной древесины может существенно увеличиваться, оказывая влияние, как

на углеродный баланс, так и на формирование горючих материалов. Для бореальных лесов характерно длительное сохранение мертвой древесины вследствие относительно низких скоростей разложения органического вещества. Это приводит к формированию значительных запасов углерода, которые нередко остаются недостаточно учтенными при проведении инвентаризации лесов [7].

Особенностью бореальных лесов является высокая концентрация углерода в почвах и органических горизонтах. По данным многочисленных исследований, именно почвенный пул содержит большую часть углерода бореальных экосистем, существенно превосходя запасы, аккумулированные в древесной растительности. Накопление углерода в почве связано с замедленными процессами разложения органического вещества в условиях низких температур и сезонного переувлажнения. Значительная часть углерода может сохраняться в лесной подстилке и верхних горизонтах почвы на протяжении длительных временных интервалов. При этом почвенный углерод остается одним из наиболее сложных объектов для пространственного мониторинга. Его распределение определяется комплексом факторов, включающих тип леса, гидрологические условия, рельеф и историю нарушений. В результате даже при наличии детальной информации о структуре древостоя оценка полного углеродного баланса лесных территорий сохраняет существенную неопределенность, связанную именно с характеристиками почвенного покрова [8].

Современные подходы к оценке углеродного запаса. Оценка углеродного запаса лесных экосистем является одной из ключевых задач современных климатических исследований и лесного хозяйства. За последние десятилетия было разработано значительное количество подходов, различающихся как по используемым данным, так и по пространственному масштабу исследований. Несмотря на существенный прогресс в области мониторинга лесов, универсального метода, обеспечивающего одновременно высокую точность, пространственную полноту и экономическую эффективность, до настоящего времени не существует. На практике оценка углеродного запаса обычно основывается на сочетании полевых измерений, аллометрических моделей и различных методов дистанционного наблюдения [9].

Традиционной основой большинства оценок остаются наземные таксационные измерения леса. Проведение инвентаризации на пробных площадях позволяет получать наиболее достоверные сведения о породном составе, диаметрах стволов, высоте деревьев, запасе древесины и состоянии древостоя. Получаемые данные можно использовать как для непосредственного расчета биомассы, так и для калибровки последующих модельных оценок. Однако высокая трудоемкость полевых работ существенно ограничивает возможность их применения на больших территориях. Для бореальных лесов, характеризующихся значительной протяженностью и труднодоступностью многих участков, проведение детальных наземных обследований требует значительных временных и финансовых затрат. Кроме того, данные отдельных пробных площадей не всегда позволяют корректно описывать пространственную неоднородность лесного покрова, что становится особенно заметным при переходе от локальных исследований к региональным оценкам углеродного баланса.

Невозможность непосредственного измерения биомассы на больших территориях широкое распространение получили аллометрические методы оценки. Их основой является использование статистических зависимостей между легко измеряемыми таксационными характеристиками и биомассой деревьев. Наиболее часто в качестве независимых переменных используют диаметр ствола, высоту дерева, возраст насаждений и показатели полноты древостоя. Аллометрические модели позволяют существенно сократить объем полевых работ и обеспечивают возможность перехода от измеряемых параметров к оценке углеродного запаса. Вместе с тем точность таких моделей во многом определяется особенностями исследуемого региона, породным составом и возрастной структурой лесов. Использование универсальных зависимостей нередко приводит к накоплению систематических ошибок, особенно при анализе сложных многопородных бореальных насаждений. Дополнительные неопределенности возникают при оценке подземной биомассы, для которой прямые измерения практически отсутствуют, а расчеты выполняются преимущественно на основе эмпирических коэффициентов.

На практике для оценки биомассы древесной растительности широко используются степенные аллометрические зависимости. Одной из наиболее распространенных является модель:

$$B = aD^b \quad (1)$$

где (B) – биомасса дерева, (D) – диаметр на высоте груди (DBH), а (a) и (b) – эмпирические коэффициенты, определяемые для конкретной древесной породы и региона произрастания. Для повышения точности оценки часто используют двухфакторную модель с высотой:

$$B = aD^b H^c \quad (2)$$

где (H) – высота дерева, а (c) – дополнительный коэффициент, учитывающий влияние вертикального развития древостоя. В ряде современных исследований используются логарифмические формы аллометрических зависимостей:

$$\ln(B) = a + b\ln(D) \quad (3)$$

либо

$$\ln(B) = a + b\ln(D) + c\ln(H) \quad (4)$$

Это позволяет снизить влияние гетероскедатичности исходных данных и повысить устойчивость статистических оценок. Полученные значения биомассы затем переводятся в углеродный эквивалент с использованием коэффициентов содержания углерода в древесной массе, которые для большинства древесных пород находятся в диапазоне 0,45-0,50 от сухой биомассы [10].

Также большое развитие приобретают методы дистанционного мониторинга, позволяющие получать информацию о лесных экосистемах на региональном и глобальном уровнях. Использование спутниковых данных, аэрофотосъемки и активных методов дистанционного зондирования существенно расширило возможности оценки пространственного распределения биомассы и углеродного запаса. Современные исследования все чаще основываются на интеграции полевых измерений с дистанционными наблюдениями, что позволяет сочетать высокую точность наземных данных с пространственной полнотой дистанционного мониторинга. Подобные подходы активно используются при создании национальных и международных систем учета углерода, а также при подготовке климатической отчетности в рамках глобальных программ мониторинга окружающей среды.

Несмотря на значительное развитие методов оценки углеродного запаса, сохраняется ряд фундаментальных ограничений, связанных с неоднородностью структуры лесов, различиями пространственного разрешения исходных данных и сложностью учета отдельных компонентов углеродного пула. Особенно остро данные проблемы проявляются в бореальных экосистемах, для которых характерны многоярусная структура древостоя, значительные объемы мертвой древесины и высокая пространственная изменчивость лесных сообществ. В результате даже современные методы оценки углеродного запаса требуют дальнейшего совершенствования и разработки новых подходов, обеспечивающих более детальное описание структуры лесных экосистем и процессов накопления углерода [11].

Пожары как фактор трансформации углеродного цикла бореальных лесов. Углеродный баланс бореальных лесов определяется не только скоростью накопления биомассы, но и частотой нарушений, приводящих к ее утрате. Среди всех природных факторов именно лесные пожары оказывают наиболее масштабное воздействие на углеродные пулы бореальных экосистем. В отличие от процессов естественного отмирания и разложения древесины, протекающих на протяжении десятилетий, пожар способен за короткий промежуток времени перераспределить значительную часть накопленного углерода между атмосферой, растительным покровом и почвой. Поэтому при оценке углеродного баланса бореальных лесов пожары рассматриваются не как внешнее воздействие, а как один из ключевых механизмов функциональной экосистемы [12].

Воздействие пожаров на углеродный цикл носит многоуровневый характер и не ограничивается прямой эмиссией углерода в атмосферу. В процессе горения происходит частичная или полная потеря надземной биомассы, изменение запасов мертвой древесины, повреждение органического слоя почвы и нарушение существующих потоков углерода между компонентами экосистемы. При этом масштабы потерь определяются не только площадью пожара, но и структурой древостоя, запасом горючих материалов, породным составом насаждений и степенью повреждения почвенного покрова. Для бореальных лесов особое значение имеет способность пожаров затрагивать подстилку и верхние горизонты почвы, содержащие значительные объемы органического углерода, накопленного в результате замедленных процессов разложения [13].

Не менее важными являются долгосрочные последствия пожаров, связанные с перестройкой структуры лесных экосистем. После прохождения огня изменяются возрастная структура древостоя, пространственное распределение древесной растительности и соотношение пород. В зависимости от интенсивности воздействия возможно, как восстановление исходного типа леса, так и формирование новых сукцессионных траекторий развития. Подобные изменения напрямую влияют на скорость накопления биомассы и способность экосистемы компенсировать потери углерода, возникшие в результате пожара [14].

С точки зрения оценки углеродного баланса особый интерес представляет динамика сухостойной древесины. После пожаров значительная часть погибших растений не переходит мгновенно в атмосферный углерод, а формирует резервуар мертвой древесины. Одновременно сухостой увеличивает объем доступного топлива и способен оказывать влияние на вероятность возникновения повторных пожаров, формируя положительную обратную связь между углеродным циклом и пожарным режимом территории [15]. Последствия пожаров затрагивают все основные компоненты углеродного пула бореальных лесов и характеризуются выраженной пространственной неоднородностью. Даже в пределах одного пожара степень повреждения древостоя, объем сохранившейся биомассы, и скорость восстановления растительности могут существенно различаться. В связи с этим задачи оценки углеродного баланса и анализа пожарных рисков все в большей степени начинают опираться на методы пространственного мониторинга, обеспечивая получение информации о состоянии лесных экосистем на различных уровнях детализации.

Источники пространственных данных для мониторинга лесов. Развитие методов оценки углеродного баланса и пожарных рисков в бореальных лесах тесно связано с расширением спектра доступных пространственных данных. Современные системы мониторинга лесных экосистем формируются на основе интеграции наблюдений различного пространственного и временного масштаба. Начиная от глобальных спутниковых миссий и заканчивая высокодетальными локальными съемками. Выбор источника данных определяется не только требуемой точностью оценки, но и характером исследуемых процессов, поскольку различные методы наблюдения позволяют описывать различные компоненты лесной экосистемы.

Наиболее продолжительную историю применения в задачах лесного мониторинга имеют спутниковые данные дистанционного зондирования земли. Начиная с запуска программы Landsat в 1970-х годах появилась возможность регулярного наблюдения за состоянием лесного покрова на региональном и глобальном уровнях. Современные спутниковые системы обеспечивают многолетние временные ряды наблюдений, позволяющие анализировать динамику лесов, выявлять последствия пожаров, отслеживать изменения продуктивности растительности и оценивать долгосрочные тенденции развития экосистем. Ключевым преимуществом спутниковых данных является возможность систематического охвата огромных территорий, что особенно важно для бореальных лесов, значительная часть которых расположена в труднодоступных районах Сибири, Канады, Аляски. Вместе с тем пространственное разрешение большинства спутниковых продуктов ограничивает возможность исследования внутренней структуры древостоя и отдельных элементов лесного покрова [16].

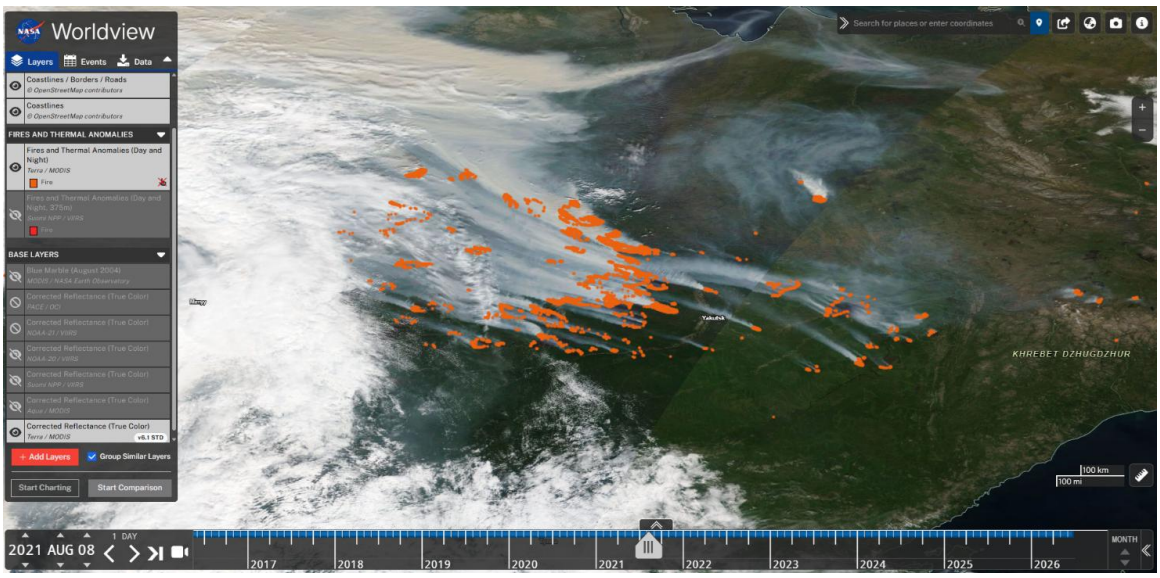


Рисунок 2. Пример спутникового мониторинга лесных пожаров на территории Республики Саха (Якутия) по данным сервиса NASA Worldview (08.08.2021)

Figure 2. Example of satellite-based wildfire monitoring in the Republic of Sakha (Yakutia) using NASA Worldview data (08.08.2021)

На рисунке 2 представлен пример использования спутниковых данных для мониторинга лесных пожаров на территории Республики Саха (Якутия) в период экстремального пожароопасного сезона 2021 года. Оранжевым цветом отображены термические аномалии (активные очаги горения), зарегистрированные спутниковыми системами MODIS и VIIRS, а также хорошо различим протяженный дымовой шлейф, распространяющийся на сотни километров от зоны пожара. Подобные данные позволяют в оперативном режиме отслеживать пространственное распределение пожаров, оценивать масштабы задымления территорий и анализировать динамику распространения огня на региональном уровне [17].

Более детальное описание лесных экосистем обеспечивают данные аэрофотосъемки. Благодаря высокому пространственному разрешению аэроснимки позволяют анализировать структуру древесного полога, породный состав насаждений и последствия различных нарушений лесного покрова. В последние годы аэрофотосъемка все чаще используется в качестве промежуточного уровня наблюдений между спутниковым мониторингом и наземными обследованиями. Особое значение приобретают многоспектральные и гиперспектральные данные, расширяющие возможности анализа физиологического состояния растительности и выявления стрессовых изменений лесных экосистем.

Заметную роль в современных системах лесного мониторинга играют беспилотные авиационные комплексы. Их использование позволяет оперативно получать данные сверхвысокого пространственного разрешения на ограниченных территориях, включая участки, пострадавшие от пожаров, ветровалов или вспышек численности вредителей. В отличие от традиционной пилотируемой аэрофотосъемки, беспилотные платформы обеспечивают высокую гибкость проведения наблюдений и возможность многократного повторения съемок в течение коротких временных интервалов. По этой причине БПЛА все чаще применяются для локального мониторинга динамических процессов, требующих оперативного обновления пространственной информации.

Отдельное место среди современных источников пространственных данных занимают методы лазерного сканирования. В отличие от пассивных оптических систем, лидарные технологии позволяют получать непосредственную информацию о трехмерной структуре лесного покрова. Это обеспечивает возможность анализа вертикального распределения растительности, оценки высотных характеристик древостоя и изучения пространственной организации лесных сообществ. Развитие воздушного, мобильного и наземного лазерного сканирования существенно расширило возможности исследования бореальных лесов и позволило перейти от описания двумерного лесного покрова к анализу пространственной структуре древостоя.

Следует отметить, что ни один из существующих источников данных не обеспечивает полного описания всех компонентов лесной экосистемы. По этой причине современный геопространственный мониторинг все чаще основывается на интеграции разнородных данных, объединяющих преимущества различных методов наблюдения. Такой подход позволяет получать более полное представление о состоянии лесов и формирует основу для решения задач оценки углеродного баланса и анализа пожарных рисков.

Возможности геопространственного мониторинга при оценке углеродного баланса и пожарных рисков. Ключевым преимуществом геопространственного мониторинга является возможности перехода от точечных измерений к пространственно непрерывным оценкам характеристик лесных экосистем. Если традиционная таксация предоставляет информацию о состоянии отдельных пробных площадей, то современные методы пространственного анализа позволяют формировать карты лесных параметров для территорий от нескольких гектаров до миллионов квадратных километров с единым набором показателей и сопоставимой методикой расчета.

Одним из наиболее распространенных направлений является пространственное картографирование запасов биомассы. В международных проектах оценки углеродного цикла биомасса рассматривается как основной показатель углеродного запаса, поскольку около 45-50 % сухой древесной массы составляет углерод. В результате современные карты надземной биомассы используются не только для инвентаризации лесов, но и для расчета национальных углеродных бюджетов, подготовки климатической отчетности и оценке способности экосистем компенсировать антропогенные выбросы парниковых газов. При этом для бореальных лесов особую сложность представляет высокая пространственная неоднородность запасов древесины, обусловленная возрастной структурой насаждений, породным составом и последствиями природных нарушений [4].

Не менее важным направлением является мониторинг изменений лесного покрова. В отличие от классической задачи определения площади лесов современные подходы ориентированы на выявление пространственной динамики древостоя и количественную оценку изменений лесной структуры. Для задач углеродного мониторинга принципиальное значение имеет не столько сам факт нарушения лесного покрова, сколько оценка объема биомассы, потерянной в результате данного нарушения. Именно поэтому все большее внимание уделяется анализу структурных характеристик древостоя, непосредственно связанных с запасов углерода.

Особое место занимает оценка последствий лесных пожаров. Современные методы пространственного анализа позволяют определять не только контуры гарей, но и степень повреждения древостоя, пространственное распределение выгоревшей биомассы и динамику восстановления лесного покрова. Для бореальных лесов это особенно важно, поскольку один и тот же пожар может приводить к принципиально различным последствиям в зависимости от типа леса, возраста насаждений и накопленного запаса горючих материалов. В результате все чаще объектом анализа становятся не площади пожаров как таковые, а изменение структуры лесных экосистем до и после воздействия огня.

Наиболее сложным и одновременно наиболее перспективным направлением является создание пространственно явных моделей лесных экосистем. Если раньше подходы оперировали усредненными характеристиками древостоя на уровне выделов или пикселей, то современные исследования все чаще ориентированы на представление леса как совокупности индивидуальных деревьев, обладающих собственным пространственными координатами и таксационными характеристиками. Подобный подход позволяет моделировать вертикальную структуру древостоя, оценивать распределение биомассы по ярусам, учитывать наличие сухостойных деревьев и анализировать пространственную организацию горючих материалов. Именно данное направление сегодня рассматривается как одно из наиболее перспективных для совместного решения задач углеродного мониторинга и оценки пожарных рисков.

Перспективы развития методов пространственного мониторинга бореальных лесов. Несмотря на значительный прогресс в области дистанционного мониторинга лесных экосистем, одной из ключевых проблем остается разобщенность используемых данных и методов анализа. Спутниковые наблюдения обеспечивают регулярное покрытие больших территорий, аэрофотосъемка позволяет детализировать породный состав и состояние полога, лазерное сканирование предоставляет информацию о пространственной структуре древостоя, а наземные измерения

сохраняют роль источника эталонных данных. Однако в большинстве случаев указанные источники рассматриваются независимо друг от друга, что ограничивает возможность комплексного анализа лесных экосистем. В связи с этим одним из наиболее перспективных направлений развития является интеграция мультисенсорных данных в рамках единой пространственной модели леса.

Особый интерес представляет переход от описания лесных участков усредненными таксационными показателями к формированию пространственно явных баз данных отдельных деревьев. В рамках такого подхода каждое дерево рассматривается как самостоятельный объект наблюдения, характеризующийся координатами, породой, высотой, диаметром, объемом биомассы, санитарным состоянием и другими параметрами. Формирование подобных массивов данных открывает принципиально новые возможности для исследования динамики лесных экосистем, поскольку позволяет анализировать изменение не только на уровне древостоя в целом, но и на уровне отдельных деревьев.

Развитие технологий лазерного сканирования и методов пространственного моделирования постепенно создает предпосылки для формирования цифровых двойников лесных экосистем. Под цифровым двойником в данном случае понимается динамическая пространственная модель леса, отражающая текущее состояние древостоя и способная обновляться по мере поступления новых данных наблюдений. В отличие от традиционных лесотаксационных баз, данных цифровой двойник позволяет учитывать пространственные взаимосвязи между деревьями, вертикальную структуру насаждений и изменения, происходящие в результате роста, усыхания, воздействия вредителей или пожаров.

Особую ценность подобные модели приобретают в задачах оценки углеродного баланса и пожарных рисков. Наличие пространственной информации об индивидуальных деревьях позволяет перейти от усредненных оценок биомассы к более детальному анализу распределения углеродных запасов в пределах лесного участка. Одновременно появляется возможность учитывать пространственное распределение сухостоя, вертикальную структуру древостоя и особенности размещения горючих материалов, оказывающие непосредственное влияние на вероятность возникновения и распространения пожаров.

Дополнительные перспективы связаны с использованием цифровых моделей леса в качестве экспериментальной среды для проведения вычислительных исследований. Наличие пространственно реалистичных моделей древостоя позволяет формировать синтетические лесные участки, воспроизводящие характеристики реальных экосистем, и использовать их для моделирования различных сценариев развития. В частности, подобные модели могут применяться для оценки последствий лесных пожаров, анализа распространения повреждений от вредителей, исследования влияния климатических изменений на динамику биомассы и оценки эффективности различных лесохозяйственных мероприятий. Возможность многократного воспроизведения подобных сценариев создает предпосылки для перехода от ретроспективного анализа к прогнозированию состояния лесных экосистем.

Заключение. Бореальные леса являются одним из крупнейших резервуаров углерода и одновременно относятся к экосистемам, наиболее чувствительным к воздействию природных и антропогенных факторов. Изменение структуры древостоя, лесные пожары, процессы усыхания и деградации растительности оказывают существенное влияние на углеродный баланс территорий, что определяет необходимость регулярного мониторинга состояния лесных экосистем на различных пространственных уровнях.

Проведенный анализ показал, что современные методы дистанционного зондирования и геопространственного мониторинга обеспечивают широкие возможности для оценки запасов биомассы, анализа динамики лесного покрова и исследований пожаров. При этом ни один из существующих источников данных не позволяет в полной мере описать все компоненты лесной экосистемы, что обусловливает необходимость комплексного использования спутниковых наблюдений, аэрофотосъемки, беспилотных платформ и технологий лазерного сканирования.

Особый интерес для задач углеродного мониторинга и оценки пожарных рисков представляет переход от усредненных характеристик насаждений к пространственно явным моделям леса, учитывающим структуру древостоя и параметры отдельных деревьев. Подобный подход позволяет более детально анализировать распределение биомассы, оценивать пространственную

неоднородность лесных экосистем и учитывать факторы, определяющие устойчивость лесов к различным видам нарушений.

Дальнейшее развитие пространственного мониторинга бореальных лесов связано не столько с появлением новых источников данных, сколько с их интеграцией в единую информационную среду, обеспечивающую непрерывное описание структуры леса на уровне отдельных деревьев. Формирование цифровых двойников лесных экосистем может стать основой нового поколения геоинформационных систем, ориентированных на задачи углеродного мониторинга, оценки пожарной опасности и поддержки принятия решений в области устойчивого управления лесными ресурсами.

Список использованных источников

1. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change // Science. – 2015. – Vol. 349, No. 6250. – P. 819–822. – DOI: 10.1126/science.aaa9092.
2. Huang S., Li Y., Xue S., et al. Progress in forest carbon dynamics under global forest disturbance trend // Ecological Frontiers. – 2025. – Vol. 45, Issue 4. – P. 781–793. – DOI: 10.1016/j.ecofro.2025.01.013.
3. Хвостиков С.А., Барталев С.А., Ворушилов И.И., Егоров В.А., Ховратович Т.С. Подход вычисления неопределенности спутниковых оценок запаса углерода лесов и других их характеристик на основе подхода вариации обучающей выборки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: материалы 22-й Международной конференции. – Москва: ИКИ РАН, 2024.
4. Strîmbu V.F., Næsset E., Ørka H.O., Liski J., Petersson H., Gobakken T. Estimating biomass and soil carbon change at the level of forest stands using repeated forest surveys assisted by airborne laser scanner data // Carbon Balance and Management. – 2023. – Vol. 18. – Article 10. – DOI: 10.1186/s13021-023-00222-4.
5. Gavrikov V.L., Sharafutdinov R.A., Knorre A.A., Pakharkova N.V., Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N., Borisova I.V., Erunova M.G., Khlebopros R.G. How much carbon can the Siberian boreal taiga store: a case study of partitioning among the above-ground and soil pools // Journal of Forestry Research. – 2016. – Vol. 27, No. 4. – P. 907–912. – DOI: 10.1007/s11676-015-0189-7.
6. Xing D., Bergeron C., Solarik K.A., Tomm B., Macdonald S.E., Spence J.R., He F. Challenges in estimating forest biomass: use of allometric equations for three boreal tree species // Canadian Journal of Forest Research. – 2019. – Vol. 49. – P. 1–12.
7. Krankina O.N., Harmon M.E. Dynamics of the dead wood carbon pool in northwestern Russian boreal forests // Water, Air, and Soil Pollution. – 1995. – Vol. 82, No. 1–2. – P. 227–238. – DOI: 10.1007/BF01182836.
8. Ågren A.M., Hjältén J., Egnell G., et al. Soil moisture controls the partitioning of carbon stocks across a managed boreal forest landscape // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Article 14909. – DOI: 10.1038/s41598-023-42091-4.
9. Liang X., Yu S., Meng B., Wang X., Yang C., Shi C., Ding J. Multi-Source Remote Sensing and GIS for Forest Carbon Monitoring Toward Carbon Neutrality // Forests. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 971. – DOI: 10.3390/f16060971.
10. Демаков Ю.П., Пуряев А.С., Черных В.Л., Черных Л.В. Использование аллометрических зависимостей для оценки фитомассы различных фракций деревьев и моделирования их динамики // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 2. – С. 5–20.
11. Liu P., Ren C., Yang X., Wang Z., Jia M., Zhao C., Yu W., Ren H. Combining Sentinel-2 and diverse environmental data largely improved aboveground biomass estimation in China's boreal forests // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article number 27528. – DOI: 10.1038/s41598-024-78615-9.
12. Xu Y., Zhuang Q., Zhao B., Billmire M., Cook C., Graham J., French N.H.F., Prinn R. Impacts of wildfires on boreal forest ecosystem carbon dynamics from 1986 to 2020 // Environmental Research Letters. – 2024. – Vol. 19, No. 6. – P. 064023. – DOI: 10.1088/1748-9326/ad489a.
13. Delcourt C.J.F., Rogers B.M., Akhmetzyanov L., Izbicki B., Scholten R.C., Shestakova T.A., van Wees D., Mack M.C., Sass-Klaassen U., Veraverbeke S. Carbon Emissions From Fires in Eastern Siberian Larch Forests // Global Change Biology. – 2025. – Vol. 31, No. 5. – P. e70247. – DOI: 10.1111/gcb.70247.

14. Walker X.J., Mack M.C., Black B., Dean J., Kemper L.F., Potter S., Rogers B.M., Truettner C.M. Increasing wildfire frequency decreases carbon storage and leads to regeneration failure in Alaskan boreal forests // Fire Ecology. – 2025. – Vol. 21. – Article 57. – DOI: 10.1186/s42408-025-00390-3.
15. Mukhortova L., Krivobokov L., Schepaschenko D. Postfire dynamics of standing dead tree stock in northern boreal forests // BIO Web of Conferences. – 2022. – Vol. 43. – P. 00038. – DOI: 10.1051/bioconf/20224300038.
16. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M.J., Wulder M.A., Froese R.E., White J.C. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 40, No. 5. – P. 362–384. – DOI: 10.1080/07038992.2014.987376.
17. Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., et al. Monitoring forest fires and their consequences using MODIS spectroradiometer data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Saint Petersburg, 26–27 марта 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – Vol. 507. – P. 012019. – DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012019. – EDN: RVCLEX.

References

1. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change // Science. – 2015. – Vol. 349, No. 6250. – P. 819–822. – DOI: 10.1126/science.aaa9092.
2. Huang S., Li Y., Xue S., et al. Progress in forest carbon dynamics under global forest disturbance trend // Ecological Frontiers. – 2025. – Vol. 45, Issue 4. – P. 781–793. – DOI: 10.1016/j.ecofro.2025.01.013.
3. Khvostikov S.A., Bartalev S.A., Vorushilov I.I., Egorov V.A., Khovratovich T.S. Podkhod vychisleniya neopredelennosti sputnikovykh otsenok zapasa ugleroda lesov i drugikh ikh kharakteristik na osnove podkhoda variatsii obuchayushchey vyborki [Approach to estimating uncertainty of satellite-based forest carbon stock assessments and other forest characteristics using training sample variation] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa: materialy 22-y Mezhdunarodnoy konferentsii [Modern problems of Earth remote sensing from space: proceedings of the 22nd International Conference]. – Moscow: IKI RAN, 2024.
4. Strîmbu V.F., Næsset E., Ørka H.O., Liski J., Petersson H., Gobakken T. Estimating biomass and soil carbon change at the level of forest stands using repeated forest surveys assisted by airborne laser scanner data // Carbon Balance and Management. – 2023. – Vol. 18. – Article 10. – DOI: 10.1186/s13021-023-00222-4.
5. Gavrikov V.L., Sharafutdinov R.A., Knorre A.A., Pakharkova N.V., Shabalina O.M., Bezkorovaynaya I.N., Borisova I.V., Erunova M.G., Khlebopros R.G. How much carbon can the Siberian boreal taiga store: a case study of partitioning among the above-ground and soil pools // Journal of Forestry Research. – 2016. – Vol. 27, No. 4. – P. 907–912. – DOI: 10.1007/s11676-015-0189-7.
6. Xing D., Bergeron C., Solarik K.A., Tomm B., Macdonald S.E., Spence J.R., He F. Challenges in estimating forest biomass: use of allometric equations for three boreal tree species // Canadian Journal of Forest Research. – 2019. – Vol. 49. – P. 1–12.
7. Krankina O.N., Harmon M.E. Dynamics of the dead wood carbon pool in northwestern Russian boreal forests // Water, Air, and Soil Pollution. – 1995. – Vol. 82, No. 1–2. – P. 227–238. – DOI: 10.1007/BF01182836.
8. Ågren A.M., Hjältén J., Egnell G., et al. Soil moisture controls the partitioning of carbon stocks across a managed boreal forest landscape // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – Article 14909. – DOI: 10.1038/s41598-023-42091-4.
9. Liang X., Yu S., Meng B., Wang X., Yang C., Shi C., Ding J. Multi-Source Remote Sensing and GIS for Forest Carbon Monitoring Toward Carbon Neutrality // Forests. – 2025. – Vol. 16, No. 6. – P. 971. – DOI: 10.3390/f16060971.
10. Demakov Yu.P., Puryaev A.S., Chernykh V.L., Chernykh L.V. Ispol'zovanie allometricheskikh zavisimostey dlya otsenki fitomassy razlichnykh fraktsiy derev'ev i modelirovaniya ikh dinamiki [Using allometric relationships to estimate phytomass of various tree fractions and model their dynamics] // Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Forest. Ecology. Nature Management]. – 2015. – No. 2. – P. 5–20.

11. Liu P., Ren C., Yang X., Wang Z., Jia M., Zhao C., Yu W., Ren H. Combining Sentinel-2 and diverse environmental data largely improved aboveground biomass estimation in China's boreal forests // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. – Article number 27528. – DOI: 10.1038/s41598-024-78615-9.
12. Xu Y., Zhuang Q., Zhao B., Billmire M., Cook C., Graham J., French N.H.F., Prinn R. Impacts of wildfires on boreal forest ecosystem carbon dynamics from 1986 to 2020 // Environmental Research Letters. – 2024. – Vol. 19, No. 6. – P. 064023. – DOI: 10.1088/1748-9326/ad489a.
13. Delcourt C.J.F., Rogers B.M., Akhmetzyanov L., Izbicki B., Scholten R.C., Shestakova T.A., van Wees D., Mack M.C., Sass-Klaassen U., Veraverbeke S. Carbon Emissions From Fires in Eastern Siberian Larch Forests // Global Change Biology. – 2025. – Vol. 31, No. 5. – P. e70247. – DOI: 10.1111/gcb.70247.
14. Walker X.J., Mack M.C., Black B., Dean J., Kemper L.F., Potter S., Rogers B.M., Truettner C.M. Increasing wildfire frequency decreases carbon storage and leads to regeneration failure in Alaskan boreal forests // Fire Ecology. – 2025. – Vol. 21. – Article 57. – DOI: 10.1186/s42408-025-00390-3.
15. Mukhortova L., Krivobokov L., Schepaschenko D. Postfire dynamics of standing dead tree stock in northern boreal forests // BIO Web of Conferences. – 2022. – Vol. 43. – P. 00038. – DOI: 10.1051/bioconf/20224300038.
16. Banskota A., Kayastha N., Falkowski M.J., Wulder M.A., Froese R.E., White J.C. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review // Canadian Journal of Remote Sensing. – 2014. – Vol. 40, No. 5. – P. 362–384. – DOI: 10.1080/07038992.2014.987376.
17. Martyn I., Petrov Y., Stepanov S., et al. Monitoring forest fires and their consequences using MODIS spectroradiometer data // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – Saint Petersburg, March 26–27, 2020. – Saint Petersburg, 2020. – Vol. 507. – P. 012019. – DOI: 10.1088/1755-1315/507/1/012019. – EDN: RVCLEX.

GEOSPATIAL MONITORING OF BOREAL FORESTS FOR CARBON BALANCE ASSESSMENT AND WILDFIRE RISK EVALUATION: CURRENT STATE AND FUTURE PROSPECTS

Ester Maria Vadimovna
Limited Liability Company "Center for Space Technologies and Services"
14 Lavrova St., Perm, 614038, Russia
ester.maria17@mail.ru

Fedorov Viktor Arkadyevich
Assistant Professor, Department of Automation of Technological Processes and Production
Higher School of Technology and Energy
Saint Petersburg State University of Industrial Technology and Design
198095, Russia, Saint Petersburg, Ivana Chernykh St., 4
fedorovbrook@gmail.com

© Эстер М.В., Федоров В.А., 2026

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

SECTION SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT, INFORMATION PROCESSING AND STATISTICS

УДК 658.5

[1]**Седин Л.И**

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ФУНКЦИИ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ

[1]**Седин Лев Игоревич**
Аспирант 2 курса ФПТИ
Кафедра инноватики и интегрированных систем качества ФГАОУ ВО ГУАП
г. Санкт-Петербург
E-mail: leo.sedin@gmail.com

***Аннотация*.** В статье рассмотрен процесс согласования технико-конструкторской документации как ключевой элемент технической подготовки производства, определяющий качество и сроки выпуска изделий машиностроения. Целью работы является разработка комплексного подхода к оценке актуальности технических процессов на основе функционального моделирования IDEF0, хронометража, анализа потерь бережливого производства и метода морфологического ящика. Выделены четыре подпроцесса (нормоконтроль, технологический контроль, метрологическая экспертиза, утверждение), построена карта перемещений и определены основные источники временных потерь. Предложена морфологическая матрица, позволяющая диагностировать текущий уровень цифровой зрелости процесса и формировать целевой профиль для оценки его актуальности. Результаты исследования могут быть использованы для обоснования решений по модернизации и цифровизации процессов управления конструкторской документацией на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: согласование конструкторской документации, функциональное моделирование IDEF0, хронометраж, бережливое производство, потери (муда), морфологический ящик, цифровая трансформация

SYSTEM ANALYSIS OF PROCESS QUALITY FUNCTION IN PRODUCTION SYSTEMS

Annotation. The article considers the process of design and engineering documentation approval as a key element of production technical preparation, determining the quality and timeline of mechanical engineering product manufacturing. The aim of the work is to develop an integrated approach to assessing the relevance of technical processes based on IDEF0 functional modeling, time study, lean production waste analysis, and the morphological box method. Four subprocesses have been identified (norm control, technological control, metrological expertise, and approval); a movement map has been constructed; and the main sources of time losses have been determined. A morphological matrix is proposed that allows diagnosing the current level of the process's digital maturity and forming a target profile for assessing its relevance. The research results can be used to substantiate decisions on the modernization and digitalization of design documentation management processes at industrial enterprises.

Keywords: design documentation approval, IDEF0 functional modeling, time study, lean production, waste (muda), morphological box, digital transformation.

Введение. Современный этап развития промышленных предприятий характеризуется беспрецедентным усложнением технологических процессов и производственных систем, что обусловлено переходом к концепции «Индустрия 4.0», активным внедрением цифровых технологий, интернета вещей (IoT) и искусственного интеллекта [1]. Ускорение научно-технического прогресса и возрастание санкционного давления на российскую экономику требуют от предприятий машиностроительной отрасли постоянной модернизации технологических процессов для обеспечения конкурентоспособности и адаптации к изменяющимся условиям [2]. В этих условиях особое значение приобретает способность объективно оценивать актуальность (соответствие текущим требованиям и технологическому уровню) существующих технических процессов и производственных систем. Это касается всех стадий жизненного цикла продукции, включая критически важный этап — согласование технико-конструкторской документации (КД**)**. Данный процесс, регламентируемый требованиями Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и отраслевыми стандартами [3], традиционно связан со значительными временными и трудовыми затратами, а его недостаточная прозрачность и высокая доля ручного труда приводят к затягиванию сроков подготовки производства и снижению общей эффективности [4]. Цифровая трансформация и автоматизация процесса согласования КД на базе PLM-систем (Product Lifecycle Management) и технологий электронного документооборота рассматриваются сегодня как ключевой инструмент повышения эффективности [5; 6]. Внедрение таких систем позволяет сократить время согласования, минимизировать влияние человеческого фактора и перейти от последовательного рассмотрения документации к параллельной экспертизе [7]. Однако в существующих исследованиях и практических решениях наблюдается разрыв между оценкой технологического совершенства отдельных процессов (например, автоматизации документооборота) и их комплексной оценкой с точки зрения актуальности для общей производственной системы в условиях её непрерывного развития. Этот пробел является особенно критичным для процесса согласования технико-конструкторской документации, который выступает не просто административной процедурой, а важнейшим информационным и контрольным узлом, обеспечивающим качество, технологичность и надёжность будущего изделия. В связи с этим разработка научно обоснованной модели для оценки актуальности технических процессов и производственных систем, апробированная на примере процесса согласования КД, является своевременной и востребованной задачей.

Цель статьи — анализ и систематизация существующих моделей и методов оценки состояния технических процессов и производственных систем, а также создание новой модели, позволяющей оценивать их актуальность на примере процесса «Согласование технико-конструкторской документации».

Научная новизна заключается в разработке подхода к оценке актуальности технических процессов и производственных систем, который, в отличие от существующих методов, ориентированных на оценку общей эффективности, результативности [8] или надёжности [9], фокусируется на критерии «актуальности» как комплексной характеристике, отражающей степень соответствия процесса текущим производственным требованиям, уровню технологического развития и стратегическим целям предприятия. Новизна также включает создание модели, которая интегрирует различные аспекты актуальности и учитывает специфику процесса согласования конструкторской документации.

Для целей системного анализа и последующей разработки модели оценки актуальности технических процессов необходимо в первую очередь формализовать и детально описать объект исследования — процесс согласования технико-конструкторской документации (КД). В качестве методологической основы моделирования выбрана методология функционального моделирования IDEF0 (Integrated Definition for Function Modeling), которая регламентируется отечественным стандартом Р 50.1.028–2001 и является широко признанным инструментом для описания и анализа производственных и управленческих процессов [10]. Выбор IDEF0 обусловлен её наглядностью, иерархической структурой представления данных, а также возможностью чётко выделить входные ресурсы, результаты (выходы), управляющие воздействия и исполнительные механизмы, что необходимо для последующей количественной и качественной оценки актуальности процесса.

Контекстная диаграмма верхнего уровня представляет процесс «Согласование технико-конструкторской документации» как единый функциональный блок с входящими и выходящими дугами. Её структура приведена на рисунке 1.

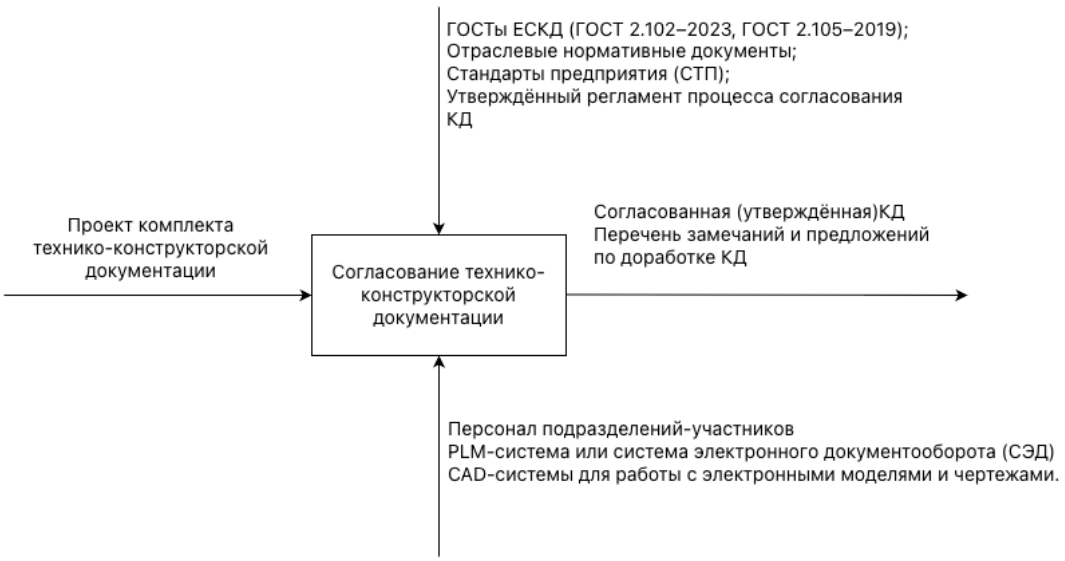


Рисунок 1. Контекстная диаграмма IDEF0 процесса «Согласование технико-конструкторской документации» (уровень A-0)
Figure 1. IDEF0 Context Diagram of the "Approval of Design and Engineering Documentation" Process (Level A-0)

Функциональная модель IDEF0, контекстная диаграмма которой приведена на рисунке 1, даёт общее представление о границах процесса и основных потоках данных. Для систематизации элементов контекстного уровня их сводное описание представлено в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика процесса «Согласование технико-конструкторской документации» (уровень A0)
Table 2. *Characteristics of the "Approval of Design and Engineering Documentation" Process (Level A0)*

Категория	**Наименование**	**Описание**
Вход (I)	Проект комплекта КД	Чертежи, спецификации, пояснительные записки, разработанные в соответствии с требованиями ЕСКД
Выходы (O)	Согласованная (утверждённая) КД	Документация, готовая к передаче на технологическую подготовку производства и изготовление
	Перечень замечаний	Формируется при обнаружении несоответствий, направляется разработчику на доработку
Управление (C)	Нормативная база	ГОСТ Р 2.102-2023, ГОСТ Р 2.105-2019, отраслевые стандарты, СТП, регламент согласования КД
Механизмы (M)	Персонал	Конструкторы, технологи, нормоконтролёры, метрологи, специалисты службы качества
	Программные средства	PLM/СЭД (маршрутизация, хранение версий,

Категория	Наименование	Описание
		история согласования); CAD-системы (работа с электронными моделями и чертежами)

Декомпозиция процесса первого уровня, показанная на рисунке 2, позволяет выделить четыре функциональных подпроцесса, которые в совокупности образуют полный цикл согласования технико-конструкторской документации. Краткая характеристика каждого из них приведена в таблице 2.

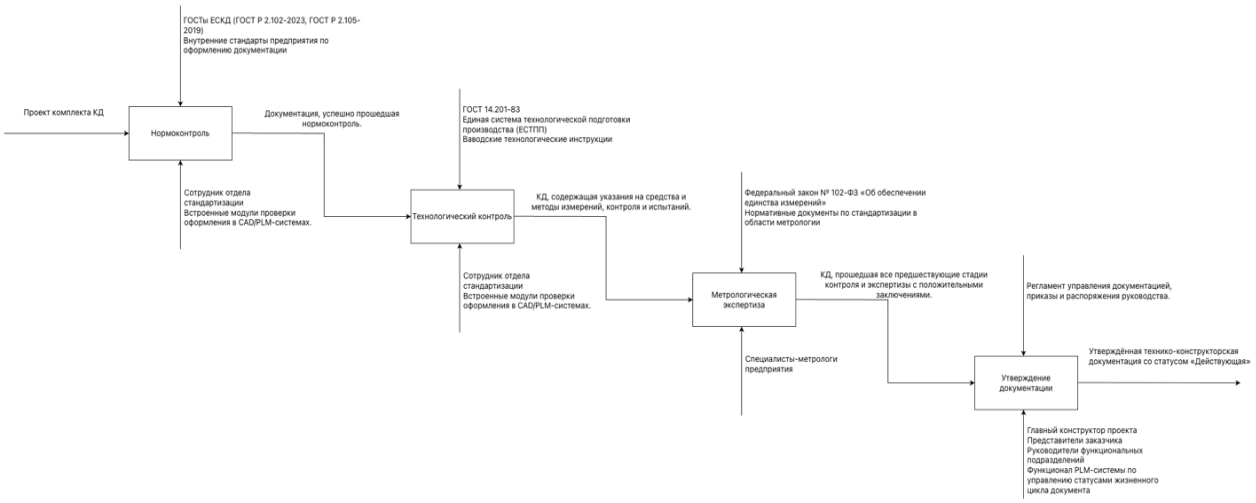


Рисунок 2. Диаграмма декомпозиции IDEF0 процесса «Согласование технико-конструкторской документации» (уровень A0)
Figure 2. IDEF0 Decomposition Diagram of the "Approval of Design and Engineering Documentation"

Таблица 2. Декомпозиция процесса согласования КД: подпроцессы A1–A4
Table 3. *Decomposition of the Design Documentation Approval Process: Subprocesses A1–A4*

Код	Подпроцесс	Краткое описание	Основной результат
A1	Нормоконтроль	Проверка комплектности и правильности оформления КД в соответствии с ГОСТ Р 2.102-2023, ГОСТ Р 2.105-2019 и СТП	Отметка о прохождении нормоконтроля или перечень замечаний по оформлению
A2	Технологический контроль	Оценка технологичности конструкции: возможность изготовления, сборки и контроля в условиях предприятия	Заключение о технологичности или перечень технологических замечаний
A3	Метрологическая экспертиза	Проверка правильности назначения средств и методов измерений, соответствия требованиям Федерального закона № 102-ФЗ	Положительное заключение или перечень замечаний по метрологии
A4	Утверждение	Присвоение документу статуса	Утверждённая КД,

Код	Подпроцесс	Краткое описание	Основной результат
	документации	«Утверждён» («Действующий») после успешного прохождения всех видов контроля	доступная для использования в производстве

Представленные в таблицах 1 и 2 сведения формируют структурную основу для дальнейшего анализа. Они позволяют, с одной стороны, зафиксировать состав управляющих воздействий и исполнительных механизмов, определяющих условия выполнения процесса, а с другой — очертить границы ответственности каждого подпроцесса. Детализация состава операций внутри каждого из блоков А1–А4 будет рассмотрена дальше в статье

Механизм: главный конструктор проекта, представители заказчика (при необходимости), руководители функциональных подразделений, функционал PLM-системы по управлению статусами жизненного цикла документа [5; 7].

Обратные связи. На диаграмме стрелками обратного направления (не показаны для упрощения псевдографики, но подразумеваются) обозначаются потоки замечаний, возвращающие документацию на доработку в конструкторское подразделение при выявлении несоответствий на любом из этапов А1–А3.

Построение модели IDEF0 позволяет наглядно представить структуру процесса согласования КД, выявить информационные потоки и функциональные связи между этапами. Как показано в ряде исследований по цифровой трансформации промышленности, именно такой детальный анализ процессов является необходимым условием для последующей автоматизации, оптимизации и, что особенно важно в контексте данной работы, для разработки критериев и метрик оценки их актуальности [2; 14].

Выявленные на основе модели IDEF0 компоненты — входы, управляющие воздействия, механизмы и выходы каждого этапа — будут использованы в дальнейшем для формирования набора показателей, характеризующих степень соответствия процесса согласования КД текущим и перспективным требованиям производственной системы предприятия. В частности, они позволяют определить:

- соответствие применяемых нормативных документов актуальным редакциям стандартов (управление);
- уровень автоматизации и цифровизации выполнения операций (механизмы);
- время прохождения каждого этапа и долю возвратов на доработку (выходы);
- полноту и качество исходной документации, поступающей на согласование (вход).

Таким образом, IDEF0-модель служит структурной основой, для разработки, предлагаемой в статье модели оценки актуальности технических процессов и производственных систем.

Функциональная модель IDEF0, представленная на рисунках 1 и 2, даёт общее представление о структуре процесса согласования КД, однако для последующей разработки модели оценки актуальности требуется более детальное раскрытие содержания каждого подпроцесса. Такая детализация позволяет не только зафиксировать перечень реально выполняемых на промышленных предприятиях операций, но и в дальнейшем сформировать номенклатуру измеримых показателей, характеризующих степень соответствия процесса современным требованиям производственной системы [2; 14].

В соответствии с выделенными на диаграмме декомпозиции функциональными блоками А1–А4, процесс согласования КД включает четыре основных подпроцесса: нормоконтроль, технологический контроль, метрологическую экспертизу и утверждение документации. Каждый из них, в свою очередь, состоит из набора типовых операций, выполняемых специалистами соответствующих служб в соответствии с действующей нормативной базой [3; 6; 11; 13]. Состав и иерархическая структура процесса в компактном виде приведены в таблице 3.

Таблица 3. Состав и иерархическая структура процесса «Согласование технико-конструкторской документации»

Table 4. *Composition and Hierarchical Structure of the "Approval of Design and Engineering Documentation" Process*

Код подпроцесса	Наименование подпроцесса	Состав операций (работ)
A1	Нормоконтроль	Проверка комплектности документации; контроль оформления чертежей (форматы, масштабы, линии, шрифты, основные надписи); проверка обозначений по классификатору ЕСКД и СТП; контроль текстовых документов (спецификации, пояснительные записки, ТУ); проверка подписей; формирование перечня замечаний.
A2	Технологический контроль	Анализ технологичности конструкции; проверка применяемых материалов и комплектующих по номенклатуре предприятия; оценка возможности использования типовых и групповых ТП; контроль назначения баз, допусков, шероховатости; согласование изменений для повышения технологичности; оформление заключения.
A3	Метрологическая экспертиза	Выявление указаний на средства и методы измерений; проверка наименований и единиц физических величин; оценка обоснованности норм точности и допусков; проверка наличия средств измерений на предприятии; контроль ссылок на аттестованные методики измерений; оформление экспертного заключения.
A4	Утверждение документации	Проверка полноты прохождения этапов A1–A3; присвоение статуса «Утверждён» в PLM/СЭД; регистрация в реестре КД; обеспечение доступа пользователей; передача документации в производственные и технологические службы.

Представленная в таблице 1 детализация состава процесса согласования КД позволяет перейти от качественного описания к количественной оценке его состояния. Наличие структурированного перечня операций создаёт методическую основу для выделения ключевых параметров, характеризующих актуальность каждого подпроцесса. В частности, для нормоконтроля (A1) важнейшим показателем является степень соответствия применяемых проверок актуальным редакциям стандартов ЕСКД и уровню автоматизации проверки оформления средствами CAD/PLM-систем [5; 7; 11]; для технологического контроля (A2) — полнота использования баз данных типовых технологических процессов и современного оборудования; для метрологической экспертизы (A3) — соответствие применяемых средств измерений утверждённым типам и наличие аттестованных методик [13]; для этапа утверждения (A4) — степень интеграции с единым информационным пространством предприятия и оперативность предоставления доступа к актуальной документации [6; 14].

Таким образом, таблица «процесс – подпроцесс – операции» служит связующим звеном между функциональной моделью IDEF0 и разрабатываемой в настоящем исследовании моделью оценки актуальности технических процессов и производственных систем, обеспечивая переход к формированию конкретных критериев и метрик для последующего анализа.

Методика проведения хронометража процесса согласования КД предполагает последовательную фиксацию моментов начала и окончания каждой операции, указанной в таблице 1, с последующим расчётом их длительности. Для формализации анализа временных затрат введём следующие обозначения и расчётные формулы.

Общая продолжительность цикла согласования одного комплекта КД ($T_{общ}$) складывается из четырёх основных компонентов:

$$T_{общ} = T_{оп} + T_{ож} + T_{пер} + T_{испр}, \quad (1)$$

где $T_{оп}$ - оперативное время - суммарная продолжительность непосредственного выполнения работ специалистами (нормоконтролёром, технологом, метрологом, руководителем); $T_{ож}$ - время ожидания - суммарное время нахождения документации в очередях между операциями; $T_{пер}$ - время перемещения - суммарные затраты времени на физическую или электронную передачу документации между участниками; $T_{испр}$ - время исправления и повторного согласования - дополнительные затраты, возникающие при обнаружении несоответствий и возврате документации на доработку.

Оперативное время определяется как сумма длительностей всех операций i, выполняемых в рамках подпроцессов А1–А4:

$$T_{оп} = \sum_{i=1}^{n} t_{оп,i}, \quad (2)$$

где $t_{оп,i}$— продолжительность i-й операции (например, проверка комплектности, анализ технологичности и т.д.), n — общее количество операций в процессе.

Время ожидания складывается из интервалов между завершением одной операции и началом следующей:

$$T_{ож} = \sum_{j=1}^{m} \Delta t_{ож,j}, \quad (3)$$

где $\Delta t_{ож,j}$— время ожидания между j-й и (j+1)-й операциями, m — количество переходов между операциями.

Время перемещения рассчитывается аналогично:

$$T_{пер} = \sum_{k=1}^{l} t_{пер,l}, \quad (4)$$

где $t_{пер,k}$— время, затраченное на k-ю передачу документации (в бумажном или электронном виде).

Время исправления и повторного согласования учитывает затраты на устранение замечаний и повторное прохождение этапов контроля:

$$T_{испр} = \sum_{p=1}^{q} (t_{доработка,p} + t_{повт.согл,p}), \quad (5)$$

где $t_{доработка,p}$ — время, затраченное конструктором на исправление p-го замечания, $t_{повт.согл,p}$ — время повторного согласования после исправления.

Важным аналитическим показателем является доля оперативного времени в общем цикле:

$$K_{оп} = \frac{T_{оп}}{T_{общ}} \times 100\% \quad (6)$$

Чем выше значение $K_{оп}$, тем эффективнее организован процесс с точки зрения минимизации потерь времени. Результаты хронометража, полученные на ряде машиностроительных предприятий, показывают, что в традиционной (бумажной или слабо автоматизированной) организации процесса значение $K_{оп}$ редко превышает 30–40 %, в то время как основная часть времени приходится на ожидание и повторные циклы согласования [4; 6; 7]. Такое соотношение свидетельствует о наличии значительных резервов для повышения эффективности и актуальности процесса за счёт его оптимизации и цифровизации.

Концепция бережливого производства (Lean Production) вводит фундаментальное различие между действиями, создающими ценность для потребителя, и действиями, которые ценность не создают, то есть являются потерями (муда) [15]. Применительно к процессу согласования КД под ценностью следует понимать те операции и их результаты, которые непосредственно способствуют обеспечению качества, технологичности и соответствия конструкторской документации установленным требованиям, а также снижают риски возникновения дефектов и брака на последующих стадиях жизненного цикла изделия [2; 16].

С точки зрения создания ценности операции процесса согласования КД могут быть классифицированы следующим образом:

Действия, создающие ценность (Value Added — VA):

1. выявление несоответствий оформления требованиям стандартов (нормоконтроль), предотвращающее ошибки при изготовлении и контроле;
2. оценка технологичности конструкции, позволяющая сократить трудоёмкость и себестоимость изготовления изделия;
3. проверка правильности назначения средств и методов измерений, обеспечивающая достоверность контроля качества продукции;
4. присвоение документу статуса «утверждён» и обеспечение доступа к актуальной версии для всех заинтересованных служб.

Действия, не создающие ценность, но неизбежные на данном этапе развития процесса (Non-Value Added but Necessary — Type I Muda):

1. передача документации между подразделениями (даже в электронном виде требуется время на уведомление и принятие в работу);
2. регистрация документов в журналах учёта и информационных системах;
3. ожидание освобождения специалиста, если параллельно выполняется несколько проектов.

Действия, не создающие ценность и подлежащие устранению (Pure Waste — Type II Muda):

1. исправление ошибок, допущенных на этапе проектирования и выявленных только на стадии согласования;
2. повторное согласование после внесения изменений;
3. ожидание из-за неравномерной загрузки участников процесса;
4. поиск актуальной версии документа при отсутствии централизованного электронного архива.

Понимание того, какие именно операции добавляют ценность конечному результату, а какие являются потерями, необходимо для обоснованного выбора направлений совершенствования процесса и, в конечном счёте, для оценки его актуальности: процесс, в котором преобладают действия, не создающие ценность, не может считаться актуальным и соответствующим современным требованиям производственной системы [14; 16].

В соответствии с классификацией, принятой в концепции бережливого производства, выделяют семь основных видов потерь (муда) [17]. Применительно к процессу согласования технико-конструкторской документации эти потери проявляются специфическим образом. Кроме того, каждый вид потерь может быть отнесён к определённому роду в зависимости от его природы и возможности устранения. В таблице 4 представлено описание видов потерь, их проявление в процессе согласования КД, а также отнесение к одному из трёх родов:

Род I — потери, не создающие ценность, но неизбежные при текущем уровне организации процесса (Type I Muda);

Род II — потери, не создающие ценность и подлежащие немедленному устранению (Type II Muda);

Род III — потери, создающие ценность (VA), которые ошибочно могут восприниматься как потери, но на самом деле являются необходимыми и полезными (для полноты классификации**).**

Таблица 4. Виды потерь (муда) в процессе согласования КД и их классификация по роду

Table 5. *Types of Waste (Muda) in the Design Documentation Approval Process and Their Classification by Type*

Вид потерь (муда)	**Проявление в процессе согласования КД**	**Род потерь**
Перепроизводство	Преждевременная передача на согласование некомплектной или недоработанной документации, что приводит к необходимости повторного рассмотрения после доработки	**Род II** (чистая потеря)
Ожидание	Простой документации в очереди на проверку у нормоконтролёра, технолога, метролога; ожидание подписи руководителя; задержки из-за отпусков или командировок согласующих лиц	**Род II** (чистая потеря)
Лишняя транспортировка	Физическое перемещение бумажных комплектов КД между корпусами и этажами; многократная	**Род II** (чистая потеря) — в части физического

Вид потерь (муда)	Проявление в процессе согласования КД	Род потерь
	пересылка файлов по электронной почте без единой системы управления версиями	перемещения; **Род I** — в части электронной передачи при отсутствии интеграции систем
Излишняя обработка	Дублирование проверок (например, повторная проверка оформления разными участниками); избыточные согласующие подписи, не требуемые нормативными документами; ручной перенос данных из одной системы в другую	**Род II** (чистая потеря)
Лишние запасы	Накопление входящих комплектов КД на столах у согласующих специалистов; наличие нескольких версий одного документа в разных подразделениях	**Род II** (чистая потеря)
Лишние движения	Поиск актуальной версии документа в разрозненных папках и архивах; необходимость личного присутствия для проставления подписи; перемещения сотрудников между подразделениями для уточнения замечаний	**Род II** (чистая потеря)
Дефекты (переделка)	Ошибки в документации, выявленные на стадии согласования и требующие возврата в конструкторское подразделение для исправления; ошибки, пропущенные на этапе согласования и обнаруженные только в производстве	**Род II** (чистая потеря)

Примечание: к Роду I (неизбежные потери) в рассматриваемом процессе могут быть отнесены такие действия, как формальная регистрация документа в системе (без которой невозможно обеспечить прослеживаемость), а также ожидание, связанное с нормативной продолжительностью рабочего дня (например, документ, поступивший в конце рабочего дня, будет обработан на следующий день). Однако эти потери должны быть минимизированы за счёт автоматизации и оптимизации регламентов [6; 18].

Для наглядного представления того, где именно теряется время в процессе согласования КД и по каким причинам, целесообразно использовать карту перемещений (или карту потока создания ценности, Value Stream Map). Карта перемещений отражает последовательность операций, временные интервалы между ними, а также фиксирует узкие места и источники потерь.

Ниже приведено описание типовой карты перемещений для процесса согласования КД в условиях слабой автоматизации (на основе данных хронометража, выполненных на промышленных предприятиях [4; 6]).

Таблица 5. Карта перемещений и анализ потерь времени в процессе согласования КД
Table 6.Movement Map and Analysis of Time Losses in the Design Documentation Approval Process

Этап (операция)	Исполнитель	Среднее время операции ($t_{оп}$/$t_{оп}$), мин	Время ожидания перед операцией ($\Delta t_{ож}$/$\Delta t_{ож}$), мин	Способ перемещения	Время перемещения ($t_{пер}$/$t_{пер}$), мин	Причина потерь времени	Род потерь
Передача проекта КД на согласование	Конструктор → Канцелярия/СЭД	—	—	Электронная почта / бумажная передача	5–30	Отсутствие единой точки входа; необходимость ручной регистрации	**Род II**
Ожидание начала нормоконтроля	—	—	120–480	—	—	Неравномерная загрузка нормоконтролёра; отсутствие приоритезации	**Род II**
Нормоконтроль (A1)	Нормоконтролёр	30–90	—	—	—	Ручная проверка без средств автоматизации	**VA** (ценность)
Передача технологу	Нормоконтролёр → Технолог	—	—	Внутренняя почта / СЭД	10–60	Отсутствие автоматической маршрутизации	**Род I** (при бумажном) / **Род II** (при неинтегрированной СЭД)
Ожидание технологического контроля	—	—	240–720	—	—	Высокая загрузка технологов, работа над несколькими проектами одновременно	**Род II**
Технологический контроль (A2)	Технолог	60–180	—	—	—	Необходимость сверки с базами данных вручную	**VA** (ценность)
Передача на метрологическую экспертизу	Технолог → Метролог	—	—	Внутренняя почта / СЭД	10–60	Аналогично предыдущему	**Род I / II**
Ожидание метрологической экспертизы	—	—	120–360	—	—	Специфичность экспертизы, малый штат метрологов	**Род II**
Метрологическая экспертиза (A3)	Метролог	45–120	—	—	—	Ручная проверка соответствия средств измерений	**VA** (ценность)
Возврат на доработку (при замечаниях)	Конструктор	120–480 (суммарно с исправлением)	—	Обратная передача	5–30	Ошибки проектирования, несоответствие требованиям	**Род II**
Передача на утверждение	Ответственный за сводку → Руководитель	—	—	Электронная почта / СЭД	5–30	Зависимость от графика руководителя	**Род I / II**
Ожидание утверждения	—	—	60–480	—	—	Занятость руководителя, необходимость личной подписи	**Род II**
Утверждение (A4)	Руководитель / Главный конструктор	5–15	—	—	—	Формальная процедура при наличии всех подписей	**VA** (ценность)
Передача в архив / производство	Утверждающий → Заинтересованные службы	—	—	Электронная рассылка / копирование	10–60	Отсутствие единого информационного пространства	**Род II**

Анализ данных таблицы 5 показывает, что основные потери времени ($T_{ож}$ и $T_{пер}$) сосредоточены в интервалах между операциями, добавляющими ценность. Суммарное время ожидания может в 5–10 раз превышать оперативное время, что подтверждается расчётами по формуле для Коп. Главными причинами потерь являются:

1. отсутствие автоматизированной маршрутизации и единой системы управления потоками работ (workflow) — приводит к задержкам при передаче и ожидании;
2. неравномерная загрузка специалистов — порождает очереди;
3. ручной характер многих проверок — увеличивает длительность операций и повышает вероятность ошибок;
4. необходимость физического присутствия для проставления подписей — создаёт дополнительное время перемещений и ожидания;
5. отсутствие интеграции между CAD, PLM и ERP-системами — вызывает дублирование ввода данных и лишние движения [5; 7; 18].

Проведённый анализ временных характеристик и структуры потерь в процессе согласования КД показывает, что актуальность технического процесса не может быть оценена исключительно по его выходным параметрам (например, по факту утверждения документации). Необходим учёт того, какой ценой достигается результат: какие временные затраты, доля операций, создающих ценность, и уровень автоматизации выполнения рутинных операций [2; 14].

В контексте разрабатываемой модели оценки актуальности результаты хронометража, идентификации потерь и построения карты перемещений служат исходными данными для формирования следующих групп показателей:

1. временные показатели ($T_{общ}$, $T_{оп}$, $K_{опи}$ др.);
2. показатели качества процесса (доля документации, возвращаемой на доработку по результатам нормоконтроля, технологического контроля и метрологической экспертизы);
3. показатели цифровой зрелости (уровень автоматизации маршрутизации, использование электронных подписей, наличие единого электронного архива) [6; 7; 18];
4. показатели создания ценности (отношение времени операций, создающих ценность, к общей продолжительности процесса).

Таким образом, интеграция методов хронометража и анализа потерь (муда) в модель оценки актуальности позволяет получить количественную характеристику степени соответствия процесса согласования КД современным требованиям производственной системы, что является необходимой основой для принятия обоснованных управленческих решений по его оптимизации и развитию.

Для систематизации вариантов организации процесса согласования КД применён метод морфологического анализа [15]. В качестве осей морфологического ящика выбраны четыре подпроцесса, выделенные при декомпозиции IDEF0 (A1–A4). Для каждой оси определены три альтернативы, различающиеся уровнем автоматизации и цифровизации таблица 6.

Таблица 6. Морфологический ящик процесса согласования технико-конструкторской документации
Table 7. Morph*ological Box of the Design and Engineering Documentation Approval Process*

Ось (подпроцесс)	Альтернатива 1 (базовая)	Альтернатива 2 (промежуточная)	Альтернатива 3 (целевая)
A1. Нормоконтроль	Ручная проверка бумажной документации по контрольным листам	Частично автоматизированная проверка в CAD/PDM с ручным подтверждением	Полностью автоматизированная проверка оформления в PLM с использованием шаблонов и макросов, автоматическое формирование замечаний
A2. Технологический контроль	Визуальная оценка технологичности технологом без использования электронных баз данных	Проверка с использованием локальных справочников применяемости материалов и типовых ТП	Автоматизированный анализ технологичности в CAD/CAM с интеграцией в базу данных ресурсов предприятия и цифровой двойник производства
A3. Метрологическая экспертиза	Выборочная проверка метрологом по запросу конструктора	Экспертиза всех документов, содержащих требования к измерениям, с использованием реестра средств измерений	Автоматическое распознавание измерительных требований и сверка с корпоративной базой аттестованных методик и средств измерений в PLM
A4. Утверждение документации	Бумажное согласование с личными подписями на контрольных экземплярах	Электронное согласование с простой электронной подписью в СЭД	Утверждение с использованием усиленной квалифицированной электронной подписи в единой PLM-среде, автоматическое изменение статуса и оповещение пользователей

Комбинация альтернатив по четырём осям даёт 81 возможную конфигурацию процесса. Практическая ценность матрицы — диагностика текущего уровня цифровой зрелости каждого подпроцесса и формирование целевого профиля для оценки актуальности процесса [2; 14]. Сравнение фактического состояния с целевым позволяет определить направления модернизации.

Заключение. Проведённый в работе анализ процесса согласования технико-конструкторской документации как критически важного элемента технической подготовки производства показал, что его традиционная организация характеризуется высокой долей непроизводительных потерь времени, связанных с ожиданием, перемещением и переделкой документации, а также недостаточным уровнем автоматизации, что снижает актуальность процесса в условиях цифровой трансформации промышленности [2; 6]. На основе методологии IDEF0 построена функциональная модель, позволившая выделить четыре ключевых подпроцесса (нормоконтроль, технологический контроль, метрологическая экспертиза и утверждение документации) и определить состав операций в каждом из них, что создало структурную основу для количественной оценки [3; 11; 13]. С использованием методов хронометража и анализа потерь (муда) разработана система расчётных формул для определения временны́х характеристик процесса, включая долю оперативного времени, и построена карта перемещений, фиксирующая основные источники потерь времени с их классификацией по родовой принадлежности [16; 17]. Применение метода морфологического ящика к подпроцессам А1–А4 позволило систематизировать возможные состояния процесса по уровню цифровизации — от базового (ручного) до целевого (полностью автоматизированного), а полученная морфологическая матрица служит инструментом диагностики текущего состояния и формирования целевого профиля для оценки актуальности [15]. Совокупность разработанных моделей (функциональной, временной, потерь и морфологической) образует научно-методическую основу для построения интегрального показателя актуальности технического процесса, позволяющего количественно оценить степень его соответствия современным требованиям производственной системы и обосновывать решения по модернизации и цифровизации процессов согласования КД на машиностроительных предприятиях [14; 18].

Список использованных источников

1. Tuyboyov O. V., Toshtemirov K. Q., Toshtemirova G. A. Investigating technological system structures in metal processing for enhanced productivity and reliability // Universum: технические науки. — 2024. — № 5 (122). — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/investigating-technological-system-structures-in-metal-processing-for-enhanced-productivity-and-reliability (дата обращения: 01.04.2026).
2. Оценка эффективности технологических процессов на предприятиях машиностроительной отрасли экономики / [Б. а.] // Научно-технические ведомости СПбПУ. Экономические науки. — 2022. — Т. 15, № 4. — С. 87–98. — URL: https://test.editorum.ru/ru/nauka/article/52288/view (дата обращения: 01.04.2026).
3. ГОСТ 2.114-2016. Единая система конструкторской документации. Технические условия : межгосударственный стандарт : введён в действие Приказом Росстандарта от 30.08.2016 № 978-ст в качестве национального стандарта РФ с 01.04.2017. — М. : Стандартинформ, 2016. — URL: https://sudact.ru/law/gost-2114-2016-mezhgosudarstvennyi-standart-edinaia-sistema-konstruktorskoi/ (дата обращения: 01.04.2026)
4. Самойлова С. Е. Автоматизация процесса согласования технической документации на промышленном предприятии: выпускная квалификационная работа / С. Е. Самойлова; Уральский государственный экономический университет. — Екатеринбург: УрГЭУ, 2021. — URL: https://portfolio.usue.ru/published/work/60b917f9edba4/ (дата обращения: 03.04.2026).
5. Айвазьян Т. ОКБМ Африкантов: «С 2023 года планируем перейти на полное электронное согласование документации» / Т. Айвазьян // CFO-Russia.ru. — 2022. — 13 окт. — URL: https://www.cfo-russia.ru/stati/index.php?ELEMENT_ID=4818 (дата обращения: 03.04.2026).
6. Внедрение технологии электронных подлинников конструкторской документации на базе PLM-платформы предприятия / Т. В. Айвазьян, Н. И. Киселев, К. В. Комиссаров [и др.] // Автоматизация в промышленности. — 2025. — № 3. — URL: http://avtprom.ru/article/vnedrenie-tekhnologii-elektronny (дата обращения: 05.04.2026).
7. Сквозное взаимодействие конструкторских и расчётных подразделений в едином информационном пространстве предприятия // Автоматизация в промышленности. — 2025. — № 4. — URL: http://avtprom.ru/article/skvoznoe-vzaimodeistvie-konstruk (дата обращения: 05.04.2026).

8. Назарева А. В. Evaluation of the effectiveness of the production process based on normalized indicators = Оценка результативности производственного процесса на основе нормализованных показателей / А. В. Назарева // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «SMUS-2025». — СПб. : ГУАП, 2025. — С. 45–48. — URL: https://vmuis.ru/smus/article/view/28511 (дата обращения: 05.04.2026).
9. Ширяева Е. Н. Особенности оценки надёжности технологических и технических систем в действующей нормативной документации / Е. Н. Ширяева, М. А. Полякова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. — 2019. — Т. 17, № 3. — С. 60–68. — DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-60-68. — URL: http://www.vestnik.magtu.ru/arkhiv-nomerov/79-arkhiv-nomerov/3-2019/1038-60.html (дата обращения: 05.04.2026).
10. Р 50.1.028-2001. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования : рекомендации по стандартизации : утверждены и введены в действие Постановлением Госстандарта России от 02.07.2001 № 256-ст с 01.07.2002. — М. : ИПК Издательство стандартов, 2001. — URL: http://www.skonline.ru/doc/47772.html (дата обращения: 08.04.2026).
11. ГОСТ Р 2.105-2019. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам : национальный стандарт РФ : утверждён и введён в действие Приказом Росстандарта от 29.04.2019 № 175-ст с 01.02.2020 (с изменениями № 2, введёнными в действие с 01.03.2024, и поправкой, введённой в действие с 29.04.2025). — М. : Стандартинформ, 2019. — URL: https://base.garant.ru/72651736/ (дата обращения: 08.04.2026).
12. ГОСТ 14.201-83. Обеспечение технологичности конструкции изделий. Общие требования: государственный стандарт Союза ССР : утверждён Постановлением Госстандарта СССР от 09.02.1983 № 712, введён в действие с 01.01.1984. — М. : Издательство стандартов, 1983. — URL: https://snip.ruscable.ru/catalog/?c=1&i=4705 (дата обращения: : 08.04.2026).
13. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений : Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ : принят Государственной Думой 11.06.2008 : одобрен Советом Федерации 18.06.2008 (ред. от 08.08.2024 ; с изменениями, вступившими в силу с 01.03.2025 в соответствии с Федеральным законом от 14.02.2024 № 18-ФЗ). — URL: https://base.garant.ru/12161093/ (дата обращения: : 08.04.2026).
14. Павлова Е. А. Технологический комплекс оценки эффективности производственных систем: данные, технологии и визуализация в эпоху индустрии 4.0 / Е. А. Павлова, Н. Н. Бахтадзе, Д. В. Елпашев, А. В. Рагуткин // Проблемы машиностроения и автоматизации. — 2025. — № S4-1. — С. 60–68. — DOI: 10.52261/02346206_2025_4C1_60.
15. Вумек Дж. П. Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании / Дж. П. Вумек, Д. Т. Джонс ; пер. с англ. — 6-е изд. — М. : Альпина Паблишер, 2018. — 472 с. — ISBN 978-5-9614-6829-8.
16. Лайкер Дж. Дао Toyota: 14 принципов менеджмента ведущей компании мира / Дж. Лайкер ; пер. с англ. — 10-е изд. — М. : Альпина Паблишер, 2019. — 400 с. — ISBN 978-5-9614-6973-8.
17. Тайити Оно. Производственная система Тойоты: уходя от массового производства / Тайити Оно ; пер. с англ. — М. : Институт комплексных стратегических исследований, 2012. — 208 с. — ISBN 978-5-903148-39-4.
18. Клочков Ю. П. Цифровая трансформация процессов управления технической документацией на предприятиях машиностроения / Ю. П. Клочков, А. В. Суворов // Цифровая экономика. — 2023. — № 2 (22). — С. 45–53. — DOI: 10.34706/DE-2023-02-05.

Reference

1. Tuyboyov O. V. Investigating technological system structures in metal processing for enhanced productivity and reliability / O. V. Tuyboyov, K. Q. Toshtemirov, G. A. Toshtemirova // Universum: Technical Sciences. – 2024. – No. 5 (122). – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/investigating-technological-system-structures-in-metal-processing-for-enhanced-productivity-and-reliability.

2. Evaluation of the efficiency of technological processes at enterprises of the machine-building sector of the economy / [Anon.] // St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – Pp. 87–98.
3. GOST 2.114-2016. Unified system for design documentation. Specifications. – Introd. 2017-04-01. – Moscow: Standartinform, 2016.
4. Samoilova S. E. Automation of the technical documentation approval process at an industrial enterprise: graduate qualification work / S. E. Samoilova. – Yekaterinburg: Ural State University of Economics, 2021. – URL: https://portfolio.usue.ru/published/work/60b917f9edba4/.
5. Aivazyan T. OKBM Afrikantov: "From 2023 we plan to switch to full electronic approval of documentation" / T. Aivazyan // CFO-Russia.ru. – 2022. – 13 Oct. – URL: https://www.cfo-russia.ru/stati/index.php?ELEMENT_ID=4818.
6. Aivazyan T. V. Implementation of the technology of electronic originals of design documentation based on the enterprise PLM platform / T. V. Aivazyan, N. I. Kiselev, K. V. Komissarov [et al.] // Automation in Industry. – 2025. – No. 3. – URL: http://avtprom.ru/article/vnedrenie-tekhnologii-elektronny.
7. End-to-end interaction of design and analysis departments in the unified information space of the enterprise // Automation in Industry. – 2025. – No. 4. – URL: http://avtprom.ru/article/skvoznoe-vzaimodeistvie-konstruk.
8. Nazareva A. V. Evaluation of the effectiveness of the production process based on normalized indicators / A. V. Nazareva // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "SMUS-2025". – Saint Petersburg: SUAI, 2025. – Pp. 45–48. – URL: https://vmuis.ru/smus/article/view/28511.
9. Shiryaeva E. N. Features of assessing the reliability of technological and technical systems in current regulatory documents / E. N. Shiryaeva, M. A. Polyakova // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – 2019. – Vol. 17, No. 3. – Pp. 60–68. – DOI: 10.18503/1995-2732-2019-17-3-60-68.
10. R 50.1.028-2001. Information technologies for product lifecycle support. Methodology of functional modeling. – Introd. 2002-07-01. – Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 2001.
11. GOST R 2.105-2019. Unified system for design documentation. General requirements for textual documents (with Amendment No. 2, effective 2024-03-01, and corrigendum effective 2025-04-29). – Introd. 2020-02-01. – Moscow: Standartinform, 2019.
12. GOST 14.201-83. Ensuring the manufacturability of product design. General requirements. – Introd. 1984-01-01. – Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1983.
13. Russian Federation. Federal Law No. 102-FZ of June 26, 2008, "On Ensuring the Uniformity of Measurements" (as amended on August 8, 2024; with amendments effective from March 1, 2025). – URL: https://base.garant.ru/12161093/.
14. Pavlova E. A. Technological complex for assessing the efficiency of production systems: data, technologies, and visualization in the Industry 4.0 era / E. A. Pavlova, N. N. Bakhtadze, D. V. Elpashev, A. V. Ragutkin // Problems of Mechanical Engineering and Automation. – 2025. – No. S4-1. – Pp. 60–68. – DOI: 10.52261/02346206_2025_4C1_60.
15. Womack J. P. Lean thinking: Banish waste and create wealth in your corporation / J. P. Womack, D. T. Jones. – 6th ed. – Moscow: Alpina Publisher, 2018. – 472 p.
16. Liker J. K. The Toyota way: 14 management principles from the world's greatest manufacturer / J. K. Liker. – 10th ed. – Moscow: Alpina Publisher, 2019. – 400 p.
17. Ohno T. Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production / T. Ohno. – Moscow: Institute for Complex Strategic Studies, 2012. – 208 p.
18. Klochkov Yu. P. Digital transformation of technical documentation management processes at mechanical engineering enterprises / Yu. P. Klochkov, A. V. Suvorov // Digital Economy. – 2023. – No. 2 (22). – Pp. 45–53. – DOI: 10.34706/DE-2023-02-05.

SYSTEM ANALYSIS OF PROCESS QUALITY FUNCTION IN PRODUCTION SYSTEMS

Sedin Lev I.
2nd-year Postgraduate Student, IFTI
Department of Innovation and Integrated Quality Systems, SUAI
Saint Petersburg
E-mail: leo.sedin@gmail.com

© Седин Л.И., 2026

УДК 004.896:658.51

[1]Винниченко А. В., [1]Лепёхин А. А.

ИНТЕГРАЦИЯ МЕТОДОВ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХРОНОМЕТРАЖА ОПЕРАЦИЙ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КОЛЛАБОРАТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

[1]Винниченко Александра Валерьевна
Кандидат технических наук
Доцент кафедры инноватики и интегрированных систем качества
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
г. Санкт-Петербург
E-mail: alex23rain@gmail.com

[1]Лепёхин Артём Андреевич
бакалавр 2 курса ГУАП
кафедры инноватики и интегрированных систем качества ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения»
г. Санкт-Петербург
Санкт-Петербург
E-mail: artem040106@mail.ru

***Аннотация*.** В статье рассматривается интеграция методов бережливого производства в киберфизические системы коллаборативного производства на примере технологической цепочки изготовления камеры внутреннего сгорания авиационного двигателя. Представлена методика оценки хронометража операций с классификацией затрат по категориям, а также диаграмма спагетти для анализа эффективности процессов перемещения. Разработан план мероприятий по устранению потерь. Предложена оптимизированная конфигурация производственной ячейки. Обоснована эффективность, предложенных мероприятий по улучшению.

Ключевые слова: промышленная автоматизация, цифровизация производства, бережливое производство, анализ подходов бережливого производства.

INTEGRATION OF LEAN MANUFACTURING METHODS TO OPTIMIZE OPERATION TIMING IN CYBERPHYSICAL SYSTEMS OF COLLABORATIVE MANUFACTURING

Annotation. The article discusses the integration of lean production methods into cyber-physical collaborative production systems using the example of the technological chain for manufacturing an aircraft engine combustion chamber. It presents a methodology for assessing the timing of operations and categorizing costs, as well as a spaghetti diagram for analyzing the efficiency of movement processes. A plan for eliminating losses has been developed. An optimized production cell configuration has been proposed. The effectiveness of the proposed improvement measures has been justified.

Keywords: industrial automation, digitalization of production, lean manufacturing, and analysis of lean manufacturing approaches.

Введение. Авиастроение относится к числу наиболее трудоёмких и ресурсоёмких отраслей машиностроения. Высокая сложность изготовления конструкторских компонентов наряду с необходимостью неукоснительного соблюдения регламентов контроля качества выпускаемой продукции обусловливает значительные производственные издержки [1]. Для преодоления указанных барьеров авиастроительные предприятия активно внедряют интеллектуальные системы, способствующие снижению доли брака и повышению эффективности производства [2, 3]. Вместе с тем, в силу новизны подобных интеллектуальных решений на рынке промышленной автоматизации, компании не всегда рационально оснащают производственные линии и организуют пространство при установке коллаборативных систем [4].

В этой связи возникает необходимость не только в цифровизации операций, но и в реинжиниринге физического перемещения ресурсов, что обусловливает актуальность синтеза принципов бережливого производства и киберфизических систем [5-7]. Для апробации предлагаемого подхода в качестве объекта исследования выбрана упрощённая технологическая цепочка процессов изготовления камеры внутреннего сгорания авиационного двигателя [8]. Выбранная процессная цепочка позволяет провести репрезентативный анализ потерь при реализации коллаборативного взаимодействия оператора и оборудования, а также продемонстрировать эффективность методов бережливого производства при анализе производственных процессов [9]. На рис. 1 представлен фрагмент графической модели процессной цепочки [10].



Рисунок 1. Графическая модель рассматриваемого процесса (фрагмент)
Figure 1. Graphical model of the process under consideration (fragment)

Представленная модель представляет собой формализованное описание маршрутной технологии, включающее дискретные операционные блоки, точки коллаборативного взаимодействия человека и роботизированной системы, а также этапы межоперационного контроля.

Методика и результаты хронометража. Для последующего анализа эффективности производственного процесса и выявления скрытых потерь необходимо количественно и качественно оценить фактические временные затраты по каждому элементу. С этой целью разработана методика хронометража, позволяющая дифференцировать операционное время (непосредственную обработку), время вспомогательных переходов и регламентированные простои в зонах совместной работы оператора и оборудования. Полученные данные классифицированы по категориям VA (ценность, value-added), NNVA (необходимые, но не создающие ценности затраты, necessary non-value-added) и NVA (чистые потери, non-value-added), что позволяет идентифицировать наиболее проблемные этапы технологической цепочки и сформулировать направления оптимизации.

Для количественного анализа пространственных перемещений оператора построена диаграмма спагетти. Результаты измерений позволили провести дифференцированный анализ длительности выполнения дискретных элементов процесса (операционной составляющей, вспомогательных переходов, простоев в зонах коллаборативного взаимодействия) и выявить

нерациональные траектории движений. Результаты хронометража по каждому этапу технологического маршрута представлены в табл. 1–8.

Таблица 1. Наблюдательный лист хронометража операции Формообразование заготовки
Table 1. Timekeeping Sheet for the Forming Operation

№	*Действие*	*Тип работы*	*Длительность, мин*
1	Оператор идёт к столу мастера за заданием	NVA	3
2	Оператор идёт на склад заготовок, берёт лист	NVA	4
3	Оператор возвращается к станку с заготовкой	NVA	2
4	Оператор идёт в инструментальную кладовую за оснасткой	NVA	3
5	Оператор возвращается с оснасткой	NVA	3
6	Настройка станка, запуск программы	NNVA	4
7	*Лазерная резка + гибка*	*VA*	*10*
8	Оператор идёт в ОТК сдать маршрутный лист	NVA	5
9	Оператор возвращается к станку	NVA	4
ИТОГО			**38**

Таблица 2. Верификация геометрических параметров и стыкового зазора
Table 2. Verification of geometric parameters and joint clearance

№	*Действие*	*Тип работы*	*Длительность, мин*
1	Оператор везёт деталь на тележке к КИМ	NVA	5
2	Оператор ищет эталонную модель в бумажном архиве	NVA	6
3	Оператор устанавливает деталь в КИМ	NNVA	3
4	*Измерение (ручной режим, без автоматизации)*	*VA*	*6*
5	Оператор заполняет протокол вручную	NNVA	5
6	Оператор идёт к мастеру за подписью	NVA	4
7	Оператор возвращается к детали	NVA	3
ИТОГО			**32**

Таблица 3. Сварка продольного шва
Table 3. Welding of the longitudinal seam

№	*Действие*	*Тип работы*	*Длительность, мин*
1	Оператор везёт деталь к сварочному посту	NVA	4
2	Оператор идёт в кладовую за сварочной проволокой	NVA	5
3	Оператор возвращается с проволокой	NVA	5
4	Установка детали в позиционер	NNVA	4
5	*Ручная сварка (без робота)*	*VA*	*12*
6	Оператор ждёт остывания шва	NVA	6
7	Оператор идёт за визуальным контролёром	NVA	4
ИТОГО			**40**

Таблица 4. Неразрушающий контроль сварного соединения
Table 4. Non-destructive testing of the welded joint

№	*Действие*	*Тип работы*	*Длительность, мин*
1	Оператор везёт деталь на УЗ-контроль	NVA	4

2	Оператор ждёт очереди на контроль	NVA	8
3	Настройка оборудования вручную	NNVA	5
4	*УЗ-контроль (ручное сканирование)*	*VA*	*10*
5	Оператор заполняет протокол вручную	NNVA	6
6	Оператор идёт к эксперту для подписи	NVA	4
ИТОГО			**37**

Таблица 5. Сверление охлаждающих отверстий
Table 5. Drilling of cooling holes

№	***Действие***	***Тип работы***	***Длительность, мин***
1	Оператор везёт деталь на сверлильный станок	NVA	5
2	Оператор идёт за сверлами в кладовую	NVA	6
3	Оператор возвращается со свёрлами	NVA	6
4	Установка детали, смена инструмента	NNVA	5
5	*Сверление (ручная подача, без ЧПУ)*	*VA*	*14*
6	Оператор проверяет отверстия визуально	NNVA	4
ИТОГО			**40**

Таблица 6. Контроль отверстий системы охлаждения
Table 6. Monitoring of cooling system openings

№	***Действие***	***Тип работы***	***Длительность, мин***
1	Оператор везёт деталь на контроль	NVA	4
2	Оператор ищет калибры на стеллаже	NVA	5
3	*Контроль диаметра вручную (каждое отверстие)*	*VA*	*12*
4	*Проливка воздухом (ручная настройка)*	*VA*	*6*
5	Оператор заполняет протокол	NNVA	5
6	Оператор идёт к мастеру за допуском	NVA	4
ИТОГО			**36**

Таблица 7. Плазменное нанесение покрытия
Table 7. Plasma coating

№	***Действие***	***Тип работы***	***Длительность, мин***
1	Оператор везёт деталь в плазменную камеру	NVA	6
2	Оператор идёт за порошком на склад	NVA	5
3	Оператор возвращается с порошком	NVA	5
4	Маскировка детали вручную	NNVA	8
5	Настройка плазменного режима	NNVA	5
6	*Нанесение покрытия (без адаптивного контроля)*	*VA*	*10*
7	Оператор ждёт остывания камеры	NVA	7
ИТОГО			**46**

Таблица 8. Итоговый контроль готового изделия
Table 8. Final inspection of the finished product

№	***Действие***	***Тип работы***	***Длительность, мин***

1	Оператор везёт деталь на итоговый контроль	NVA	5
2	Оператор ищет чертёж в бумажном архиве	NVA	6
3	*Контроль геометрии ручным инструментом*	*VA*	*12*
4	*Контроль адгезии (отрывной метод)*	*VA*	*5*
5	Оператор заполняет протокол вручную	NNVA	7
6	Оператор идёт в ОТК сдать протокол	NVA	5
ИТОГО			**40**

Сводные результаты хронометража с группировкой по типам работ обобщены в табл. 9.

Таблица 9. Сводные результаты хронометража по всем операциям
Table 9. Summary of timing results for all operations

Операция	***Общее время, мин***	***VA, мин***	***NNVA, мин***	***NVA, мин***
1. Формообразование	38	10	4	24
2. Верификация	32	6	8	18
3. Сварка	40	12	4	24
4. НК сварки	37	10	11	16
5. Сверление	40	14	9	17
6. Контроль отверстий	36	18	5	13
7. Нанесение покрытия	46	10	13	23
8. Итоговый контроль	40	17	7	16
ИТОГО	**309**	**97**	**61**	**151**

Для выявления нерациональных траекторий и точек избыточных перемещений, не создающих добавленной ценности, выполнена пространственная оценка планировки производственного помещения. На рис. 2 представлена диаграмма спагетти текущего состояния, отражающая фактические маршруты движения оператора в рамках технологической цепочки.

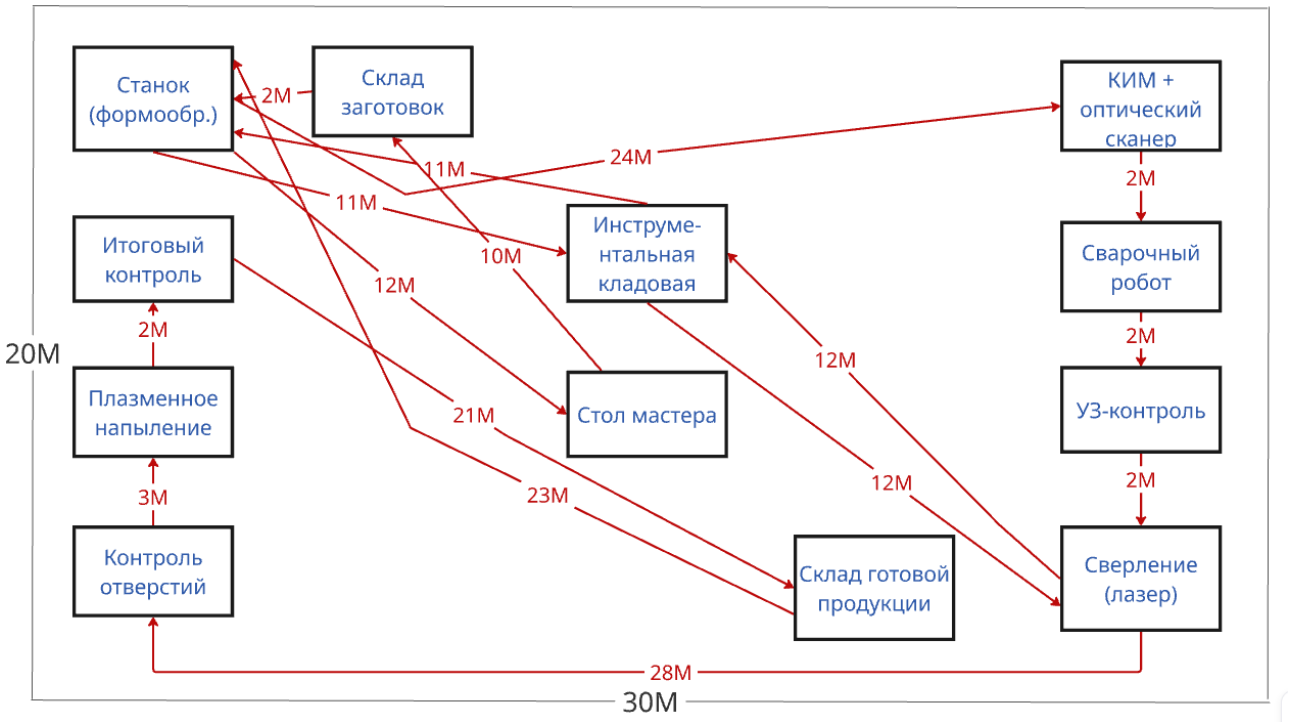


Рисунок 2. Диаграмма спагетти текущего состояния
Figure 2. Spaghetti diagram of the current state

В таблице 10 приведены последовательность перемещений и их протяжённость согласно диаграмме спагетти.

Таблица 10. Последовательность и дистанции передвижений при изготовлении продукции
Table 10. Sequence and distances of movements during product manufacturing

№	*Откуда*	*Куда*	*Расстояние, м*
1	Станок	Стол мастера	12
2	Стол мастера	Склад заготовок	10
3	Склад заготовок	Станок	2
4	Станок	Инструментальная кладовая	11
5	Инструментальная кладовая	Станок	11
6	Станок	КИМ	24
7	КИМ	Сварочный робот	2
8	Сварочный робот	УЗ-контроль	2
9	УЗ-контроль	Сверление (лазер)	2
10	Сверление (лазер)	Инструментальная кладовая	12
11	Инструментальная кладовая	Сверление (лазер)	12
12	Сверление	Контроль отверстий	28
13	Контроль отверстий	Плазменная камера	3
14	Плазменная камера	Итоговый контроль	2
15	Итоговый контроль	Склад готовой продукции	21
16	Склад готовой продукции	Станок	23
Итого:			177

Представленные результаты хронометража в таблицах 1-9 и результаты потоковых движений на диаграмме спагетти на рисунке 3 и таблице 10, позволяют провести количественный и качественные анализы организации процессов и устройства производственного помещения.

Для количественной оценки уровня затрат, исходя из сводной таблицы 9, выполнена классификация процессов по категориям VA(Ценность), $NNVA$(Сопутствующие затраты) и NVA(Потери) согласно методологии бережливого производства.

1. Общее время операции ($T_{общ}$): 309 минут.
2. Время создания ценности (VA): Действия 97 минут.
3. Необходимое, но не создающее ценность время ($NNVA$): 61 минуту.
4. Чистые потери (NVA): 151 минуту.

На рисунке 4 представлено процентное соотношение классов процессов:

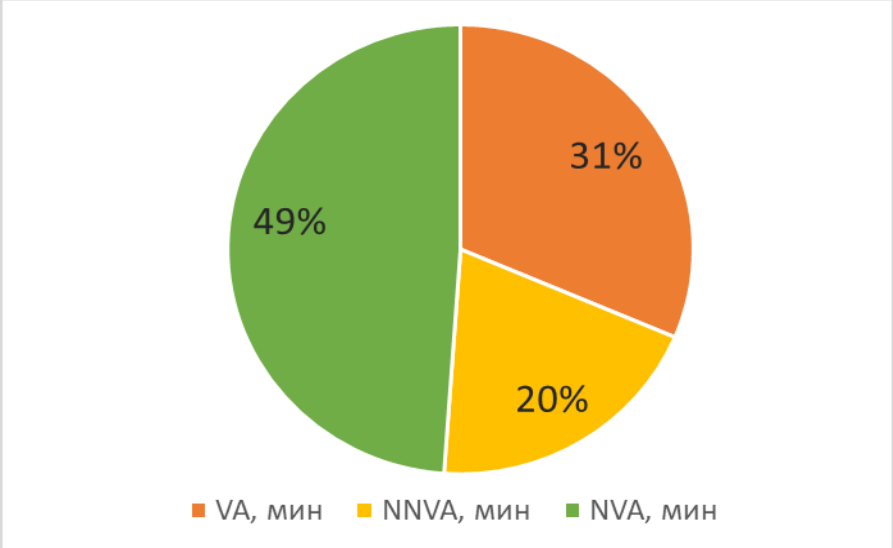


Рисунок 3. Процентное соотношение классов процессов

Figure 3. Percentage of process classes

На основе полученных данных рассчитаем коэффициент полезной занятости:

$$K_{\text{полезн.}} = \frac{VA}{T_{\text{общ}}} = \frac{97}{309} \times 100 \approx 31{,}2\% \quad (1)$$

Используя данные таблицы 10 о протяжённости маршрута оператора, произведём расчёт суммарного пути за смену и времени, затрачиваемого на ходьбу:

Расстояние за 1 цикл:

$$L_{\text{цикла.}} = \sum_{i=1}^{n} d(i, i+1) = 177 \text{ метров}. \quad (2)$$

Где: n – количество перемещений оператора, i=1 - с какого номера начинается расчёт, d(i, i+1) – расстояние между точкой i и следующей точкой i+1, d – функция расстояния, i – номер текущей позиции оператора.

Расстояние за смену (5 циклов):

$$L_{\text{смена.}} = L_{\text{цикла}} \times \text{Количество циклов} = 177 \times 5 = 885 \text{ метров}. \quad (3)$$

Потери времени на ходьбу за смену:

Скорость ходьбы с грузом и без груза примем за:

$$V_{\text{ходьбы}} = 4 \frac{\text{км}}{\text{ч}} = \frac{4000\text{м}}{60}\text{мин} \approx 66{,}7 \text{ м/минут}. \quad (4)$$

$$T_{\text{ходьбы}} = \frac{L_{\text{смена}}}{V_{\text{ходьбы}}} = \frac{885}{66{,}7} \approx 13{,}3 \text{ минут}. \quad (5)$$

Полученные результаты свидетельствуют о низкой эффективности существующей производственной системы: доля полезной занятости составляет лишь 31,2 %, а потери времени на непроизводительные перемещения достигают 13,3 мин за смену. Кроме того, конфигурация траекторий на диаграмме спагетти указывает на неоптимальность планировочных решений. Данные факты обусловливают необходимость реинжиниринга логистики производственного потока.

Для повышения эффективности разработан комплекс мероприятий, направленных на сокращение временных затрат при выполнении операций (табл. 11).

Таблица 11. План мероприятий по сокращению потерь
Table 11. Action plan to reduce losses

Категория потерь	***Действие-потеря (из таблиц 1–8)***	***Инструмент Lean***	***Предлагаемое решение***	***Ожидаемый эффект***
NVA	Оператор идёт к столу мастера за заданием (3 мин)	Визуализация + Канбан	Установить информационную доску с заданиями у каждого рабочего места. Мастер вывешивает сменное задание в MES	Сокращение на 3 мин за цикл
NVA	Оператор идёт на склад заготовок и обратно (6 мин)	Логистика Канбан	Организовать доставку заготовок комплектовщиком к рабочему месту по графику	Устранение ходьбы (6 мин)
NVA	Оператор идёт в инструментальную кладовую за оснасткой и обратно (6 мин)	5S + адресное хранение	Создать инструментальные тумбы (Канбан-ячейки) у каждого станка с необходимым инструментом	Сокращение на 6 мин за цикл
NVA	Оператор идёт в ОТК сдать маршрутный лист (5 мин)	Бережливый офис	Перевести документооборот в цифровой формат (MES), отметки в системе	Сокращение на 5 мин за цикл

NVA	Оператор идёт за визуальным контролёром (4 мин)	Стандартизация	Внедрить автоматизированную систему машинного зрения для контроля шва	Сокращение на 4 мин за цикл
NVA	Оператор ждёт очереди на УЗ-контроль (8 мин)	Выравнивание потока (Heijunka)	Синхронизировать график контроля с производственным циклом, ввести предварительную запись	Сокращение на 8 мин за цикл
NVA	Оператор ждёт остывания камеры (7 мин)	Технологическое перевооружение	Внедрить принудительное охлаждение или параллельную камеру	Сокращение на 7 мин за цикл
NVA	Оператор идёт к мастеру за подписью и обратно (8 мин)	Цифровизация	Электронное подтверждение в MES через планшет	Сокращение на 8 мин за цикл

В текущем состоянии доля VA составляла 31,2 % (97 мин), а чистые потери NVA — 48,9 % (151 мин), вызванные нерациональными перемещениями, ожиданиями и бумажным документооборотом. Разработанный план мероприятий (табл. 11) направлен на устранение этих потерь. Внедрение MES и визуализации заданий исключило ходьбу к столу мастера, на которую оператор затрачивал лишнее время, а организация доставки заготовок комплектовщиком — перемещения на склад. Такие принципы, как 5S и адресное хранения позволили произвести замену центральной кладовую персональными тумбами, расположенными у каждого рабочего места, что полностью устранило возвратные движения за оснасткой. Цифровой документооборот и электронное подтверждение в MES ликвидировали необходимость многократных посещений ОТК и мастера для подписи протоколов. Автоматизация визуального контроля перевела часть NNVA в автоматизированные операции, уменьшив временные затраты. В результате доля NVA снижается на 41 минуту за цикл, а VA возрастает до 44,2 %.

Для повышения эффективности и минимизации излишний перемещений пространственных перемещений оператором, разработана диаграмма спагетти, отражающая рациональную конфигурацию производственного помещения.

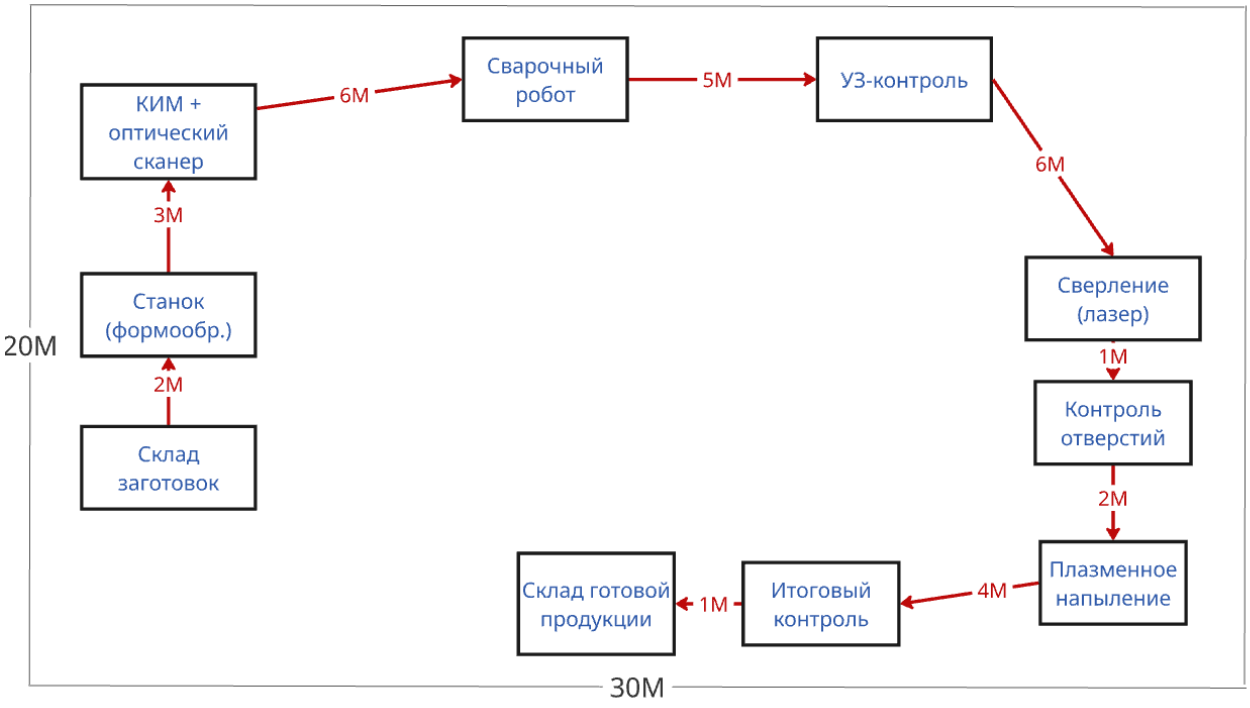


Рисунок 4. Диаграмма спагетти после проведения мер по сокращению потерь
Figure 4. Spaghetti diagram after implementing loss reduction measures

Таблица 12. Последовательность и дистанции передвижений при изготовлении продукции
Table 12. Sequence and distances of movements during product manufacturing

№	*Откуда*	*Куда*	*Расстояние, м*
1	Стеллаж заготовок	Станок	2
2	Станок	КИМ	3
3	КИМ	Сварочный робот	6
4	Сварочный робот	УЗ-контроль	5
5	УЗ-контроль	Сверление	6
6	Сверление	Контроль отверстий	1
7	Контроль отверстий	Плазменная камера	2
8	Плазменная камера	Итоговый контроль	4
9	Итоговый контроль	Стеллаж готовой продукции	1
ИТОГО			**30 м**

После оптимизации:

$$L_{\text{цикла}} = 30 \text{ метров}.$$

Расстояние за смену (5 циклов) :

$$L_{\text{смена}} = 30 \times 5 = 150 \text{ метров}.$$

Потери времени на ходьбу за смену:
Скорость ходьбы с грузом и без груза примем за:

$$V_{\text{ходьбы}} = 4\frac{\text{км}}{\text{ч}} = \frac{4000\text{м}}{60}\text{мин} \approx 66{,}7 \text{ м/минут}.$$

$$T_{\text{ходьбы}} = \frac{885}{66{,}7} \approx 2{,}2 \text{ минут}.$$

Прогнозируемый результат после проведения мероприятий для улучшения:

1. Общее время операции ($Tобщ$: с 309 до 268 минут (сокращение на 41 минуту за счёт устранения чистых потерь NVA).
2. Время создания ценности (VA): с 31,2 % до 44,2 %.
3. Чистые потери (NVA): с 48,9 % до 28,7 %
4. Расстояние перемещений за цикл: со 177 до 30 метров.
5. Потери времени на ходьбу за смену: с 13,3 до 2,2 минут.

Сокращение времени на ходьбу за смену:

$$13{,}3 - 2{,}2 = 11{,}1 \text{ минуты}.$$

За месяцы (22 смены): $11{,}1 \times 22 \approx 244 \text{ минуты} \approx 4{,}1 \text{ часа}$.

За год: около 49 часов рабочего времени оператора, которое может быть направлено на выполнение операций, создающих ценность [9].

Заключение. В результате проведённого исследования разработана и апробирована методика интеграции принципов бережливого производства в производственные системы концепции «Индустрия 5.0» на примере технологической цепочки изготовления камеры внутреннего сгорания авиационного двигателя [11]. Выполнен хронометраж операций с классификацией затрат по категориям, построена и проанализирована диаграмма спагетти текущего состояния [12]. Разработан план мероприятий, направленный на улучшение показателей процессов изготовления камеры сгорания [13]. Предложена оптимизированная конфигурация производственной ячейки. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и могут быть масштабированы на технологические цепочки предприятий различных отраслей [14].

Для масштабирования предложенных мероприятий на другие производственные ячейки необходимо иметь возможность перепланировки производственного помещения по принципу технологической непрерывности, а также возможность внедрение системы, способной цифровизировать документооборот и сделать возможной показ заданий визуально. Ключевым

условием же является - готовность предприятия к реинжинирингу логистических потоков, что включает в себя, как финансовые затраты, так и масштабную переквалификацию персонала. При соблюдении указанных требований предлагаемый подход может быть тиражирован на любые производственные ячейки.

Список использованных источников

1. Холькина, О. С. Проведение картирования потока создания ценности с применением метода хронометража / О. С. Холькина, И. Н. Максимова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2022. – № 2(15). – С. 47-58. – EDN YQAOJJ.

2. Иванова, О. Э. Отчет А3 "Тойота" как инструмент решения проблем в организации / О. Э. Иванова // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. – 2022. – № 3(35). – С. 36-44. – EDN CSWUEW.

3. Ткаченко Иван Сергеевич, Антипов Дмитрий Вячеславович, Куприянов Александр Викторович, Смелов Виталий Геннадиевич, Кокарева Виктория Валерьевна КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЦИФРОВОГО ЗАВОДА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. №3 (113). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnaya-model-tsifrovogo-zavoda-proizvodstvennogo-predpriyatiya-aerokosmicheskoy-otrasli (дата обращения: 15.06.2026).

4. Канюкова, В. П. Бережливое производство: основные инструменты и принципы бережливого производства / В. П. Канюкова // Аллея науки. – 2018. – Т. 1, № 7(23). – С. 642-647. – EDN XWOLZJ.

5. Суворов, А. В. Симбиоз человека и автоматизации в киберфизических производственных системах / А. В. Суворов // I-methods. – 2025. – Т. 17, № 3. – С. 1-15. – EDN IQTTJC.

6. Степан Валерьевич Фадеев ИНСТРУМЕНТЫ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА КАК ФАКТОР ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ КОМПАНИИ // Вестник ВолГУ. Экономика. 2024. №2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/instrumenty-berezhlivogo-proizvodstva-kak-faktor-tsifrovoy-transformatsii-kompanii (дата обращения: 15.06.2026).

7. Бояринцева, М. И. Практика применения бережливого производства на предприятиях авиастроения / М. И. Бояринцева, В. В. Рыжков // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2023. – № 4(70). – С. 5-10. – EDN GDZDRN.

8. Ермоленко Мария Владимировна, Епифанов Вячеслав Викторович Применение концепции бережливого производства с целью повышения эффективности процесса технического обслуживания воздушных судов Ан-124-100 // Вестник УлГТУ. 2014. №3 (67). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kontseptsii-berezhlivogo-proizvodstva-s-tselyu-povysheniya-effektivnosti-protsessa-tehnicheskogo-obsluzhivaniya (дата обращения: 03.04.2026).

9. Китаева О. В. Инструменты бережливого производства в инжинириговых компаниях // Вестник ЮГУ. 2015. №S4 (39). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/instrumenty-berezhlivogo-proizvodstva-v-inzhinirigovyh-kompaniyah (дата обращения: 03.04.2026).

10. Былинович, В. В. Бережливое производство и 7 видов потерь / В. В. Былинович, Д. В. Карачун // Актуальные проблемы науки: взгляд студентов : Материалы Всероссийской с международным участием студенческой научной конференции. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 18 января 2022 года. Том Часть 1. – Санкт-Петербург: Ленинградский государственный университет имени А.С. Пушкина, 2022. – С. 241-243. – EDN QTQYPX.

11. Хуснутдинова, Н. Т. Внедрение "бережливого" производства на предприятии. 7 видов потерь / Н. Т. Хуснутдинова // European Research. – 2016. – № 1(12). – С. 73-74. – EDN VKBBLP.

12. Галин Р. Р., Камешева С. Б. ЭФФЕКТИВНОЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ЕДИНОМ ПРОСТРАНСТВЕ // Известия КБНЦ РАН. 2021. №1 (99). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnoe-funktsionirovanie-kollaborativnoy-robototehnicheskoy-sistemy-v-edinom-prostranstve (дата обращения: 03.04.2026).

13. Шангина, Е. И. цифровые технологии в машиностроении и робототехнике / Е. И. Шангина, Н. Б. Сиразутдинова, Т. Е. Савина // Московский экономический журнал. – 2025. – Т. 10, № 11. – С. 426-437. – DOI 10.55186/2413046X_2025_10_11_268. – EDN RCGHFS.

14. Камешева Сания Болаткызы, Мамченко Марк Владиславович, Галин Ринат Романович РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАБОТ В КОЛЛАБОРАТИВНОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ИХ ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ // Кронос. 2022. №11 (73). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-issledovaniya-raspredeleniya-rabot-v-kollaborativnoy-robototehnicheskoy-sisteme-s-minimizatsiey-ih-vremeni-vypolneniya (дата обращения: 03.04.2026).

Reference

1. Kholkina, O. S. Conducting Value Stream Mapping Using Time Study Method / O. S. Kholkina, I. N. Maksimova // PSUACE Bulletin: Construction, Science and Education. – 2022. – No. 2(15). – Pp. 47-58. – EDN YQAOJJ.

2. Ivanova, O. E. Toyota A3 Report as a Problem-Solving Tool in an Organization / O. E. Ivanova // Current Issues of Economics and Management. – 2022. – No. 3(35). – Pp. 36-44. – EDN CSWUEW.

3. Tkachenko, I. S., Antipov, D. V., Kupriyanov, A. V., Smelov, V. G., Kokareva, V. V. A Conceptual Model of a Digital Factory for a Production Enterprise in the Aerospace Industry // Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2023. No. 3 (113). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnaya-model-tsifrovogo-zavoda-proizvodstvennogo-predpriyatiya-aerokosmicheskoy-otrasli (accessed: 15.06.2026)

4. Kanyukova, V. P. Lean Manufacturing: Basic Tools and Principles of Lean Production / V. P. Kanyukova // Alley of Science. – 2018. – Vol. 1, No. 7(23). – Pp. 642-647. – EDN XWOLZJ.

5. Suvorov, A. V. Symbiosis of Humans and Automation in Cyber-Physical Production Systems / A. V. Suvorov // I-methods. – 2025. – Vol. 17, No. 3. – Pp. 1-15. – EDN IQTTJC.

6. Fadeev, S. V. Lean Manufacturing Tools as a Factor of Digital Transformation of a Company // Vestnik of Volgograd State University. Economics. 2024. No. 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/instrumenty-berezhlivogo-proizvodstva-kak-faktor-tsifrovoy-transformatsii-kompanii (accessed: 15.06.2026)

7. Boyarintseva, M. I. Practice of Applying Lean Manufacturing in Aircraft Building Enterprises / M. I. Boyarintseva, V. V. Ryzhkov // Innovative Economy: Prospects for Development and Improvement. – 2023. – No. 4(70). – Pp. 5-10. – EDN GDZDRN.

8. Ermolenko, M. V., Epifanov, V. V. Application of the Lean Manufacturing Concept to Improve the Efficiency of the An-124-100 Aircraft Maintenance Process // Vestnik of Ulyanovsk State Technical University. 2014. No. 3 (67). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-kontseptsii-berezhlivogo-proizvodstva-s-tselyu-povysheniya-effektivnosti-protsessa-tehnicheskogo-obsluzhivaniya (accessed: 03.04.2026)

9. Kitaeva, O. V. Lean Manufacturing Tools in Engineering Companies // Yugra State University Bulletin. 2015. No. S4 (39). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/instrumenty-berezhlivogo-proizvodstva-v-inzhinirigovyh-kompaniyah (accessed: 03.04.2026).

10. Bylinovich, V. V. Lean Manufacturing and 7 Types of Waste / V. V. Bylinovich, D. V. Karachun // Current Problems of Science: A Student Perspective : Proceedings of the All-Russian Student Scientific Conference with International Participation. In 2 parts, Saint Petersburg, January 18, 2022. Part 1. – Saint Petersburg: Pushkin Leningrad State University, 2022. – Pp. 241-243. – EDN QTQYPX.

11. Khusnutdinova, N. T. Implementation of "Lean" Manufacturing at an Enterprise. 7 Types of Waste / N. T. Khusnutdinova // European Research. – 2016. – No. 1(12). – Pp. 73-74. – EDN VKBBLP.

12. Galin, R. R., Kamesheva, S. B. Effective Functioning of a Collaborative Robotic System in a Shared Workspace // News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of

Sciences. 2021. No. 1 (99). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/effektivnoe-funktsionirovanie-kollaborativnoy-robototehnicheskoy-sistemy-v-edinom-prostranstve (accessed: 03.04.2026).

13. Shangina, E. I. Digital Technologies in Mechanical Engineering and Robotics / E. I. Shangina, N. B. Sirazetdinova, T. E. Savina // Moscow Economic Journal. – 2025. – Vol. 10, No. 11. – Pp. 426-437. – DOI 10.55186/2413046X_2025_10_11_268. – EDN RCGHFS.

14. Kamesheva, S. B., Mamchenko, M. V., Galin, R. R. Results of a Study on Work Distribution in a Collaborative Robotic System to Minimize Completion Time // Chronos. 2022. No. 11 (73). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rezultaty-issledovaniya-raspredeleniya-rabot-v-kollaborativnoy-robototehnicheskoy-sisteme-s-minimizatsiey-ih-vremeni-vypolneniya

INTEGRATION OF LEAN MANUFACTURING METHODS TO OPTIMIZE OPERATION TIMING IN CYBERPHYSICAL SYSTEMS OF COLLABORATIVE MANUFACTURING

Vinnichenko Alexandra V.,
Candidate of Technical Sciences
Associate Professor of the Department of Innovation and Integrated Quality Systems
Department of Innovation and Integrated Quality Systems
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg
E-mail: alex23rain@gmail.com

Lepekhin Artem A.,
Bachelor 2nd year of the GUAP
Department of Innovation and Integrated Quality Systems FGAOU VO "St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation"
St. Petersburg
E-mail: artem040106@mail.ru

© Винниченко А.В., Лепёхин А.А., 2026

УДК 004.9+556.043+551.506

[1]Батмазова А.А., [1]Гайдукова Е.В., [1]Захаров И.Д.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «*HMDISTANCE*»: АВТОМАТИЗАЦИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

[1]Батмазова Анна Александровна
ассистент
кафедры Инженерной гидрологии,
Институт гидрологии и океанологии
ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: batmazovaa@mail.ru

[1]Гайдукова Екатерина Владимировна
кандидат технических наук, доцент
заведующий кафедрой Инженерной гидрологии,
Институт гидрологии и океанологии
ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: oderiut@mail.ru

[1]Захаров Илья
Магистр 2 курса Института гидрологии и океанологии
ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: zahar2807@bk.ru

***Аннотация*.** В статье рассматривается программный комплекс «HMDistance», разработанный для автоматизации гидрометеорологических исследований. Цель публикации — представить архитектуру, функциональные возможности и практическое применение двух модулей программы: модуля подбора репрезентативных метеорологических станций и модуля статистического анализа рядов среднесуточных расходов воды. Описывается реализация программы в среде MatLab, включая расчет расстояний между точками, интерактивную картографическую визуализацию, расчёт статистических характеристик, а также построение годовых и типового гидрографов. Кроме того, описывается структура встроенных баз данных в формате Excel, организация дочерних приложений по территориальному принципу (УГМС) и возможности экспорта результатов в графические форматы.

Ключевые слова: интерактивная карта, MatLab, базы данных, пространственный анализ.

«HMDISTANCE» SOFTWARE PACKAGE: AUTOMATION OF HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH

Annotation. This article discusses the HMDistance software suite, developed for automating hydrometeorological research. The purpose of this publication is to present the architecture, functionality, and practical application of two program modules: a module for selecting representative meteorological stations and a module for statistical analysis of average monthly water discharge series. The program's implementation in the MatLab environment is described, including the calculation of distances between points, interactive cartographic visualization, calculation of statistical characteristics, and the construction

of annual and typical hydrographs. Additionally, the structure of the built-in Excel databases, the organization of subsidiary applications by territorial principle (UGMS), and the ability to export results to graphic formats are described.

Keywords: interactive map, MatLab, databases, spatial analysis.

Введение. Решение большинства задач гидрологических прогнозов и моделирования сопровождается сбором информации не только о состоянии водных объектов, но и о метеорологических условиях на водосборе. Гидрометеорологическая база данных, необходимая для решения тех или иных научных задач, должна быть не только полноценной с точки зрения наличия самих данных, но и показательной для конкретного исследуемого района. Иными словами, у каждого исследуемого водного объекта должна быть одна или несколько репрезентативных метеорологических станций.

Кропотливый поиск репрезентативной метеорологической станции для каждого конкретного озерного или речного поста зачастую занимает непропорционально много времени исследователя, поскольку требует ручного анализа расположения станций, оценки длительности рядов данных, а также экспертного анализа – процесс, по сути, превращается в отдельное исследование [1].

Принимая во внимание все вышеперечисленное, была написана и запатентована программа для ЭВМ «*HMDistance*» [2, 3].

Программа состоит из двух частей: первая – помогает подбирать репрезентативные метеостанции к конкретным гидрологическим постам; вторая – позволяет выполнить статистическую оценку рядов наблюдения за речным стоком. В результате работы первой части программа выдает список и географическую карту расположения метеостанций, находящихся на расстоянии не более 100 км от выбранного гидрологического поста [4, 5]. Вторая часть взаимодействует с базой данных (в формате электронных таблиц) среднесуточных расходов воды рек с возможностью ее дополнения и обновления пользователем. Имеется инструментарий для обработки рядов наблюдения, включающий расчет статистических характеристик, а также построение годовых и типового гидрографов. Данный результат можно сохранить как изображение в любом удобном формате. «*HMDistance*» написана на объектно-ориентированном языке *C*, собрана в приложении *MatLab*, состоит из интерактивных окон, связанных между собой.

1. Базы данных

Основной для первой части «*HMDistance*» послужила база данных речных и озерных гидрологических постов (ГП и ОГП), а также метеорологических станций (МС). Данные представлены в виде таблиц *Excel* и содержат список ГП, ОГП и МС с координатами.

После запуска приложения срабатывает функция *startupFcn*, по результату работы которой пользователь видит на экране персонального компьютера главное окно программы (см. рис. 1).

В функции *startupFcn* объявляется глобальная переменная *gx* для доступа из других частей программы. После этого создаются географические оси с помощью команды *geoaxes* и подгружается карта, на которую будут нанесены все точки. В рассматриваемой программе в качестве подложки используется карта *colorterrain*, но в каталоге *Basemaps* от *Matlab* есть еще 10 видов подложек [6].

В связи с тем, что информация о названиях гидрологических постов и метеорологических станций, а также файлы с их координатами – это отдельные, независимые друг от друга *Excel* таблицы, прописанный в *startupFcn* код последовательно подгружает все эти файлы и с помощью команды *geoplot* выполняет построение всех точек, обозначая каждую категорию (ГП и МС) своим символом.

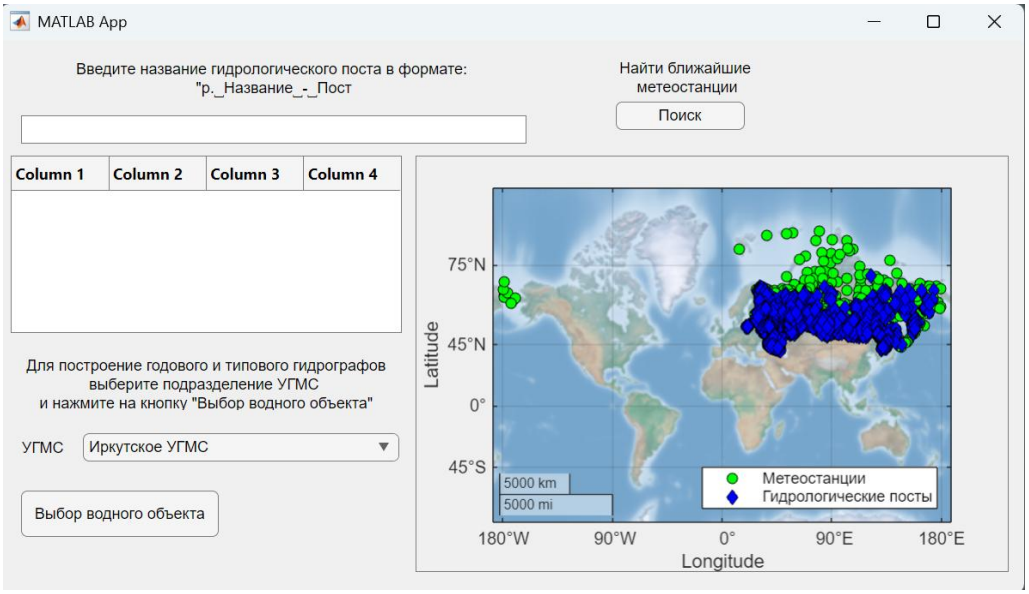


Рисунок 1. Главное окно программы «*HMDistance*»
Figure 1. The main window of the «*HMDistance»* program

Карта и построенные на ней точки – интерактивны. Доступно изменение масштаба и взаимодействие с самими точками, которые подсвечиваются при наведении с помощью команды *SelectionHighlight*, а также отображается всплывающая подсказка, в которой содержится название гидрологического поста или метеостанции, их координаты и площадь водосбора реки, в створе выбранного гидропоста. Пример отображения всплывающих подсказок показан на рисунке 2.

В коде *startupFcn* прописана фиксация географических осей, что позволит, при необходимости, добавить еще одну категорию точек на карту.

Вторая часть программы содержит данные о стоке рек и представлена также в виде таблиц *Excel*. Для формирования этой базы данных с сайта автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов Российской Федерации (АИС ГМВО) были скачаны данные о расходах воды за период с 2008 по 2021 год.

Поскольку с АИС ГМВО данные скачиваются вместе с условными обозначениями, в процессе создания базы данных проводилась обработка, в ходе которой убирались все условные обозначения, а сами таблицы расходов воды форматировались под нужный для *Matlab* формат. База данных структурирована по Управлениям по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС), как показано на рисунке 3, в папках находятся файлы, которые пользователь может дополнять информацией о среднесуточных расходах воды за следующий год и получать значение расхода воды, необходимое для построения типового гидрографа.

2. Подбор метеостанций

Для подбора метеостанций к исследуемому гидрологическому посту необходимо ввести в окно поиска название гидропоста в формате "р.Название-Пост", то есть – \ соблюдая пробелы. Далее нужно нажать на кнопку "Поиск". В таблице на экране отобразятся ближайшие метеостанции: будет указано их название, расстояние до гидрологического поста и широта. На карте, в качестве визуализации результата, будет выполнено построение отрезков от гидропоста к метеостанции. Если при написании названия гидропоста была допущена ошибка, то программа выдаст соответствующее предупреждение. Результат описанных действий изображен на рисунках 4 и 5.

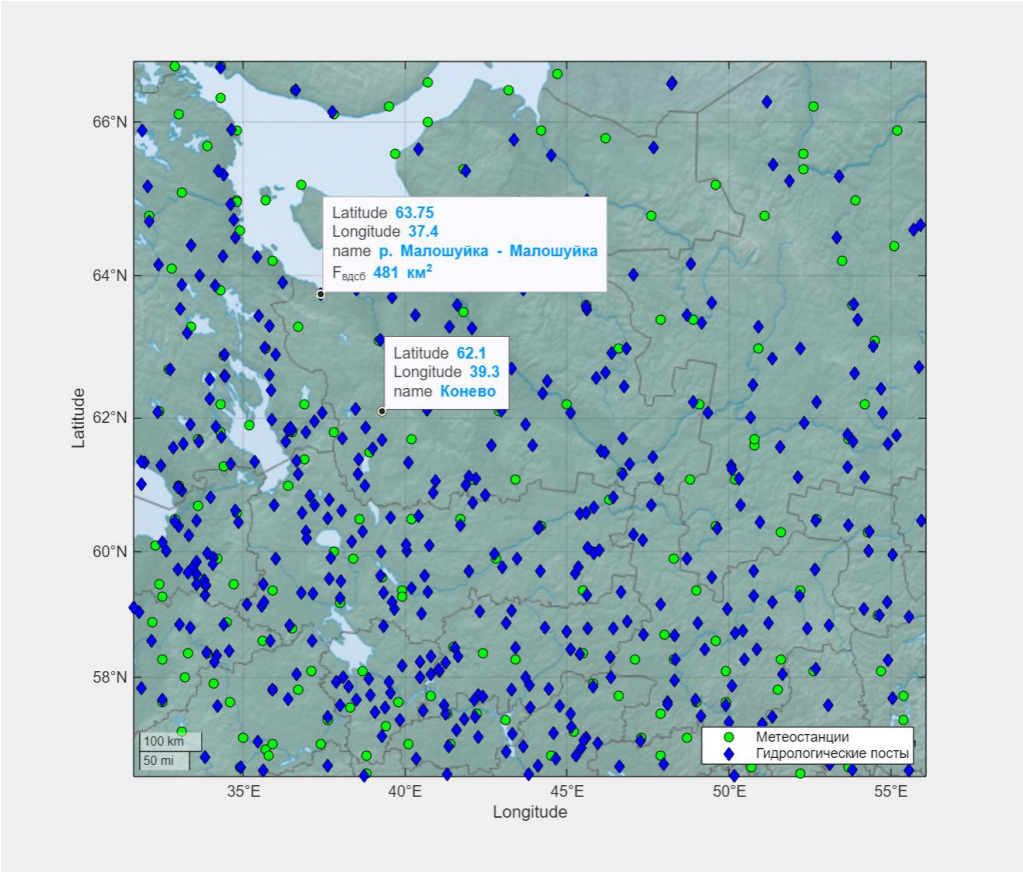


Рисунок 2. Отображение всплывающих подсказок на интерактивной карте программы «*HMDistance*»
Figure 2. Displaying tooltips on the interactive map of the «*HMDistance*» program

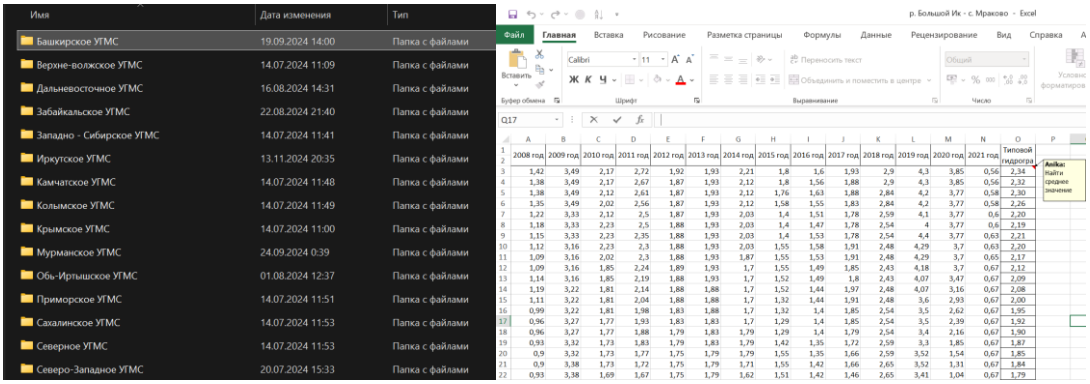
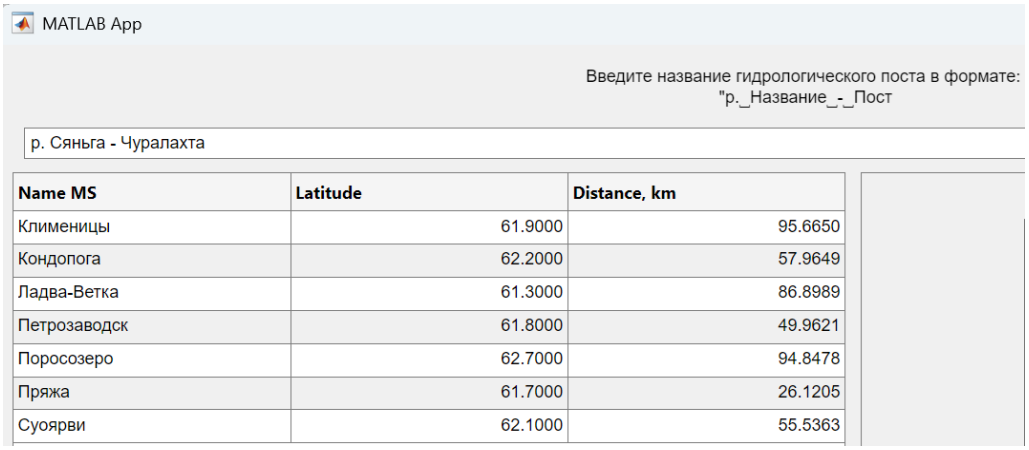


Рисунок 3. Фрагмент базы данных второй части программы «*HMDistance*»
Figure 3. A fragment of the database of the second part of the program «*HMDistance*»

Поиск и построение осуществляются следующим образом:

- Для кнопки "Поиск" объявляется функция *Find*, которая принимает объекты приложения, используя объявленную ранее глобальную переменную *gx*.
- Производится инициализация переменных *tlat* и *tlon* (координаты искомого гидропоста), они устанавливаются в значение, равное -1, что будет соответствовать ошибке "Гидропост не найден". Создается опорный эллипсоид геодезической системы *WGS*84 и задается единица измерений – это необходимо для расчета расстояний.
- Устанавливается пороговое расстояние для поиска метеостанций (переменная *distgpms*).
- Считывается названия гидропоста из поля ввода интерфейса программы.
- Осуществляется загрузка данных из *Excel*-файлов.



Name MS	Latitude	Distance, km
Клименицы	61.9000	95.6650
Кондопога	62.2000	57.9649
Ладва-Ветка	61.3000	86.8989
Петрозаводск	61.8000	49.9621
Поросозеро	62.7000	94.8478
Пряжа	61.7000	26.1205
Суоярви	62.1000	55.5363

Рисунок 4. Подобранные в программе «*HMDistance*» метеостанции в табличном виде, р. Сяньга - Чуралахта
Figure 4. Weather stations selected in the «*HMDistance*» program in tabular form, Syanga - Churalakhta rivers

• Запускается цикл поиска введенного гидропоста. Если название найдено, его координаты сохраняются в переменные *tlat*, *tlon*.

• Производится проверка, найден ли гидропост. Если *tlat*, *tlon* остались равны -1, выводится сообщение об ошибке и цикл завершается.

• Выполняется расчет расстояний от найденного гидропоста до всех метеостанций с помощью функции distance, которая позволяет получить расстояние между точками на сфере или эллипсоиде. Входными параметрами при этом выступают: первый набор координат широты или долготы (*tlat*, *tlon*, то есть координаты гидропоста); аналогично – второй набор, то есть координаты метеостанций; опорный эллипсоид; мера угла (в нашем случае - градусы) [7]. Результат выдается в километрах.

• Производится поиск индексов метеостанций, находящихся в пределах переменной *distgpms* (100 км).

• Заполняется таблица в интерфейсе: создается таблица с именами, координатами и расстояниями для подходящих метеостанций; устанавливаются заголовки столбцов.

• Отрисовываются линии, соединяющие найденный гидропост с каждой подходящей метеостанцией: запускается цикл по индексам найденных станций; формируются массивы координат для линии ГП – МС; на карту добавляется красная пунктирная линия.

Итоговый результат – карту с отрисованными расстояниями – можно сохранить в любом формате изображения.

3. Построение гидрографов и вывод статистики

Из главного окна программы можно перейти к построению годовых и типовых гидрографов. Для этого в выпадающем меню нужно выбрать УГМС, к которому относится исследуемый гидрологический пост, после чего необходимо нажать кнопку "Выбор водного объекта". Для каждого УГМС было написано дочернее приложение, связанное с основным – «*HMDistance*». На рисунке 6 изображено выпадающее меню для выбора водного объекта.

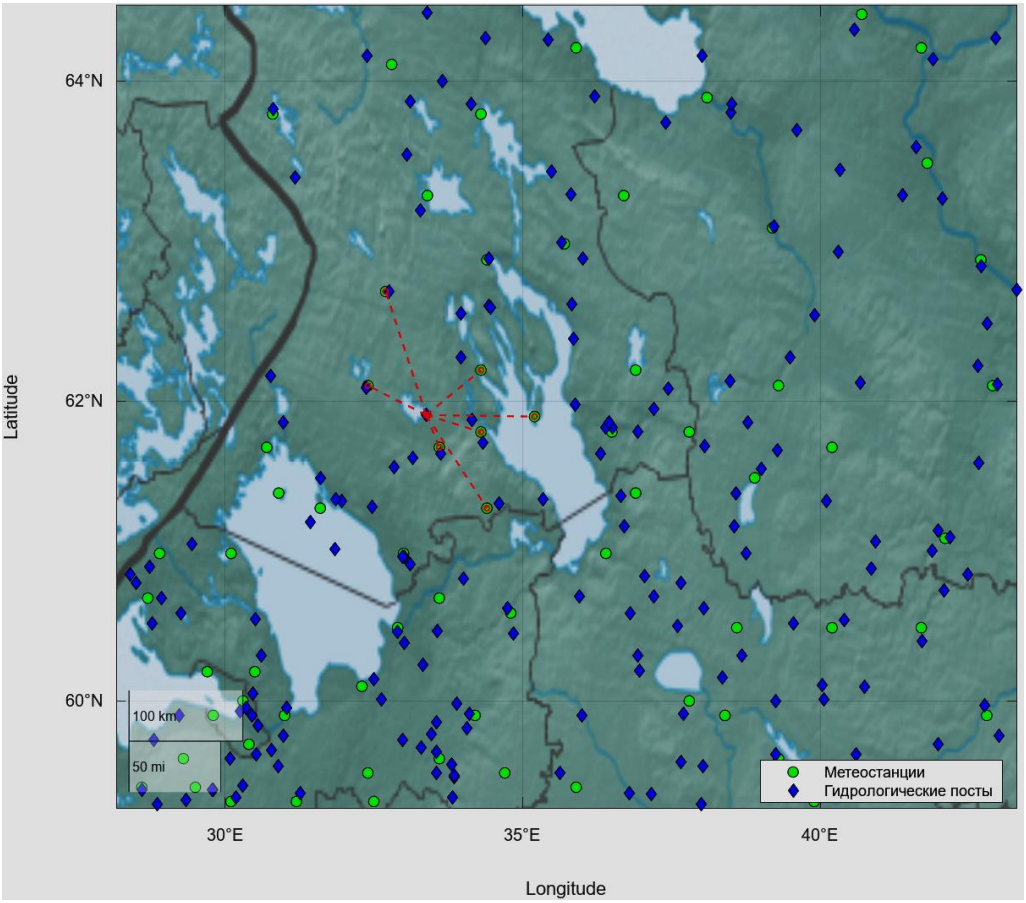


Рисунок 5. Отображение подобранных метеостанций на карте
Figure 5. Displaying selected weather stations on the map

После выбора УГМС программа перенаправляет пользователя в соответствующее мини-приложение, окно которого представляет собой совокупность таких элементов как выпадающее меню – список рек выбранного УГМС, пустая таблица для отображения статистических характеристики, поле для отображения площади водосбора и панель, в которую будут помещены гидрографы (см. рис. 7).

Основной функцией является функция *loadData*, в ходе работы которой осуществляются следующие операции:

- Выбор данных на основе пользовательского ввода: взаимодействие с выпадающим меню позволяет выбрать гидрологический пост. После нажатия кнопки "Построить" в программу загружается соответствующий *Excel*-файл с данными.
- Загрузка и обработка данных: для корректного отображения информации уже на гидрографе данные считываются из *Excel*-файла в таблицу, извлекаются заголовки столбцов, чтобы потом их можно было перенести в легенду гидрографа.
- По загруженным данным о стоке рассчитываются такие статистические характеристики как среднее значение за год, стандартное отклонение, коэффициент вариации и коэффициент асимметрии. С помощью команды *significant* происходит округление полученных характеристик до ближайшего значения с определённым количеством значимых цифр, которое также указывается в качестве входного параметра. Команда *omitnan* в перечне входных параметров позволяет игнорировать значения *NaN* (*Not a Number*, то есть нечисловые) при расчёте статистических показателей. Асимметрия рассчитывается с помощью функции *skewness*, которая выдает точечную оценку коэффициента асимметрии выборки.

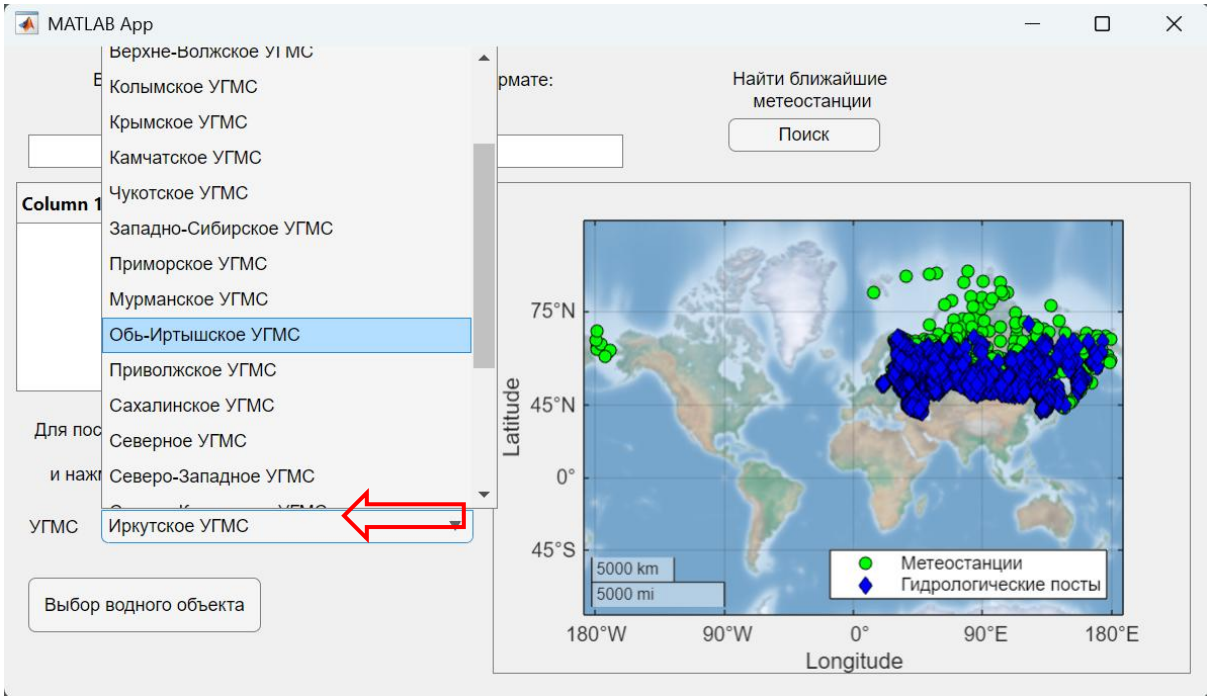


Рисунок 6. Выпадающее меню и кнопка запуска дочернего приложения
Figure 6. Drop-down menu and button for launching a child application

• Отображение результатов в таблице: в пустую таблицу выводятся статистические характеристики; устанавливаются соответствующие названия строк. В поле "$F_{вдсб}$, км^2" автоматически заносится информация о площади водосбора.

• Визуализация данных. Строятся гидрографы по всем столбцам, которые соответствуют годам, тонкими линиями случайных цветов. С помощью функций *max* и *find* находится максимальное значение во всем ряду расходов воды, то есть в ряду с 2008 по 2021 год, и находится индекс самого первого максимального значения – это необходимо для того, чтобы на панели с гидрографами самый был подписан год, в который наблюдался этот расход воды. Последний столбец массива исходных данных всегда заполнен данными, необходимыми для построения типового гидрографа – он отображается на графической панели толстой красной линией. На график также выводится легенда, которую можно перемещать, если она закрывает тот или иной фрагмент гидрографов. Также при наведении курсора на гидрограф можно увидеть координаты точки: *X* соответствует конкретному дню в году, *Y* – значению расхода воды в этот день.

В качестве примера на рисунке 8 изображен результат работы дочерней программы для гидрологического поста Обь-Иртышского УГМС: в выпадающем меню выбран гидрологический пост р. Юконда – д. Шугур, в поле ниже автоматически подставлена площадь водосбора, в таблице указаны рассчитанные статистические характеристики, годом с наивысшим расходом воды за период с 2008 по 2021 является 2014 год – он подписан на графике, а также случайным образом выделенная точка говорит о том, что в 24 сентября (267 день) 2014 года на рассматриваемом гидропосту наблюдался расход равный 55,6 м^3/с.

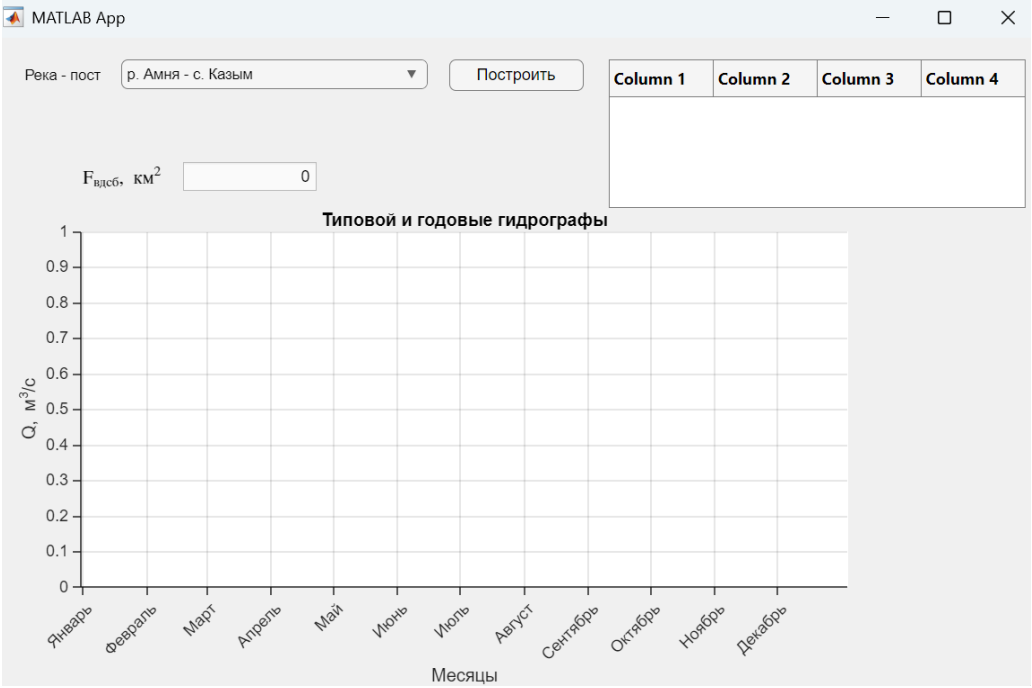


Рисунок 7. Стартовое окно мини-приложения для построения гидрографов, Обь-Иртышское УГМС

Figure 7. The start window of the hydrograph mini-app, Ob-Irtysh Hydrometeorological Center

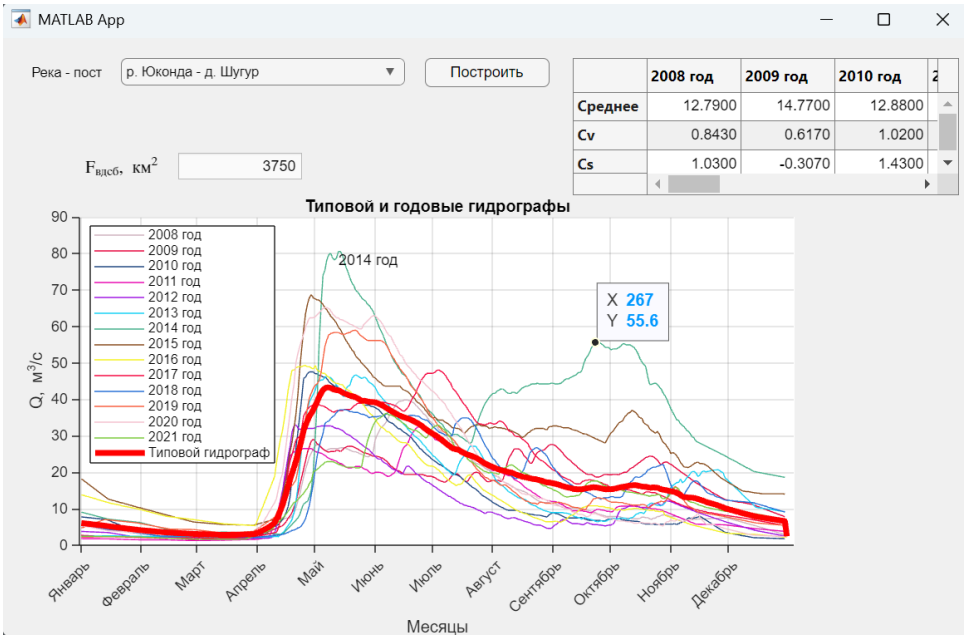


Рисунок 8. Результат работы программы. Обь-Иртышское УГМС, р. Юконда – д. Шугур

Figure 8. The result of the program. Ob-Irtysh UGMS, r. Yukonda – d. Shugur

Аналогичную информацию можно получить, изучив рисунок 9, на котором изображен результат работы программы для Северо-Кавказского УГМС.

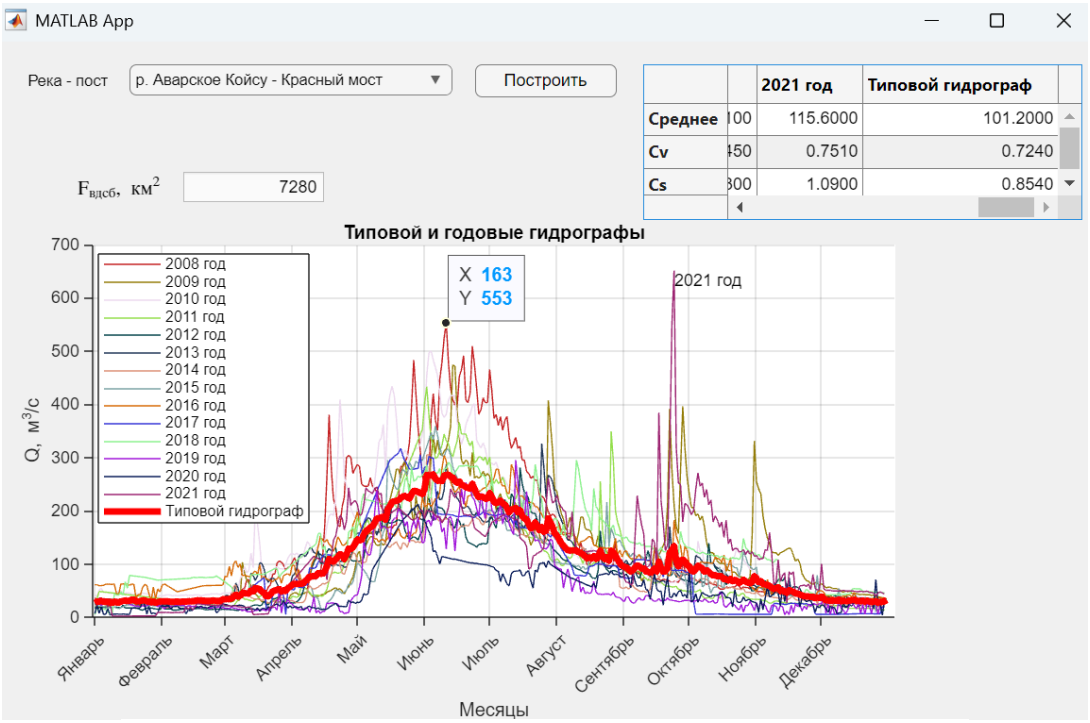


Рисунок 9. Результат работы программы. Северо-Кавказское УГМС, р. Аварское Койсу – Красный мост

Figure 9. Program results. North Caucasus Hydrometeorological Center, Avarskoye Koysu River – Krasny Most

Вывод. В рамках главы была подробно описана архитектура и функциональные возможности программного комплекса «*HMDistance*». Программа представляет собой двухмодульную систему, разработанную на объектно-ориентированном языке *C* в приложении *Matlab*.

- Модуль подбора метеостанций. Его работа основана на отдельных базах, данных в формате *Excel*, содержащих координаты гидрологических постов и метеорологических станций. Ключевой алгоритм использует геодезическую функцию *distance* для расчета расстояний между точками на опорном эллипсоиде *WGS*84. Поиск выполняется в репрезентативном радиусе (100 км) от выбранного ГП. Результаты выводятся в виде таблицы и визуализируются на картографической подложке (например, *colorterrain*) с помощью отрисовки соединяющих отрезков.
- Модуль анализа стока. Реализован в виде набора дочерних приложений, структурированных по УГМС. Функционал включает загрузку и обработку *Excel*-файлов с рядами среднесуточных расходов воды, полученных из АИС ГМВО. Встроенные алгоритмы выполняют расчет статистических характеристик (среднее, стандартное отклонение, коэффициент вариации и асимметрии) с использованием функций *mean*, *std*, *skewness* и обработкой пропущенных значений (*omitnan*). Построение годовых и типового гидрографов осуществляется с автоматическим определением года с максимальным расходом (функции *max* и *find*) и добавлением интерактивных элементов (легенда, отображение координат точек).

Оба модуля объединены единым интерфейсом с поддержкой интерактивности (всплывающие подсказки, изменение масштаба карты) и возможностью экспорта результатов в форматы изображений.

Разработанное программное обеспечение не только автоматизирует трудоемкие процедуры сбора и первичной обработки данных, но и предоставляет инструмент для их наглядного анализа, позволяя существенно сократить временные затраты при решении непосредственных задач.

Список использованных источников

1. Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Киреева М.Б., Ефремова Н.А., Пасынков А.В. Опыт подготовки пространственно распределенных данных для гидрологического моделирования рек России // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2021. - № 6. - С. 6-27.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025691843 Российская Федерация. Программа для анализа гидрометеорологических данных («*HMDistance*»): № 2025689164⁄69; заявлено 23.10.2025; внесено в Реестр программ для ЭВМ 18.11.2025 / Батмазова А.А., Гайдукова Е.В., Захаров И.Д.; правообладатель ФГБОУ ВО РГГМУ.
3. Батмазова А. А. Применение иерархического подхода для моделирования уровенного режима малых и средних озер северо-запада России // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 53. С. 20-38. https://doi.org/10.26516⁄2073-3402.2025.53.20
4. Свод правил СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99* Строительная климатология. М.: Минстрой России, 2020. 234 с.
5. Свод правил СП 482.1325800.2020. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила М.: Стандартинформ, 2020. 42 с.
6. Geoaxes // The MathWorks, Inc. URL: https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/geoaxes.html.
7. Distance // The MathWorks, Inc. URL: https://docs.exponenta.ru/map/ref/distance.html.

Reference

1. Frolova N.L., Agafonova S.A., Kireeva M.B., Efremova N.A., Pasynkov A.V. Experience in preparing spatially distributed data for hydrological modeling of Russian rivers // Water management of Russia: problems, technologies, management. - 2021. - No. 6. - P. 6-27.
2. Certificate of state registration of computer program No. 2025691843 Russian Federation. Program for analysis of hydrometeorological data ("HMDistance"): No. 2025689164⁄69; filed on 23.10.2025; entered into the Register of Computer Programs on 18.11.2025 / Batmazova A.A., Gaidukova E.V., Zakharov I.D.; copyright holder FSBEI HE RSUHMU.
3. Batmazova A. A. Application of a hierarchical approach to modeling the water level regime of small and medium-sized lakes in northwestern Russia // Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series. 2025. Vol. 53. Pp. 20-38. https://doi.org/10.26516⁄2073-3402.2025.53.20
4. Code of Practice SP 131.13330.2020. SNiP 23-01-99* Construction Climatology. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2020. 234 p.
5. Code of Practice SP 482.1325800.2020. Engineering and hydrometeorological surveys for construction. General rules. Moscow: Standartinform, 2020. 42 p.
6. Geoaxes // The MathWorks, Inc. URL: https://docs.exponenta.ru/matlab/ref/geoaxes.html.
7.Distance // The MathWorks, Inc. URL: https://docs.exponenta.ru/map/ref/distance.html.

«HMDISTANCE» SOFTWARE PACKAGE: AUTOMATION OF HYDROMETEOROLOGICAL RESEARCH

Batmazova Anna A.
Assistant Professor
Department of Engineering Hydrology,
Institute of Hydrology and Oceanology
Russian State Hydrometeorological University
St. Petersburg
E-mail: batmazovaa@mail.ru

Gaidukova Ekaterina V.
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Head of the Department of Engineering Hydrology,
Institute of Hydrology and Oceanology
Russian State Hydrometeorological University

St. Petersburg
E-mail: oderiut@mail.ru

Zakharov Ilya D.
2nd year Master degree, Institute of Hydrology and Oceanology
Russian State Hydrometeorological University
St. Petersburg
E-mail: zahar2807@bk.ru

© Батмазова А.А., Гайдукова Е.В., Захаров И.Д., 2026

УДК 658.513.1

[1]Семенов В.А.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА КВАЛИМЕТРИЧЕСКИХ МЕР ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ РИСКОВ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

[1]**Семенов Владислав Анатольевич**
Аспирант 1 курса
Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург
E-mail: vladislav2000_10@mail.ru

Аннотация. В статье предложен методологический подход к разработке квалиметрических мер идентификации динамических рисков критических элементов организационной системы (ОС). На основе концепции перевода показателей качества на безразмерную шкалу разработан комплексный квалиметрический индекс риска, включающий динамическую составляющую. Сформирована четырехуровневая шкала критичности.

Ключевые слова: организационная система, квалиметрический индекс риска, динамический риск, показатель качества

Systems Analysis and Development of Qualimetric Measures for Identifying Dynamic Risks of Critical Elements in an Organizational System

***Annotation*.** The article proposes a methodological approach to the development of qualimetric measures for identifying dynamic risks of critical elements of an organizational system (OS). Based on the concept of translating quality indicators into a dimensionless scale, an integral qualimetric risk index was developed, including a dynamic component. A four-level criticality scale has been formed.

Keywords: organizational system, qualimetric risk index, dynamic risk, quality indicator

Введение. Рассматривая производственные предприятия и их деятельность, можно сделать вывод о том, что работа, как правило, сосредотачивается на устранении отказов, ресурсы же на анализ возникновения причин этих отказов выделяются недостаточные или не выделяются вовсе.

В этой связи задача идентификации рисков переходит из разряда статических аналитических процедур в область динамического мониторинга, требующего квалиметрического инструментария.

Большинство известных квалиметрических моделей ориентированы на статическую оценку и не учитывают динамичность показателей качества критических элементов.

Под критическим элементом организационной системы понимается структурный или функциональный компонент, снижение качественных показателей которого способна привести к системным сбоям или нарушению целевых функций организационной системы. К таким элементам могут относиться ключевые бизнес-процессы, кадровые единицы стратегического уровня, технологические узлы, а также финансово-операционные механизмы.

Цель - разработать систему квалиметрических мер, обеспечивающих своевременную и точную идентификацию динамических рисков критических элементов организационной системы с учетом, как мгновенных значений показателей качества, так и их производных по времени.

По тексту, для упрощения понимания используется сквозной пример - оценка рисков отдела продаж. Рассматриваются показатели качества, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные для отдела продаж
Table 1. Source data for the sales department

Показатель	Норма (min-max)	Текущий период	Прошлый период
Выполнение плана, %	70-100 %	82 %	88 %
Текучесть кадров, %	0-15 %	11 %	8 %
Время закрытия сделки, дней	5-30 дней	22 дня	18 дней

Методы и материалы исследования. Теоретические основы квалиметрии представлены в трудах Г.Г. Азгальдова и Э.П. Райхмана [1], разработавших методологию комплексной оценки качества сложных систем.

Как правило, система функциональных зависимостей определяет единичный показатель качества как:

$$q_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

где q_i - нормализованное значение *i*-го показателя качества безразмерная величина от 0 до 1, где 0 - наихудшее, 1 - наилучшее возможное состояние; x_i - фактическое (измеренное) значение показателя в текущий момент; x_{min} - минимально допустимое значение показателя (нижняя граница нормы); x_{max} - максимально допустимое значение показателя (верхняя граница нормы).

Если показатель по принципу «чем меньше - тем лучше», формула инвертируется. Для агрегирования единичных показателей применяется аддитивная свертка. В работе [3] весовые коэффициенты определяются по методу Фишберна:

$$W_i = \frac{2(n+1-i)}{n(n+1)} \quad (2)$$

где w_i -вес (важность) i-го показателя качества в итоговой оценке; n - общее количество показателей качества; *i* - ранговое место показателя: *i* = 1 означает самый важный, $_i$ = n - наименее важный.

Классическое определение риска, лежащее в основе методологии FMEA:

$$RPN = S \times O \times D \quad (3)$$

где RPN - ранг приоритетности риска (от 0 до 1000); S - значимость последствий (от 0 до 10); O - вероятность возникновения (от 0 до 10); D - вероятность обнаружения имеющимися методами (от 0 до 10).

Серьезное ограничение настоящей формулы в том, что формула оценивает риск в статике - в конкретный момент. Формула не покажет, что ситуация быстро ухудшается. Именно этот недостаток устраняет предлагаемый в данной работе индекс *IRI.*

Анализ работ показывает, что квалиметрические модели оценки качества организационных систем, как правило, статичны и не содержат дифференциального оператора, что ограничивает их применимость для идентификации динамических рисков. Данный пробел и обуславливает необходимость разработки предлагаемого подхода.

От динамических же FMEA-моделей предлагаемый индекс IRI отличается тем, что использует объективные показатели и их скорость изменения вместо повторной экспертной оценки S, O, D. IRI дополняет FMEA на этапе мониторинга, повышая своевременность выявления рисков, но не заменяя этот инструмент.

Результаты исследований и их обсуждение. Каждый критический элемент организационной системы в момент времени *t* характеризуется вектором частных показателей качества:

$$q_i(t) = \{q_{i1}(t), q_{i2}(t), ..., q_{im}(t)\} \quad (4)$$

где $q_i(t)$ - вектор состояния i-го критического элемента в момент времени t - это просто упорядоченный список всех его нормализованных показателей;

$q_{ij}(t)$ - нормализованное значение *j*-го показателя *i*-го элемента в момент t, вычисленное по формуле 1;

m - количество контролируемых показателей (в сквозном примере m = 3); t - момент времени (период наблюдения: день, неделя, квартал - зависит от специфики организации).

Составленный вектор - это «фотография состояния» элемента в данный момент. Сравнивая снимки разных периодов, можно отследить, как менялось состояние элемента.

Для фиксации тренда деградации вводится дискретная производная по времени

$$v_{ij}(t) = \frac{q_{ij}(t) - q_{ij}(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (5)$$

где vij(t) - скорость изменения j-го показателя i-го элемента - насколько быстро улучшается или ухудшается; qij(t) - нормализованное значение показателя в текущем периоде; qij(t−Δt) - нормализованное значение того же показателя в предыдущем периоде; Δt - длина периода мониторинга (1 месяц, 1 квартал и т. д.).

В таком случае полученный результат интерпретируется следующим образом: v > 0 - показатель улучшается (хороший знак); v < 0 - показатель ухудшается (сигнал тревоги); v = 0 - ситуация стабильна.

П р и м е ч а н и е: В качестве пояснения рассчитаны скорости изменения показателей отдела продаж:

Для начала рассчитываются нормализованные значения прошлого и настоящего периода по формуле (1):

$q_1(t-\Delta t) = (88-70)/(100-70) = 18/30 = 0{,}60$

$q_1(t) = (82-70)/(100-70) = 12/30 = 0{,}40$

$q_2(t-\Delta t) = 1 - (8-0)/(15-0) = 1 - 0{,}53 = 0{,}47$

$q_2(t) = 1 - (11-0)/(15-0) = 1 - 0{,}73 = 0{,}27$

$q_3(t-\Delta t) = 1 - (18-5)/(30-5) = 1 - 0{,}52 = 0{,}48$

$q_3(t) = 1 - (22-5)/(30-5) = 1 - 0{,}68 = 0{,}32$

Далее вычисляются скорости (Δt = 1 квартал):

$v_1 = (0{,}40 - 0{,}60) / 1 = -0{,}20 \longrightarrow$ выполнение плана ухудшилось

$v_2 = (0{,}27 - 0{,}47) / 1 = -0{,}20 \longrightarrow$ текучесть кадров выросла

$v_3 = (0{,}32 - 0{,}48) / 1 = -0{,}16 \longrightarrow$ сделки замедлились

Все три показателя ухудшаются - это тревожный сигнал даже без итогового индекса.

На основе аддитивной свертки и с учетом динамической составляющей (5) предлагается комплексный квалиметрический индекс риска:

$$IRI_i(t) = \sum_{j=0}^{m} w_j \times q_{ij}(t) \times [1 + k \times \max(0, -v_{ij}(t))] \quad (6)$$

где IRIi(t) - итоговый индекс риска i-го критического элемента в момент t (чем выше IRI, тем выше риск); wj - вес j-го показателя, рассчитанный по формуле (2); qij(t) - нормализованное значение j-го показателя (из формулы 1); к - коэффициент динамического усиления, к ∈ [0; 1].

Коэффициент динамического усиления служит параметром настройки чувствительности индекса IRI к скорости ухудшения показателей, задается руководителем в зависимости от того, насколько сильно необходимо учитывать не сам факт показателя, а скорость его ухудшения:

1. При отсутствии ретроспективных данных о сбоях и инцидентах принимается к=0,5, что обеспечивает сбалансированный учет текущей величины показателей и их динамики.

2. При наличии статистики инцидентов значение к калибруется таким образом, чтобы IRI пересекал пороговые уровни критичности заблаговременно (например, за один-два периода мониторинга до наступления инцидента), максимизируя долю верно предсказанных критических состояний при допустимом уровне ложных срабатываний.

3. В рамках политики риск-менеджмента организации значение к может быть согласовано с руководством: к ---> 1 для проактивной стратегии, к ---> 0 для более консервативного подхода. Такой

подход позволяет адаптировать индекс IRI к особенностям конкретной организационной системы без потери воспроизводимости расчетов».

В данном случае IRI - взвешенная сумма показателей качества + надбавка за скорость их ухудшения. Если все стабильно - IRI считается как обычно. Если показатели резко падают - IRI растет быстрее, сигнализируя о риске заблаговременно.

П р и м е ч а н и е : В качестве пояснения рассчитаны IRI для отдела продаж, где, ввиду отсутствия статистики, к = 0,5:

Исходные данные: w = {0,50; 0,33; 0,17}, q = {0,40; 0,27; 0,32}, v = {−0,20; −0,20; −0,16}.

Шаг 1. Штрафные множители [1 + к · max(0, −v)]:

Показатель 1: 1 + 0,5 · max(0; 0,20) = 1 + 0,5 · 0,20 = 1,10

Показатель 2: 1 + 0,5 · max(0; 0,20) = 1 + 0,5 · 0,20 = 1,10

Показатель 3: 1 + 0,5 · max(0; 0,16) = 1 + 0,5 · 0,16 = 1,08

Шаг 2. Вклад каждого показателя (w · q · штрафной множитель):

Показатель 1: 0,50 · 0,40 · 1,10 = 0,220

Показатель 2: 0,33 · 0,27 · 1,10 = 0,098

Показатель 3: 0,17 · 0,32 · 1,08 = 0,059

Шаг 3. IRI = 0,220 + 0,098 + 0,059 = 0,377

Для сравнения - без учета динамики (к = 0):

IRI_статич = 0,50·0,40 + 0,33·0,27 + 0,17·0,32 = 0,343

Вывод: динамическая надбавка подняла IRI с 0,343 до 0,377 - это переход из уровня 1 (Умеренный) в уровень 2 (Критический) по шкале таблицы 2. Без учета динамики руководство не получило бы сигнала тревоги в этом периоде.

На основе проведенного анализа предлагается четырехуровневая шкала критичности на основе комплексного квалиметрического индекса (Таблица 2).

Таблица 2. Шкала критичности на основе IRI

Table 2. Criticality scale based on IRI

Уровень	IRI	Наименование	Действия и интерпретация
0	0,00-0,20	Приемлемый	Плановый мониторинг. Все в норме.
1	0,21-0,35	Умеренный	Усиленный контроль. Следить за динамикой.
2	0,36-0,55	Критический	Корректирующие меры обязательны. Отдел продаж сейчас здесь (IRI = 0,377)
3	0,56-1,00	Чрезвычайный	Немедленное вмешательство руководства.

Приведенные границы шкалы IRI могут быть определены квантильным методом на основе эмпирического распределения значений индекса по выборке из наблюдений. В отсутствие достаточной выборки в статье используются предложенные границы.

Корреляция коэффициента IRI и «действий и интерпретаций» также может быть дополнительно откалибрована по историческим значениям IRI, предшествовавшим инцидентам.

Предлагаемый алгоритм объединяет все рассмотренные формулы в единый цикл мониторинга:

1. собрать данные наблюдений. Зафиксировать фактические значения xij для всех показателей каждого критического элемента;

2. нормализовать показатели по формуле (1), получить вектор состояний qi(t) формулы (4) и вычислить скорости vij(t) по формуле (5);

3.рассчитать IRIi(t) по формуле (6) с весами Фишберна (2) и определенным к;

4.сопоставить IRI с порогами шкалы (Таблица 2) и определить уровень 0-3;

5.при уровне 2-3 инициировать корректирующие меры и обновить базу знаний. При 0-1 вернуться к шагу 1.

Заключение. Предложен подход к разработке квалиметрических мер идентификации динамических рисков критических элементов организационной системы.

Разработан комплексный квалиметрический индекс риска в аддитивной (6) форме, объединяющий моментальную оценку качества и скоростную составляющую деградации показателей.

Также разработана четырехуровневая шкала критичности (Таблица 2) с ориентировочными пороговыми значениями IRI и алгоритмом выработки корректирующих мер и построен алгоритм квалиметрической идентификации динамических рисков, включающий формирование вектора состояний, расчет IRI-индексов, сопоставление с порогами критичности и активацию корректирующих мер.

Предложенный индекс IRI обладает рядом преимуществ в задачах оперативного мониторинга критических элементов: он учитывает динамику показателей, позволяет выявлять ухудшение состояния заблаговременно и адаптируется к особенностям организационной системы за счет настройки коэффициента к. При этом IRI целесообразно применять в сочетании с FMEA, где FMEA служит для идентификации видов отказов и их причин, а IRI - для отслеживания динамики показателей и раннего выявления рисков.

Предложенный инструментарий может быть использован для постоянного мониторинга и своевременного принятия необходимых решений высшим руководством, а также при построении систем менеджмента качества организаций, реализующих требования ГОСТ Р ИСО 9001, ГОСТ Р ИСО 31000, а также при разработке цифровых двойников производственных организационных систем.

Список использованных источников

1. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. - М.: Изд-во стандартов, 1973. - 172 с.
2. Азгальдов Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров. Основы квалиметрии. - М.: Экономика, 1982. - 256 с.
3. Trishch R., Petraškevičius V., Šimelytė A., Cherniak O., Lomanov K. Оценка рисков качества продукции квалиметрическими методами с использованием функционально зависимых статистик // Engineering Management in Production and Services. - 2025. - Vol. 17, No. 3.
4. Воронина В. Э., Богданов В. В., Генчиков А. В. Использование математических методов обработки данных при сравнительном анализе динамического техногенного риска промышленных объектов // Аллея науки. - 2022. - С. 220-233.
5. Татьянин М. Н. Выбор динамической модели управления рисками // Экономика и бизнес: теория и практика. - 2024. - С. 101-104.
6. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования. - М.: Стандартинформ, 2015. - 32 с.
7. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. - М.: Стандартинформ, 2019. - 24 с.

Reference

1. Azgaldov G.G., Raikhman E.P. On Qualimetry. - Moscow: Standards Publishing House, 1973. - 172 p.
2. Azgaldov G.G. Theory and Practice of Product Quality Assessment. Fundamentals of Qualimetry. - Moscow: Ekonomika, 1982. - 256 p.
3. Trishch R., Petraškevičius V., Šimelytė A., Cherniak O., Lomanov K. Assessment of product quality risks by qualimetric methods using functionally dependent statistics // Engineering Management in Production and Services. - 2025. - Vol. 17, No. 3.
4. Voronina V.E., Bogdanov V.V., Genchikov A.V. Application of Mathematical Data Processing Methods in Comparative Analysis of Dynamic Technogenic Risk at Industrial Facilities // Alleya Nauki. - 2022. - P. 220-233.
5. Tatyanin M.N. Selection of a Dynamic Risk Management Model // Economics and Business: Theory and Practice. - 2024. - P. 101-104.
6. ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Quality Management Systems. Requirements. - Moscow: Standartinform, 2015. - 32 p.

7. ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Risk Management. Principles and Guidelines. - Moscow: Standartinform, 2019. - 24 p.

Systems Analysis and Development of Qualimetric Measures for Identifying Dynamic Risks of Critical Elements in an Organizational System

Semenov Vladislav A.
1st year Postgraduate
Student of Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg
E-mail: vladislav2000_10@mail.ru

© Семенов В.А., 2026

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

SECTION GEOECOLOGY

УДК 338.488.2:332.142.4

[1]Григорьева Ю. В.

ТЕРРИТОРИАЛЬНЫЙ БРЕНДИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ТУРИСТСКОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ МАЛОГО ПОСЕЛЕНИЯ

[1]Григорьева Юлия Владимировна
магистрант 2 курса, Управление умным городом
Высшая Школа Менеджмента
Санкт-Петербургский государственный университет
г. Санкт-Петербург
E-mail: juliagrotesk@gmail.com

***Аннотация*.** В статье исследуются возможности территориального брендинга для формирования привлекательного целостного образа малого поселения. Приведен пример, в котором предложена концепция территориального бренда «Лопухинская Швейцария», который отсылает к подлинной идентичности, а не создаёт искусственный конструкт. Концепция включает: позиционирование, четыре измерения бренда (функциональное, эмоциональное, социальное, духовное), три целевых аудиторных сегмента с адресными коммуникационными стратегиями, модель идентичности из восьми элементов, визуальную айдентику. Сформулированы практические рекомендации для малых поселений со схожим ресурсным профилем.

Ключевые слова: территориальный брендинг, туристская привлекательность, малое поселение, образ дестинации, идентичность места, радоновые источники.

TERRITORIAL BRANDING AS A TOOL FOR FORMING THE GEOECOLOGICAL TOURIST ATTRACTIVENESS OF A SMALL SETTLEMENT

Annotation. This article examines the potential of territorial branding as a tool for creating a coherent and attractive image of a small settlement. A case study is presented in which the territorial brand concept "Lopukhinskaya Shveytsariya" (Lopukhin's Switzerland) is proposed - a concept grounded in authentic local identity rather than an artificially constructed image. The concept encompasses: brand positioning, four brand dimensions (functional, emotional, social, and spiritual), three target audience segments with tailored communication strategies, an eight-element identity model, and a visual identity system. Practical recommendations are formulated for small settlements with a similar resource profile.

Keywords: place branding, tourist attractiveness, small settlement, destination image, place identity, radon springs.

Введение. Развитие внутреннего туризма в России приобрело особую значимость в условиях переориентации туристских потоков на отечественные направления. В этом контексте малые поселения - деревни, сёла, населённые пункты с численностью жителей до 10 000 человек - представляют собой значительный и до сих пор недостаточно используемый ресурс: они обладают

природным, историко-культурным и рекреационным потенциалом, способным привлечь как самостоятельных путешественников, так и организованные туристские группы.

Федеральный закон № 131-ФЗ 2 выделяет городские и сельские поселения, однако критерий «малого» в нём не определён. В статье малыми считаем поселения с населением до 10 000 человек. Эту границу использует большинство российских исследователей в области регионального развития и туризма.

Численная картина расселения делает проблему малых поселений особенно острой: по данным Всероссийской переписи населения 2020 года, около 74% российских сельских населённых пунктов имеют менее 100 жителей. Всего в России насчитывается более 155 000 сельских населённых пунктов, из которых обитаемы около 130 000. Малые поселения сосредоточены в регионах с богатым природным и историко-культурным потенциалом: исторические сёла Русского Севера, деревни в составе охранных зон, поселения на берегах рек и озёр.

Помимо социально-экономического измерения, привлекательность малых поселений всё чаще определяется их геоэкологическим потенциалом - совокупностью природных характеристик территории, формирующих основу для устойчивого туристского предложения. Во-первых, это геологическое разнообразие и наличие уникальных природных объектов, которые редко встречаются в городской среде и обладают высокой ценностью для специализированных видов туризма - геотуризма и бальнеологического туризма. Во-вторых, это статус территории как объекта природоохранного регулирования: наличие памятников природы или иных охраняемых зон не только ограничивает хозяйственную деятельность, но и служит подтверждением экологической подлинности места, что прямо влияет на восприятие бренда целевой аудиторией. В-третьих, это состояние экосистем и биологическое разнообразие - сохранность ландшафтов, водных объектов и местообитаний редких видов, формирующая основу для экологического туризма и определяющая допустимую рекреационную нагрузку на территорию. В-четвертых, это потенциальная уязвимость геоэкологических ресурсов к антропогенному воздействию: рост туристического потока без соответствующей инфраструктуры способен нанести ущерб именно тем характеристикам территории, которые лежат в основе её туристской привлекательности, что делает геоэкологический фактор не только ресурсом, но и ограничением, требующим учёта при разработке стратегии территориального брендинга.

Туристская привлекательность подобных территорий зачастую не реализована: у местных органов управления нередко отсутствует инструментарий, позволяющий систематически выявлять конкурентные преимущества и отрабатывать ограничения, доносить ценности территории до нужных аудиторий и формировать устойчивый туристский образ.

Поэтому разработка практического инструментария, доступного малым поселениям, является актуальной задачей. Одним из доступных инструментов является территориальный брендинг.

Для практических рекомендаций по формированию территориального бренда малых поселений необходимо систематизировать подходы к территориальному брендингу, образу дестинации и территориальной идентичности, определить специфику малых поселений как объектов брендинга и факторы результативности.

Общие сведения о территориальном брендинге. Территориальный брендинг как направление в управлении и науке сложился в конце 1990-х - начале 2000-х годов. В его основе лежит простая идея: территории, города, регионы, страны - конкурируют за туристов, инвесторов и жителей, и этой конкуренцией можно управлять через создание целенаправленного образа. Ключевую роль в становлении этой области сыграл Саймон Анхольт, который в 2007 году предложил понятие «конкурентной идентичности» и разработал шестиэлементную модель национального бренда: туризм, экспорт, государственное управление, инвестиционная привлекательность, культура и наследие, люди. Анхольт разграничивает бренд и брендинг: бренд - это репутация территории в сознании внешней аудитории, а брендинг - это деятельность по управлению этой репутацией.

[2] Федеральный закон от 06.10.2003 № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» (с изм. и доп.).

Модель ценна и для малых поселений - особенно в части туризма, культуры и наследия: именно здесь небольшие населенные пункты вполне способны конкурировать с крупными [3].

В настоящее время сложились три основных подхода к пониманию территориального бренда [4].

Маркетинговый подход рассматривает бренд как инструмент коммуникации: его цель - донести до аудитории ключевое сообщение о месте и сформировать устойчивые ассоциации. В этом подходе бренд нередко сводится к набору знаков - логотипу, слогану, визуальному стилю - и измеряется через узнаваемость.

Идентичностй подход, напротив, видит в бренде выражение подлинной самобытности места: не то, что администрация хочет показать, а то, что в этом месте действительно есть особенного.

Управленческий подход рассматривает бренд как инструмент координации: общая рамка, внутри которой администрация, бизнес и жители действуют согласованно.

На практике подходы нередко подменяют друг друга: то, что позиционируется как управленческий бренд, зачастую оказывается лишь набором визуальных решений без содержательной основы. Наибольшее признание получил идентичностй подход [5].

В отличие от корпоративного понимания брендинга, где бренд «создаётся» и «доносится» до аудитории, авторы предлагают более сложную модель. По их концепции, бренд места не назначается решением сверху: он возникает в процессе постоянного взаимодействия между тем, что место делает и показывает, и тем, как внешняя аудитория это воспринимает. Эти образ s - внутренний и внешний - не совпадают по умолчанию и требуют постоянного согласования. Ключевой вывод: измерение разрыва между тем, как стейкхолдеры видят свою территорию, и тем, как её воспринимают потенциальные туристы, - это не дополнительное исследование, а первый шаг к осмысленному брендингу.

Для работы с территориальными брендами полезна модель TRbrand [6]. Модель позволяет не только описать существующий бренд, но и найти «незанятые» измерения - реальные характеристики территории, которые пока не используются в коммуникации.

Российская традиция территориального брендинга складывалась под влиянием западных подходов, но имеет свою специфику. Ключевой для российского контекста стала работа Дмитрия Визгалова [7], где впервые поставлен вопрос о бренде как инструменте управления, а не только маркетинга. Д. Визгалов выявил системную проблему: бренд-концепции в России создаются, но не реализуются, потому что нет структуры, которая несла бы ответственность за воплощение.

Существует ещё одна устойчивая проблема: бренды нередко создаются без предварительного изучения того, как место воспринимается целевой аудиторией [8]. В результате образ, который транслирует администрация, не совпадает с тем, что реально существует в голове у туристов.

Важный вклад в понимание территориального брендинга вносит концепция «сотворчества» (co-creation) [9]. Авторы фиксируют принципиальный сдвиг: за последнее десятилетие брендинг мест сместился от модели «управляемого бренда», где администрация контролирует все коммуникации, к модели «соучастного» брендинга, в которой жители, туристы и онлайн-сообщества сами формируют образ через публикации, отзывы и геотеги.

Таким образом, в современной теории территориального брендинга сложился ряд ключевых положений. Бренд места - это не логотип и не слоган, а образ, существующий в сознании аудитории. Он формируется в постоянном взаимодействии между идентичностью места и его восприятием

[3] Anholt, S. Competitive Identity: The New Brand Management for Nations, Cities and Regions / S. Anholt. – Basingstoke : Palgrave Macmillan, 2007.
[4] Глинская, И. Ю. Территориальный брендинг: подходы к определению и российский опыт / И. Ю. Глинская // Региональная экономика: теория и практика. – 2024.
[5] Kavaratzis, M. The dynamics of place brands: An identity-based approach to place branding theory / M. Kavaratzis, M. J. Hatch // Marketing Theory. – 2013. – Vol. 13, № 2. – P. 69–86.
[6] Almeida, P. TBRD: Territorial Brand Research Design matrix / P. Almeida // Place Branding and Public Diplomacy. – 2024.
[7] Визгалов, Д. В. Брендинг города / Д. В. Визгалов. – М. : Фонд «Институт экономики города», 2011. – 160 с.
[8] Кесаонова, В. Л. Территориальный брендинг: зарубежный и российский опыт / В. Л. Кесаонова // Управленческий консалтинг. – 2023. – № 4.
[9] Hanna, S. Place and destination branding: a review and conceptual mapping / S. Hanna, J. Rowley, B. J. Keegan // European Management Review. – 2021. – Vol. 18, № 2. – P. 105–117.

извне - и это взаимодействие никогда не заканчивается. Брендинг - это не разовая кампания, а постоянная управленческая работа, требующая участия разных сторон. Для малых поселений с ограниченными ресурсами наиболее реалистичная стратегия - последовательное продвижение уже существующих уникальных характеристик: природных, исторических, культурных - вместо того чтобы создавать образ с нуля.

Государственная политика в сфере туристского развития малых поселений. Правовое регулирование туристской деятельности в России формирует институциональный контекст, в котором работают органы управления малых поселений. Основным документом является ФЗ № 132 [10]. Закон определяет базовые понятия - туристская дестинация, туристский продукт, туристская инфраструктура - и устанавливает принципы государственной политики в области туризма: поддержка внутреннего и въездного туризма, защита прав туристов, содействие развитию туристской инфраструктуры.

Муниципальный уровень управления туризмом регулируется ФЗ № 131 [11]. Закон относит к вопросам местного значения «создание условий для развития малого и среднего предпринимательства», однако прямого упоминания туризма как обязательной муниципальной функции в нём нет. Это создаёт правовую неопределённость: де-юре развитие туризма не является обязательной функцией органов местного самоуправления, де-факто именно на муниципальном уровне принимаются решения о навигации, событийной программе и взаимодействии с местным бизнесом. Маркетинг территории как системная деятельность до сих пор воспринимается большинством муниципальных администраций как второстепенная задача, никак не обеспеченная [12].

Национальный проект «Туризм и гостеприимство» [13], цель которого к 2030 году увеличить внутренний туристский поток вдвое, до 140 миллионов поездок в год, и расширить географию туризма. Проект ориентирован не только на курортные центры, но и на сельский и экологический туризм: в его структуре выделены федеральные проекты «Развитие сельского туризма» и «Экотуризм», адресованные малым поселениям.

Федеральный закон № 318-ФЗ [14], создает правовую основу поддержки агротуризма и разрешает сельскохозяйственным производителям оказывать туристские услуги на территории фермерских хозяйств без получения отдельной лицензии.

С 2022 года запущена программа грантовой поддержки агротуристических проектов Министерства сельского хозяйства. Ленинградская область вошла в число пилотных регионов: ряд хозяйств получили федеральные гранты и вошли в реестр агротуристических объектов.

В Ленинградской области действует государственная программа «Развитие внутреннего и въездного туризма в Ленинградской области», включающая подпрограммы поддержки экологического туризма, создания инфраструктуры и продвижения региона.

Стратегия пространственного развития Российской Федерации до 2025 года, определяет приоритеты туристско-рекреационного развития и впервые вводит понятие «туристско - рекреационный кластер» - форму организации туризма, объединяющую несколько территорий в единое пространство.

Для малых поселений ключевым инструментом получения государственной поддержки является участие в федеральных и региональных конкурсах и грантовых программах. Характерная особенность этих механизмов - требование наличия сформулированной концепции развития территории и обоснования её привлекательности для туристов.

[10] Федеральный закон от 24.11.1996 № 132-ФЗ «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» (с изм. и доп.).
[11] Воскресенская, О. В. Маркетинг территорий как фактор социально-экономического развития / О. В. Воскресенская // Вопросы управления. – 2024. – № 2.
[12] Национальный проект «Туризм и гостеприимство» (2024–2030). – М. : Правительство Российской Федерации, 2023.
[13] Национальный проект «Туризм и гостеприимство» (2024–2030). – М. : Правительство Российской Федерации, 2023.
[14] Федеральный закон от 02.07.2021 № 318-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об основах туристской деятельности в Российской Федерации" и статью 7 Федерального закона "О развитии сельского хозяйства"».

Нормативно-правовая база в сфере туристского развития малых поселений за последние годы существенно расширилась, однако сохраняются системные ограничения:

1) Отсутствие прямого указания на туризм как муниципальную функцию в ФЗ № 131 создает правовую неопределённость.

2) Конкурсный характер большинства инструментов поддержки ставит малые поселения без сформированного бренда в заведомо слабую позицию.

3) Ограниченность кадров и компетенций муниципальных администраций не позволяет в полной мере воспользоваться открывающимися возможностями.

Туристская привлекательность. Термины «туристская привлекательность» и «туристическая привлекательность», определены в ФЗ № 132 [15].

Рассматриваются три группы туристской привлекательности дестинации [16]:

1) Природно-ресурсные и историко-культурные факторы, которыми место располагает по природным и историческим условиям.

2) Инфраструктурные факторы, которые создаются управленческими усилиями.

3) Факторы управления и продвижения, которые говорят, что место с уникальными природными активами, но без управления ими, не становится привлекательным само по себе.

Первое звено цепочки - переход от уникального ресурса к территориальному продукту [17]. Природный объект, историческое событие или культурная практика сами по себе ещё не создают туристского потока. Чтобы они превратились в работающий актив, их нужно упаковать в территориальный продукт: создать инфраструктуру доступа, разработать нарратив, выстроить точки контакта с туристом. Территориальный продукт - это то, что туристу предлагается: маршрут, событие, опыт, впечатление. Без продукта ресурс остаётся потенциалом на бумаге: он есть, но воспользоваться им невозможно. Второе звено - переход от территориального продукта к территориальному бренду [18]. Территориальный продукт предлагается, бренд остаётся в голове у аудитории после взаимодействия с этим предложением.

Для малых поселений создание устойчивого бренда - необходимое условие конкуренции за туриста, потому что места без образа не попадают в список выбора.

Модель образа дестинации [19] включает элементы. Когнитивный - знания о месте: наличие природных объектов, исторических памятников, уровень инфраструктуры. Аффективный - чувства по отношению к месту, вызываемые эмоции, насколько кажется привлекательным, живым или монотонным. Конативный - поведенческое намерение: готов ли турист приехать, вернуться, рекомендовать другим. Все три компонента связаны: когнитивный образ влияет на аффективный, аффективный - на конативный.

Высокий природный потенциал при нулевой осведомлённости даёт нулевой туристский результат именно этот разрыв между объективным потенциалом и реальным образом места в голове туриста призван устранить территориальный бренд.

Концепция со-создания образа дестинации (co-creation of destination image) в работах Romero-García M.J. и соавторов (2020) показывает: образ места формируется не только через официальную рекламу, но и через органические источники - отзывы знакомых, публикации в социальных сетях, пользовательский контент.

В итоге ясно, что территориальный бренд влияет на туристскую привлекательность через осведомлённость - бренд делает место видимым, через образ - устойчивый позитивный образ снижает риски и повышает готовность к визиту, через лояльность - сильный бренд создаёт повторные визиты и рекомендации, через координацию - бренд объединяет действия администрации, бизнеса и местного сообщества, что повышает качество туристского опыта.

---

[15] Федеральный закон от 24.11.1996 № 132-ФЗ «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» (с изм. и доп.).

[16] Кирьянова, Л. Г. Туристская привлекательность дестинации: факторы и методы оценки / Л. Г. Кирьянова // Известия Томского политехнического университета. – 2012.

[17] Фролова, Е. В. Управление туристским потенциалом сельских территорий / Е. В. Фролова, Е. Е. Кабанова // Государственное и муниципальное управление. Учёные записки. – 2017.

[18] Kavaratzis, M. The dynamics of place brands / M. Kavaratzis, M. J. Hatch // Marketing Theory. – 2013. – Vol. 13, № 2. – P. 69–86.

[19] Baloglu, S. A model of destination image formation / S. Baloglu, K. McCleary // Annals of Tourism Research. – 1999. – Vol. 26, № 4. – P. 868–897.

Именно поэтому территориальный бренд рассматривается как управленческий инструмент, а не как маркетинговый артефакт. Один из важных механизмов связи бренда с туристской привлекательностью - понятие воспринимаемого риска. Выбирая незнакомое место, турист не может заранее знать, что его там ждёт.

Для малых поселений, не располагающих широкой известностью или рекламным бюджетом, формирование бренда становится главным способом снизить этот барьер в глазах потенциального посетителя.

Переход от идентичности к туристскому продукту требует отдельного усилия. Туристский продукт - это то, что турист потребляет: совокупность впечатлений, услуг и взаимодействий, которые он получает в ходе визита. Он включает аттракторы (ради чего приезжают), доступность (транспорт, информация), условия пребывания (размещение, питание, безопасность) и общую атмосферу места.

Важна связность всех этих элементов: отдельные привлекательные объекты без единого нарратива и объединенного предложения не создают устойчивого туристского продукта. Туристский продукт - образ складывается из двух измерений. Атрибутивное - оценка конкретных характеристик: природных объектов, цен, безопасности, инфраструктуры. Холистическое - общее впечатление от места как целого: его атмосфера, «дух», неповторимый характер. Каждое из этих измерений может быть функциональным (измеримым) или психологическим (ощущаемым).

Для брендинга это означает: брендинговая концепция территории должна работать на обоих уровнях - и давать конкретную информацию об объектах, и создавать эмоциональный образ.

Гастрономический туризм в малых поселениях растёт именно потому, что местная еда и ферма создают уникальный опыт, которого нет в городе [20].

Таким образом, процесс формирования бренда на основе идентичности предполагает последовательное движение: от описания ресурсов территории - к их интерпретации как ценностей - к созданию туристского продукта - к коммуникации через образ в сознании аудитории. Это движение не является линейным и одноразовым: оно цикличное, поскольку образ места меняется вместе с изменениями в обществе, рынке и самой территории.

Управленческая задача состоит в том, чтобы обеспечить связность этого процесса на всех его этапах.

К типичным управленческим проблемам малых поселений в сфере туристского развития относятся. Отсутствие целостного туристского продукта: отдельные объекты есть, но они не связаны единым нарративом. Слабое информационное присутствие: поселения практически не представлены на туристских платформах, в социальных сетях, не имеют актуальных сайтов. Отсутствие навигации на месте: турист, который каким-то образом узнал о поселении и приехал, не понимает, что смотреть и куда идти. Отсутствие координации: нет ни организации, ответственной за туристское развитие, ни механизма для взаимодействия между участниками. Сезонность, усугублённая отсутствием событийной программы.

Выделяют четыре основные группы стейкхолдеров брендинга малого поселения: администрация, местный бизнес и некоммерческие организации, местное сообщество (жители) и внешние аудитории (туристы и потенциальные инвесторы).

Для небольших мест важнее не внешняя узнаваемость бренда, а то, насколько сами жители с ним себя идентифицируют [21]. Когда жители гордятся своим местом и готовы рассказывать о нём гостям - бренд получает самый эффективный канал коммуникации: личную рекомендацию.

Туристы как стейкхолдеры бренда выполняют двойную роль: они являются «арбитрами» бренда - их восприятие проверяет, насколько транслируемый образ соответствует реальному опыту, - и одновременно создают образ через пользовательский контент.

За последнее десятилетие отзывы, публикации и геотеги стали главным каналом формирования образа дестинации: туристы доверяют им значительно больше, чем официальным

[20] Briciu, V.-A. Small Towns and Place Branding: A Systematic Literature Review / V.-A. Briciu, A. Briciu // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 21. – Art. 9113.
[21] Swain, D. Place branding in small towns / D. Swain, L. van Huystee, A. Hernandez-Garcia // Town Planning Review. – 2024.

материалам [22]. Концепция «брендингового лидерства» описывает роль ключевого участника, способного инициировать и поддерживать брендинговый процесс. Именно наличие такого «брендингового лидера» - человека или организации, берущей на себя координирующую роль, - нередко является решающим фактором для запуска брендинга в небольшом поселении [23]. В российском контексте такими лидерами часто выступают не администрации, а местные предприниматели, активисты или общественные организации.

Интегральная модель оценки брендинговой стратегии малого поселения включает четыре ключевых измерения: ресурсную базу (что реально есть у территории), институциональную состоятельность (кто несёт ответственность за реализацию), нормативную связность (насколько последовательно транслируется образ) и специфичность целевой аудитории (на кого конкретно рассчитан бренд). Поселения, которые успешно сочетают все четыре измерения, демонстрируют устойчивый рост туристской привлекательности.

Пример формирования территориального бренда деревни Лопухинка. Ресурсный потенциал деревни Лопухинка рассматривается как многоуровневая система, включающая природно-экологические активы, историко-культурное наследие, административно-инфраструктурный контекст и социально- экономическую базу. Каждый из этих уровней анализируется с позиций модели TRbrand Classification Model 24, что позволяет не просто инвентаризировать имеющиеся ресурсы, но и соотнести их с типологией успешных территориальных брендов, установив, какие из имеющихся активов Лопухинки обладают наибольшим брендообразующим потенциалом.



Рисунок 1. Соотнесение уровней ресурсного потенциала деревни Лопухинка с типологиями модели TRbrand Classification Model

Figure 1. Correlation of the resource potential levels of Lopukhinka village with the typologies of the TRbrand Classification Model

Из тринадцати типологий модели наибольшим брендообразующим потенциалом для Лопухинки обладают четыре: географический территориальный бренд - за счёт уникального природного происхождения радоновых вод; многомерный территориальный бренд - в его экологическом измерении; функциональный территориальный бренд - в туристическом и рекреационном профиле; персонифицированный территориальный бренд - через эмоциональные и таинственные ассоциации образа «Лопухинской Швейцарии».

[22] Torres-Pruñonosa, J. Intellectual structure of destination image research in tourism (2001–2023) / J. Torres-Pruñonosa [et al.] // Journal of Travel & Tourism Marketing. – 2024.
[23] Almeida, P. Territorial brand and regional development: a transdisciplinary analysis / P. Almeida // Place Branding and Public Diplomacy. – 2023. – Vol. 19, № 3.
[24] Almeida, G. G. F. d. Discussions between place branding and territorial brand in regional development / G. G. F. d. Almeida, L. Cardoso // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – Art. 6669.

Деревня Лопухинка расположена в Ломоносовском районе Ленинградской области, на территории Лопухинского сельского поселения, включающего 13 населённых пунктов с численностью населения около 3 000 человек. Административный центр поселения находится в 80 км к юго-западу от Санкт-Петербурга. Транспортная доступность общественным транспортом из Санкт-Петербурга является удовлетворительной. Лопухинка является скорее транзитной точкой перед посещением крепости Копорье, чем самостоятельный туристический аттрактор.

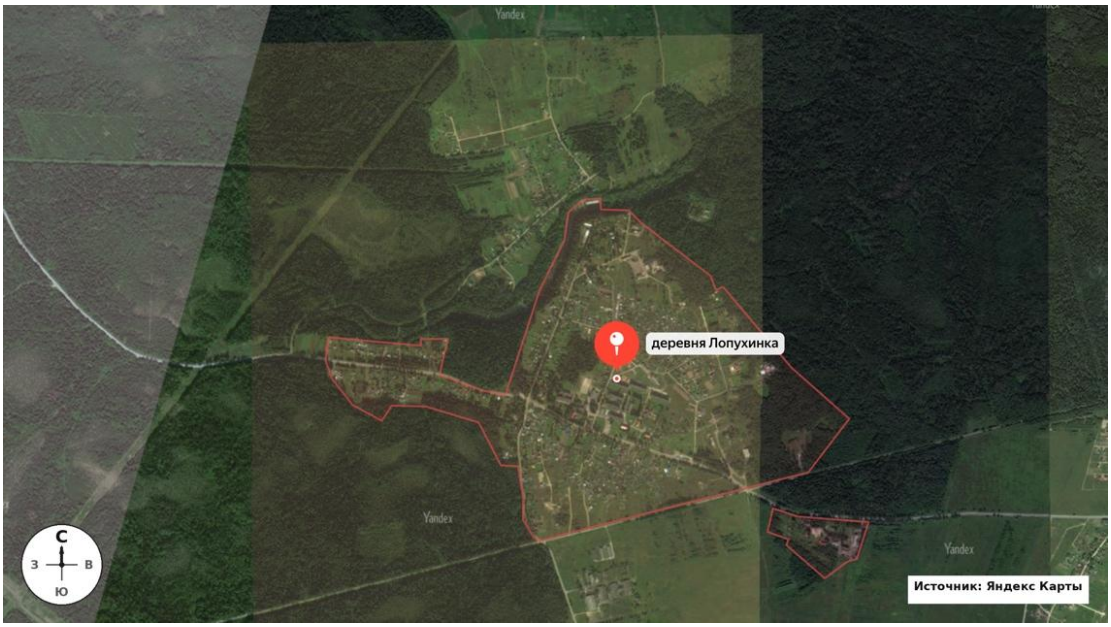


Рисунок 2. Спутниковый снимок деревни Лопухинка с административной границей (Ломоносовский район, Ленинградская область). Источник: Яндекс Карты, 2026.
Figure 2. Satellite image of Lopukhinka village with the administrative border (Lomonosovsky district, Leningrad region). Source: Yandex Maps, 2026.

Ландшафт территории формировался в постледниковый период и определяется сочетанием ордовикских известняков и кембрийско-ордовикских песчаников - геологической основы, создавшей уникальные гидрологические условия. Рельеф местности характеризуется чередованием пологих склонов и речных долин, что в сочетании с развитой растительностью формирует выраженный живописный характер ландшафта. Природная среда является определяющим контекстом для главного туристского актива Лопухинки - памятника природы регионального значения «Радоновые источники и озёра у деревни Лопухинка». Окружающие озёра леса - преимущественно смешанные, с преобладанием ели и берёзы - в летний период создают характерный рекреационный образ, резко контрастирующий с урбанистической средой Санкт-Петербурга. Именно этот ландшафтный контраст - близость к мегаполису при ощущении полного отрыва от городской среды - является одной из наиболее устойчивых потребительских ценностей, отмечаемых посетителями в отзывах.

Геологическое строение территории. Геологическое строение района Лопухинки определяется стратиграфической последовательностью, сформировавшейся в ордовикский и кембрийский периоды палеозойской эры. Коренные породы представлены ордовикскими известняками и доломитами, залегающими на кембрийских синих глинах и песчаниках. Именно контакт водоносных горизонтов, приуроченных к трещиноватым известнякам, с подстилающими водоупорными глинами обусловил формирование восходящих источников с характерным химическим составом воды. В четвертичный период территория неоднократно покрывалась ледниковым щитом; отступление последнего оледенения около 12 000 лет назад оставило выраженный моренный рельеф: гряды холмов чередуются с замкнутыми котловинами, занятыми озёрами и болотами. Ордовикский уступ - так называемый глинт - формирует характерные для региона обрывистые берега и живописные водопады на небольших реках. Для туристского позиционирования Лопухинки геологический фактор принципиально важен: он объясняет происхождение радоновых источников как природного феномена, а не случайного явления, и тем

самым придаёт уникальному ресурсу научную и образовательную ценность, востребованную в нишах экотуризма и геотуризма.

Геоэкономическая ценность и радоновые источники. Радоновые источники Лопухинки представляют собой редкий природный феномен на Северо-Западе России. Радон (Rn-222) поступает в подземные воды из урансодержащих пород ордовикского горизонта и придаёт воде характерный бирюзово-изумрудный оттенок, обусловленный также высоким содержанием ионов железа и специфическим преломлением света в слабоминерализованной воде. Концентрация радона в источниках Лопухинки относится к категории слабо- и среднерадоновых вод (от 5 до 40 нКи/л), что соответствует бальнеологическому стандарту для лечебно-оздоровительного применения - именно такие воды использовались ещё в XIX веке при устройстве первого в России радонового курорта на этой территории. Памятник природы регионального значения «Радоновые источники и озёра у деревни Лопухинка» охраняется в соответствии с региональным законодательством Ленинградской области; любое хозяйственное воздействие в границах охранной зоны требует согласования с профильным комитетом. С экологической точки зрения территория включает несколько биотопов: прибрежно-водный (берега радоновых озёр с зарослями тростника и рогоза), лесной (смешанный ельник и берёзово-осиновые колки), луговой (пойменные участки реки Лопухинки). Видовое разнообразие птиц и амфибий в охранной зоне памятника природы фиксируется на уровне, характерном для ненарушенных экосистем Ленинградской области, что подтверждает целостность природного комплекса. Режим охраны одновременно является ограничением для инфраструктурного развития и конкурентным преимуществом бренда: статус охраняемой природной территории служит подтверждением подлинности и нетронутости природной среды - именно того качества, которое востребовано целевой аудиторией в формате осознанного туризма.

Историческое наследие Лопухинки обладает глубиной и брендообразующим потенциалом, практически не задействованным в современной туристской коммуникации. История этих мест уходит корнями в петровскую эпоху. В 1747 году деревня, тогда называвшаяся Сергиевской, была пожалована Никите Ивановичу Лопухину - представителю знатного дворянского рода, связанного с Евдокией Лопухиной, первой женой Петра I.

Поэт Нестор Кукольник, побывавший в усадьбе, запечатлел её в своих воспоминаниях, назвав «Швейцарией с висячими рощами и садами» - образ, который впоследствии закрепился как устойчивый эпитет местности.

Природный и исторический потенциал Лопухинки существенно усиливается её пространственным контекстом, как в масштабе района, так и в масштабе собственного муниципального образования. В непосредственной близости от деревни расположены Петергоф (около 30 км по прямой) и Ломоносов (около 25 км). Это создаёт условия для включения Лопухинки в составные региональные маршруты в качестве природно-исторической точки отдыха между музейными комплексами.

В интернет-пространстве одновременно существуют несколько конкурирующих версий образа Лопухинки: «озеро с необычной водой», «руины старой усадьбы», «форелевая ферма», «экологическая тропа» - каждая из этих версий описывает реальный аспект места, но ни одна не предлагает интегрирующего, брендообразующего нарратива, который связал бы природу, историю и актуальное туристское предложение в единый образ (petersburglike.ru, 2014).

Обобщая описание ресурсного потенциала деревни Лопухинка, можно выделить четыре ключевых актива, обладающих брендообразующим потенциалом. Во-первых, уникальный природный феномен - радоновые озёра с характерной бирюзово-изумрудной водой, обустроенная экологическая тропа и статус регионального памятника природы, создающие основу для «природного» измерения бренда. Во-вторых, исключительная историческая глубина - связь с петровской эпохой через род Лопухиных, история первого бальнеологического курорта России, имена Пирогова и Беллинсгаузена, топоним «Русская Швейцария» - формирующая историко-нарративное измерение бренда. В-третьих, пространственная синергия с крупнейшими туристскими объектами Ленинградской области, позволяющая включить Лопухинку в составные маршруты. В-четвёртых, наличие живого, пусть и небольшого, экономического ядра в непосредственной близости ко всем туристическим аттракторам в виде форелевой фермы - точки, вокруг которой возможно постепенное наращивание туристского сервиса. Все четыре актива соответствуют типологическим

измерениям TRbrand Classification Model: природному, историческому, географическому и гастрономически-рекреационному.

С целью формирования бренда качественный анализ проведен в форме опроса неструктурированной мини-фокус-группы, на территории экологической тропы «Радоновые озёра» деревни Лопухинка. Ключевые паттерны, выявленные на качественном этапе: стихийность привлечения аудитории без управляемой коммуникации; семантический разрыв вокруг маркера «радон»; инфраструктурные барьеры повторного визита; неоднородность аудиторных сегментов; потенциал партисипаторного вовлечения посетителей.

Количественный этап реализован в форме структурированного онлайн-опроса, проведённого в мае 2025 года. Выборка составила 150 человек (N=150). Инструментарий опроса включал: блок вопросов об осведомлённости и опыте посещения; семантический дифференциал (6 биполярных шкал 1–7, Osgood, 1957) для измерения аффективного образа территории без вводной информации; блок о предпочтительных форматах отдыха и факторах выбора дестинации; открытые вопросы о свободных ассоциациях и воспринимаемых привлекательных и отталкивающих характеристиках; блок о намерении посетить после прочтения краткого описания территории; социально-демографический блок.

Демографический профиль выборки: 61% - женщины, 39% - мужчины; преобладающие возрастные группы - 25–34 года (43%) и 18–24 года (27%); 79% проживают в Санкт-Петербурге, 15% - в Ленинградской области; 41% имеют средний уровень дохода, 33% - высокий; 59% располагают автомобилем. Выборка отражает типичный профиль потенциальной аудитории петербургского пригородного туризма.

Первый блок результатов касается уровня осведомлённости о территории. Подавляющее большинство участников - 82 человека, или 54,7% выборки - слышат о деревне Лопухинка впервые; 14% (21 человек) что-то слышали, но не уверены; лишь 31,3% (47 человек) знают об этом месте.

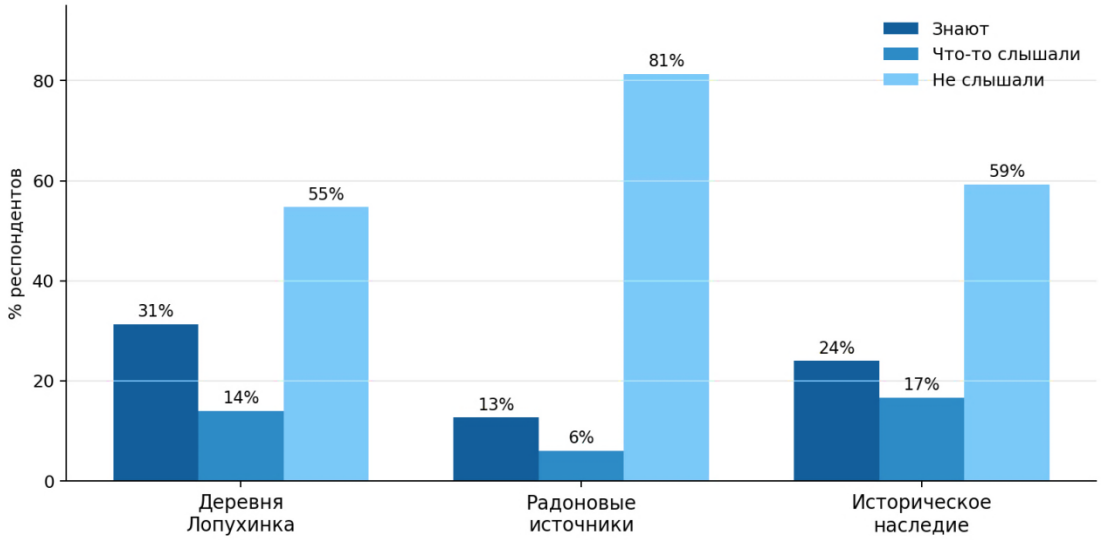


Рисунок 3. Уровень осведомлённости о деревне Лопухинка, радоновых источниках и историческом наследии (N=150)

Figure 3. Awareness level about Lopukhinka village, radon springs and historical heritage (N=150)

Ещё разительнее картина в отношении главного природного атрибута: о радоновых источниках никогда не слышали 81,3% (122 человека), 6% (9 человек) что-то слышали и лишь 12,7% (19 человек) осведомлены об этом феномене. Историческое наследие известно несколько шире - 24% знают о связи деревни с родом Лопухиных и усадебным комплексом, - однако больше половины (59,3%) не имеют об этом никаких знаний. Эти данные количественно подтверждают качественный паттерн, выявленный в фокус-группе: территория практически неизвестна потенциальной аудитории, а её главный дифференцирующий атрибут - радоновые источники - остаётся невидимым для 87%

респондентов. Данный результат полностью соответствует концепту [25] о репутации без образа: место привлекает отдельных посетителей органически, без какого-либо управляемого коммуникационного воздействия.

Из 150 участников опроса реальный опыт посещения Лопухинки имеют лишь 20 человек (13,3%): 13 были там один раз, 7 - несколько раз. Наиболее значимой группой является категория «не бывали, но хотели бы» - 103 человека, или 68,7% выборки: это потенциальная аудитория с выраженным намерением, посетить, которую сдерживает не отсутствие интереса, а недостаток информации и управляемого предложения. Ещё 27 человек (18%) не посещали и не имеют намерения посещать - это группа, не входящая в целевую аудиторию. Таким образом, совокупная потенциальная аудитория - уже заинтересованные и готовые к визиту - составляет около 82% выборки, что свидетельствует о высоком нереализованном спросе на территорию при сложившихся условиях.

Семантический дифференциал позволил измерить аффективный профиль образа Лопухинки у аудитории без предварительной информации о территории - то есть

сформированный исключительно на основе имени и интуитивных ассоциаций (шкала 1–7, где 1 - полное соответствие левому слову, 7 - правому, 4 - нейтральная позиция). Результаты формируют позитивный аффективный профиль по большинству шкал. Наиболее выраженные характеристики: природная (M=1,79) и расслабляющая (M=2,20) - обе шкалы демонстрируют сильное смещение в сторону позитивного полюса. Уникальная (M=2,56) и знакомая (M=2,67) - умеренно позитивные значения. Привлекательная (M=2,91) - близко к позитивному полюсу.

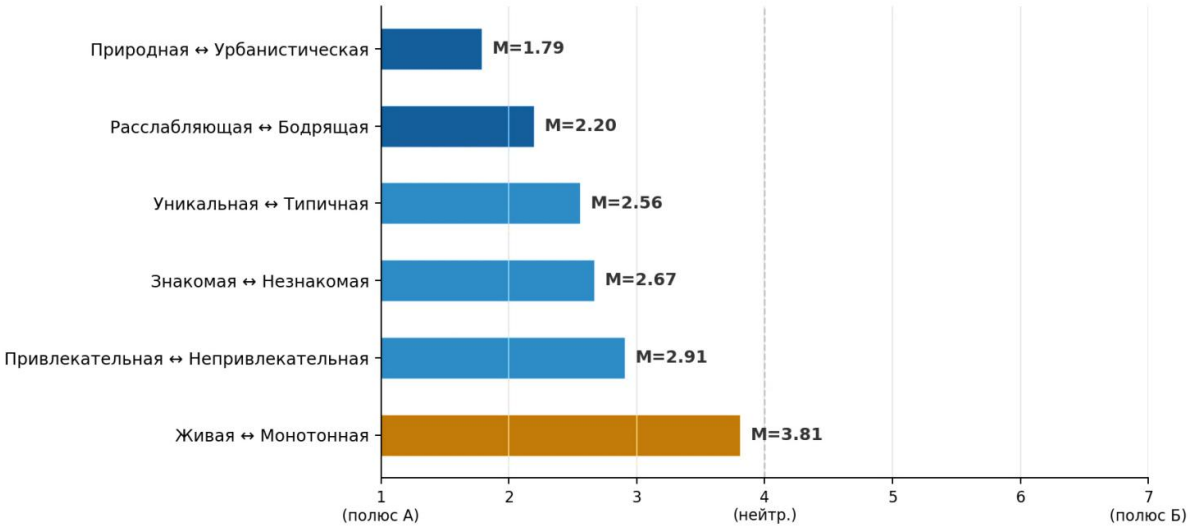


Рисунок 4. Аффективный профиль деревни Лопухинка по шкале семантического дифференциала (N=150, шкала 1–7)

Figure 4. Affective profile of Lopukhinka village on the scale of semantic differential (N=150, scale 1-7)

Наиболее слабым звеном профиля является шкала «живая - монотонная» (M=3,81): значение практически нейтральное, с лёгким смещением в сторону монотонности. Этот паттерн имеет принципиальное значение для брендинговой стратегии: территория интуитивно воспринимается как природная и расслабляющая - то есть профиль «тихого туризма» считывается аудиторией уже на уровне образа имени. Слабость по шкале «живая» указывает на дефицит ассоциаций с динамизмом, событийностью и содержательным наполнением - именно тот разрыв, который должна закрыть брендинговая коммуникация.

Анализ предпочтительных форматов отдыха выходного дня подтверждает стратегическое соответствие ресурсов Лопухинки запросам аудитории. Наиболее популярны: прогулки по природным маршрутам / экотуризм (128 из 150, 85%), тихий отдых - «просто побыть вдали от

[25] Anholt, S. Competitive Identity: The New Brand Management for Nations, Cities and Regions / S. Anholt. – Basingstoke : Palgrave Macmillan, 2007.

города» (118, 79%), гастрономия и местные продукты (90, 60%), оздоровление и SPA (87, 58%), осмотр исторических мест и усадеб (68, 45%).



Рисунок 5. Интерес к посещению Лопухинки после ознакомления с описанием территории (N=150)

Figure 5. Interest in visiting Lopukhinka after reading the description of the territory (N=150)

Среди факторов выбора незнакомой дестинации наиболее важными для аудитории являются (шкала 1–5, где 1 - максимально важен): природа и экология (M=2,42), транспортная доступность (M=2,61), уникальность места (M=2,67) и историческое наследие (M=2,81). Менее значимы инфраструктура (M=3,35), оздоровление / SPA (M=3,73) и безопасность (M=3,73). Этот результат принципиален для приоритизации брендинговых инвестиций: природная уникальность и транспортная доступность важнее, чем SPA-инфраструктура.

После прочтения краткого описания территории - радоновые источники, историческая усадьба, экотропа - картина меняется кардинально: 83% участников выражают позитивный интерес к посещению, из них 35% (52 человека) отвечают «очень интересно, готов поехать», 49% (73 человека) - «скорее интересно». Лишь 17% сохраняют скептицизм. Этот результат является ключевым: между нулевым знанием о территории у большинства аудитории и немедленным высоким интересом к ней при наличии информации существует прямая зависимость. Иными словами, проблема Лопухинки - не в отсутствии привлекательности, а в отсутствии управляемой коммуникации. Территория продаёт себя сама при первом же знакомстве - это редкое и ценное брендинговое свойство.

Среди уже посещавших - 75% подтвердили желание вернуться, что свидетельствует о высокой базовой лояльности реального посетителя.

Анализ свободных словесных ассоциаций (открытый вопрос) обнаружил доминирование нескольких тематических кластеров. Первый - «природный и рекреационный»: лес, вода, чистый воздух, покой, уединение, живописно, экология, отдых. Второй - «медицинский и оздоровительный»: радоновые воды, санаторий, оздоровление. Третий - «ономастический»: лопух - прямая ассоциация с названием.

Обобщая результаты исследования, можно зафиксировать следующий диагностический профиль территории.

Во-первых, Лопухинка является практически неизвестной аудитории территорией: 55% никогда о ней не слышали, 81% не знают о главном природном атрибуте. При этом территория обладает интуитивно позитивным аффективным профилем: образ «природной», «расслабляющей» и «уникальной» дестинации формируется у аудитории ещё до знакомства с фактической информацией. Во-вторых, при наличии минимальной информации о территории 83% аудитории немедленно проявляют интерес к посещению - это свидетельствует о высоком нереализованном спросе, сдерживаемом исключительно отсутствием управляемой коммуникации. В-третьих, приоритеты аудитории (навигация, маршруты, радоновые процедуры) напрямую соответствуют имеющимся и планируемым активам территории, подтверждая стратегическую состоятельность

концепции бренда «Лопухинская Швейцария». В-четвёртых, барьеры к посещению носят информационный, а не содержательный характер: аудиторию отталкивает не само место, а неопределённость относительно доступности, инфраструктуры и маршрутов.

Таким образом, оба эмпирических метода - фокус-группа и опрос - указывают на один и тот же управленческий вывод: брендинговая стратегия Лопухинки должна начинаться с коммуникации, а не с инфраструктуры.

Ключевым решением при формировании брендинговой концепции является выбор имени и смысловой оси бренда. Предлагаемое название - «Лопухинская Швейцария» - не является простой придумкой, а основывается на историческом топониме «Русская Швейцария», зафиксированный в источниках XIX века. Именно так в 1840–1860-х годах современники характеризовали усадьбу Герингов: живописные облесённые холмы, источники и озёра ассоциировались у петербургской публики с альпийским ландшафтом. Поэт Нестор Кукольник, побывавший в Лопухинке, закрепил этот образ в своих воспоминаниях.

Восстановление исторического топонима в качестве брендового имени обладает рядом принципиальных преимуществ. Во-первых, оно апеллирует к подлинной идентичности места, а не создаёт искусственный конструкт. Во-вторых, метафора «Швейцария» даёт мгновенно считываемый образ: природная красота, тишина, чистый воздух, оздоровление - именно те качества, которые участники фокус-группы называли главными достоинствами Лопухинки. В-третьих, сочетание «Лопухинская» сохраняет топонимическую привязку к месту и роду Лопухиных, не позволяя бренду оторваться от конкретной территории. Таким образом, название концентрирует в двух словах одновременно природный образ, историческую отсылку и локальную идентичность.

Данные количественного опроса (N=150) дополнительно верифицируют решения, заложенные в концепцию бренда. Высокий интерес аудитории к радоновым процедурам (69% среди факторов роста интереса) подтверждает обоснованность включения термального комплекса в инвестиционный проект как якорного элемента. Запрос на навигацию и маршрутный контент (74%) указывает на приоритет первого, низкозатратного этапа реализации - создание цифрового навигационного продукта и информационных материалов о территории как опережающего шага, не требующего крупных инвестиций. Доминирование запроса на «тихий отдых» (79%) и экотуризм (85%) подтверждает правомерность нишевого позиционирования в сегменте «тихого туризма» и осознанного отдыха. Профиль аудитории - преимущественно молодёжь и люди среднего возраста (70% - до 35 лет), проживающие в Санкт-Петербурге (79%), с доступом к автомобилю у 59%, - задаёт конкретные параметры для медиапланирования: целевой охват через петербургские цифровые каналы, акцент на формат коротких «поездок выходного дня», двойная стратегия для автомобилистов и пользователей общественного транспорта.

В результате проведенных исследований можно сформулировать рекомендации для малых населенных пунктов:

1. Начинать с изучения идентичности, а не с визуальной айдентики. Распространённой ошибкой в практике брендинга малых поселений является инверсия последовательности: сначала создаётся логотип и слоган, затем ведётся поиск содержания. Правильная цепочка: инвентаризация ресурсного потенциала и выявление уникального дифференцирующего атрибута, далее эмпирическое исследование восприятия аудитории и формулировка бренд-платформы, и в конечном итоге разработка визуальных и вербальных идентификаторов.

2. Устранять пустое обещание прежде, чем масштабировать коммуникацию. Данные опроса выявили устойчивый паттерн: при минимальной информации о территории 83% аудитории немедленно проявляют позитивный интерес. Лопухинка уже обладает достаточным содержательным потенциалом для конверсии аудитории - но этот потенциал не упакован в коммуникационный продукт. Барьеры, названные респондентами («непонятно, как добраться», «неясно, есть ли инфраструктура»), носят информационный, а не содержательный характер. Для малых поселений с неизвестным, но богатым потенциалом приоритетом первого этапа должны быть: разработка доступного навигационного контента (цифровая карта маршрута, QR-коды на входе в тропу), заполнение информационных разделов на официальных ресурсах, единый описательный нарратив в карточках на картографических платформах.

3. Использовать эмпирические данные о восприятии аудитории как основу принятия управленческих решений. Для малых поселений без ресурсов на масштабные исследования оптимальным форматом является мини- фокус-группа с реальными посетителями (6–10 человек, 30–40 минут): низкие затраты, быстрая реализация, богатство качественных данных.

4. Строить брендинговую стратегию поэтапно, начиная с нематериальных компонентов. Данные исследования подтверждают: интерес аудитории формируется информацией, а не инфраструктурой. 74% респондентов назвали «навигацию и удобный маршрут» главным фактором роста интереса - этот элемент реализуется без крупных капитальных вложений.

5. Учитывать позицию местного сообщества как стратегический ресурс и ограничение одновременно. Фокус-группа зафиксировала типичный конфликт малых природных дестинаций: запрос туристов на развитие инфраструктуры вступает в противоречие с запросом местного жителя на сохранение природного характера места. Этот конфликт не разрешается на уровне коммуникационной стратегии - он требует управленческого решения в рамках концепции бренда. Местные жители выступают одновременно хранителями аутентичности, носителями исторической памяти и потенциальными амбассадорами бренда. Механизмы вовлечения: волонтёрские программы ухода за экотропой, соавторство в создании интерпретационного контента, участие в событийной программе (фермерские рынки, мастер-классы). Именно модель партисипаторного брендинга обеспечивает устойчивость территориального бренда в долгосрочной перспективе и снижает риски социального сопротивления.

6. Управлять цифровым присутствием как стратегическим активом. Анализ официального сайта администрации Лопухинского сельского поселения показал: разделы «История», «Достопримечательности» и «Для гостей и туристов» существуют архитектурно, но содержат шаблонные заглушки. При этом данные опроса фиксируют: 55% потенциальной аудитории никогда не слышали о территории. Для малых поселений, не располагающих маркетинговыми бюджетами, цифровое присутствие является наиболее доступным и эффективным инструментом брендинга. Минимальный стандарт: актуальные карточки объектов на Яндекс. Картах с фотографиями и описанием; заполненный раздел «Для туристов» на официальном сайте; единый канал с регулярными публикациями о территории. Эти действия реализуются без значимых затрат и обеспечивают управляемый первый контакт потенциального посетителя с территорией.

7. Рассматривать бренд поселений как ядро более широкого территориального кластера. Анализ пространственного контекста Лопухинки показал: деревня является административным центром поселения, располагающего несколькими историко-природными объектами. Сильный бренд деревни - с чёткой идентичностью, навигационным контентом и узнаваемым позиционированием - способен выступить якорным элементом, вокруг которого в перспективе выстраивается туристский маршрут всего поселения и района.

Список использованных источников

1. Федеральный закон от 06.10.2003 № 131-ФЗ «Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации» (с изм. и доп.).
2. Anholt, S. Competitive Identity: The New Brand Management for Nations, Cities and Regions / S. Anholt. – Basingstoke : Palgrave Macmillan, 2007.
3. Глинская, И. Ю. Территориальный брендинг: подходы к определению и российский опыт / И. Ю. Глинская // Региональная экономика: теория и практика. – 2024.
4. Kavaratzis, M. The dynamics of place brands: An identity-based approach to place branding theory / M. Kavaratzis, M. J. Hatch // Marketing Theory. – 2013. – Vol. 13, № 2. – P. 69–86.
5. Almeida, P. TBRD: Territorial Brand Research Design matrix / P. Almeida // Place Branding and Public Diplomacy. – 2024.
6. Визгалов, Д. В. Брендинг города / Д. В. Визгалов. – М. : Фонд «Институт экономики города», 2011. – 160 с.
7. Кесаонова, В. Л. Территориальный брендинг: зарубежный и российский опыт / В. Л. Кесаонова // Управленческий консалтинг. – 2023. – № 4.

8. Hanna, S. Place and destination branding: a review and conceptual mapping / S. Hanna, J. Rowley, B. J. Keegan // European Management Review. – 2021. – Vol. 18, № 2. – P. 105–117.
9. Федеральный закон от 24.11.1996 № 132-ФЗ «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» (с изм. и доп.).
10. Воскресенская, О. В. Маркетинг территорий как фактор социально-экономического развития / О. В. Воскресенская // Вопросы управления. – 2024. – № 2.
11. Национальный проект «Туризм и гостеприимство» (2024–2030). – М. : Правительство Российской Федерации, 2023.
12. Федеральный закон от 02.07.2021 № 318-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон "Об основах туристской деятельности в Российской Федерации" и статью 7 Федерального закона "О развитии сельского хозяйства"».
13. Кирьянова, Л. Г. Туристская привлекательность дестинации: факторы и методы оценки / Л. Г. Кирьянова // Известия Томского политехнического университета. – 2012.
14. Фролова, Е. В. Управление туристским потенциалом сельских территорий / Е. В. Фролова, Е. Е. Кабанова // Государственное и муниципальное управление. Учёные записки. – 2017.
15. Яндекс Карты : [спутниковый снимок] // Яндекс. – URL: https://yandex.ru/maps.
16. Baloglu, S. A model of destination image formation / S. Baloglu, K. McCleary // Annals of Tourism Research. – 1999. – Vol. 26, № 4. – P. 868–897.
17. Briciu, V.-A. Small Towns and Place Branding: A Systematic Literature Review / V.-A. Briciu, A. Briciu // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, № 21. – Art. 9113.
18. Swain, D. Place branding in small towns / D. Swain, L. van Huystee, A. Hernandez-Garcia // Town Planning Review. – 2024.
19. Torres-Pruñonosa, J. Intellectual structure of destination image research in tourism (2001–2023) / J. Torres-Pruñonosa [et al.] // Journal of Travel & Tourism Marketing. – 2024.
20. Almeida, P. Territorial brand and regional development: a transdisciplinary analysis / P. Almeida // Place Branding and Public Diplomacy. – 2023. – Vol. 19, № 3.
21. Almeida, G. G. F. d. Discussions between place branding and territorial brand in regional development: a classification model proposal / G. G. F. d. Almeida, L. Cardoso // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – Art. 6669.

Reference

1. Federal Law of 06.10.2003 No. 131-FZ "On General Principles of Local Self-Government in the Russian Federation" (as amended and supplemented).
2. Anholt, S. Competitive Identity: The New Brand Management for Nations, Cities, and Regions / S. Anholt. – Basingstoke : Palgrave Macmillan, 2007.
3. Glinskaya, I. Yu. Territorial Branding: Approaches to Definition and Russian Experience / I. Yu. Glinskaya // Regional Economy: Theory and Practice. – 2024.
4. Kavaratzis, M. The Dynamics of Place Brands: An Identity-Based Approach to Place Branding Theory / M. Kavaratzis, M. J. Hatch // Marketing Theory. – 2013. – Vol. 13, No. 2. – P. 69–86.
5. Almeida, P. TBRD: Territorial Brand Research Design Matrix / P. Almeida // Place Branding and Public Diplomacy. – 2024.
6. Vizgalov, D. V. City Branding / D. V. Vizgalov. – Moscow: Institute for Urban Economics Foundation, 2011. – 160 p.
7. Kesaonova, V. L. Territorial Branding: Foreign and Russian Experience / V. L. Kesaonova // Management Consulting. – 2023. – No. 4.
8. Hanna, S. Place and Destination Branding: a Review and Conceptual Mapping / S. Hanna, J. Rowley, B. J. Keegan // European Management Review. – 2021. – Vol. 18, No. 2. – P. 105–117.
9. Federal Law of 24.11.1996 No. 132-FZ "On the Fundamentals of Tourism Activity in the Russian Federation" (as amended and supplemented).
10. Voskresenskaya, O. V. Territory Marketing as a Factor in Socioeconomic Development / O. V. Voskresenskaya // Management Issues. - 2024. - No. 2.
11. National Project "Tourism and Hospitality" (2024-2030). - Moscow: Government of the Russian Federation, 2023.

12. Federal Law of 02.07.2021 No. 318-FZ "On Amendments to the Federal Law "On the Fundamentals of Tourism Activity in the Russian Federation" and Article 7 of the Federal Law "On the Development of Agriculture"".
13. Kir'yanova, L. G. Tourist attractiveness of a destination: factors and assessment methods / L. G. Kir'yanova // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. – 2012.
14. Frolova, E. V. Managing the tourist potential of rural areas / E. V. Frolova, E. E. Kabanova // State and municipal administration. Scientific notes. – 2017.
15. Yandex Maps: [satellite image] // Yandex. – URL: https://yandex.ru/maps.
16. Baloglu, S. A model of destination image formation / S. Baloglu, K. McCleary // Annals of Tourism Research. – 1999. – Vol. 26, No. 4. – P. 868–897.
17. Briciu, V.-A. Small Towns and Place Branding: A Systematic Literature Review / V.-A. Briciu, A. Briciu // Sustainability. – 2020. – Vol. 12, No. 21. – Art. 9113.
18. Swain, D. Place branding in small towns / D. Swain, L. van Huystee, A. Hernandez-Garcia // Town Planning Review. – 2024.
19. Torres-Pruñonosa, J. Intellectual structure of destination image research in tourism (2001–2023) / J. Torres-Pruñonosa [et al.] // Journal of Travel & Tourism Marketing. – 2024.
20. Almeida, P. Territorial brand and regional development: a transdisciplinary analysis / P. Almeida // Place Branding and Public Diplomacy. – 2023. – Vol. 19, no. 3.
21. Almeida, G. G. F. d. Discussions between place branding and territorial brand in regional development: a classification model proposal / G. G. F. d. Almeida, L. Cardoso // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – Art. 6669.

TERRITORIAL BRANDING AS A TOOL FOR FORMING THE GEOECOLOGICAL TOURIST ATTRACTIVENESS OF A SMALL SETTLEMENT

Grigorieva Yulia V.
2nd year Master's student, Smart City Management
Higher School of Management, St. Petersburg State University
St. Petersburg
E-mail: juliagrotesk@gmail.com

© Григорьева Ю.В., 2026

УДК 004.02

[1]Белая А.К.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

[1]**Белая Анна Константиновна**
Магистр 2 курса РТС
Кафедра экологической безопасности телекоммуникационных систем
СПбГУТ им.проф.Бонч-Бруевича
г.Санкт-Петербург
e-mail: ania.belaia2017@yandex.ru

Аннотация. В статье представлен обзор к экологическому прогнозированию на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в контексте геоинформатики. Обозначена основа для прогнозирования - космический мониторинг путем спутниковых снимков и современные методы обработки данных. Выделены проблемы и перспективы геоинформационного подхода для улучшения точности и качества экологического прогнозирования, определена необходимость перехода от эпизодического мониторинга к системному экологическому прогнозированию.

Ключевые слова: спутниковые снимки, геоинформатика, дистанционное зондирование

ENVIRONMENTAL FORECASTING BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA

Annotation. This article presents an overview of environmental forecasting based on Earth remote sensing (ERS) data in the context of geoinformatics. The basis for forecasting is outlined: space monitoring using satellite images and modern data processing methods. The challenges and prospects of a geoinformatics approach to improving the accuracy and quality of environmental forecasting are highlighted.

Keywords: satellite imagery, geoinformatics, remote sensing

Введение. Экологическое прогнозирование является неотъемлемой частью геоинформационного анализа территорий, интегрирующего данные дистанционного зондирования, наземных наблюдений и имитационного моделирования для оценки динамики территорий под влиянием природных и антропогенных изменений.

На сегодняшний день в Российской Федерации применение данных ДЗЗ регламентируется сводом законов и нормативных актов. Основными являются закон от 20 августа 1993 г. №5663-1 «О космической деятельности», затем Федеральный закон №215-ФЗ «О государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос», Федеральный закон №46-ФЗ «О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О космической деятельности», закон РФ №99 «О лицензировании отдельных видов деятельности». Стоит отметить что в 2022 году был утвержден план мероприятий на 2022-2025 годы по реализации Основ государственной политики в области использования результатов космической деятельности в интересах модернизации экономики Российской Федерации и развития ее регионов на период до 2030 года. Основными направлениями развития стали разработка и утверждение методических рекомендаций для созданий научно-технологической основы для дальнейшего развития инфраструктуры использования результатов космической деятельности с использованием навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, навигационной системы GPS и других результатов космической деятельности. В соответствии с ГОСТ 59079-2020 «Данные дистанционного зондирования Земли из космоса» существуют определенные требования и определения для

конкретных типов ДЗЗ, которые выделяются по признаку способа их получения или обработки. Цель данной работы - дать характеристику каждому методу дистанционного зондирования согласно ГОСТу, выявить преимущества и недостатки каждого, и на основе примеров применимых в реальных условиях показать, как можно нивелировать существующие недостатки.

Классификация по спектральному диапазону. Данная классификация выделяет два основных типа данных: оптические и микроволновые. Оптические охватывают диапазон от 0,1 до 15 мкм и включают ультрафиолетовую (0,1–0,38 мкм), видимую (0,38–0,78 мкм), ближнюю инфракрасную (0,78–1,3 мкм), среднюю инфракрасную (1,3–3,0 мкм) и тепловую инфракрасную (3,0–15,0 мкм) области спектра. Микроволновые данные регистрируются в диапазоне длин волн от 0,01 до 1 м и могут быть получены как пассивными, так и активными методами.

Классификация по методу зондирования. В зависимости от используемого метода зондирования данные ДЗЗ подразделяются на получаемые с помощью пассивных методов, при которых аппаратура регистрирует собственное излучение объектов или отраженное/рассеянное излучение естественных источников (преимущественно Солнца), и активных методов, при которых аппаратура генерирует зондирующий сигнал и фиксирует его отраженную или рассеянную часть. К последним относятся, в частности, радиолокационные данные с синтезированной апертурой (РСА).

Классификация по методу разрешения. По спектральному разрешению различают сверхспектральные (гиперспектральные), мультиспектральные и панхроматические данные. Для гиперспектральных данных характерна высокая детализация спектрального признакового пространства, что позволяет идентифицировать тонкие различия в составе объектов. Мультиспектральные данные содержат ограниченное число широких спектральных каналов, что обеспечивает баланс между информативностью и объемом данных. Панхроматические данные представлены одним интегральным каналом в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (обычно 0,38–0,9 мкм) и характеризуются максимальным пространственным разрешением.

Классификация по пространственному разрешению. Важным классификационным признаком выступает пространственное разрешение, на основе которого выделяют данные сверхвысокого (детальность менее 1 м), высокого (1–10 м), среднего (10–100 м) и низкого (более 100 м) разрешения. Выбор пространственного разрешения определяется масштабом исследуемых процессов: для локального мониторинга и дешифрирования антропогенных объектов требуются данные высокого и сверхвысокого разрешения, тогда как для региональных и глобальных экологических исследований чаще применяются данные среднего и низкого разрешения, обеспечивающие широкий охват территории и высокую периодичность съемки.

Классификация по уровням обработки. Важнейшей характеристикой данных ДЗЗ, определяющей их пригодность для решения конкретных научных и прикладных задач, является уровень обработки. В отечественной и международной практике принята система уровней, отражающая степень преобразования исходных цифровых отсчетов в геометрически и радиометрически скорректированные продукты. На начальном уровне (уровень 0) находятся исходные (сырые) данные — цифровые отсчеты, получаемые непосредственно с бортовой аппаратуры после аналого-цифрового преобразования. Эти данные содержат все инструментальные искажения и требуют последующей обработки. Радиометрическая обработка (уровень 1) включает преобразование цифровых отсчетов в физически значимые величины (коэффициенты яркости, температуры яркости) с учетом калибровочных характеристик сенсора. Опционально на этом этапе может выполняться атмосферная коррекция, направленная на устранение искажений, вызванных влиянием атмосферы на распространение электромагнитных волн. Геометрическая обработка обеспечивает привязку данных к географическим координатам. На уровне 2 выполняется систематическая геометрическая коррекция с использованием бортовых данных о положении космического аппарата и параметрах съемки. На уровне 3 осуществляется ортокоррекция — это преобразование исходного снимка в ортогональную проекцию и устранение искажений, вызванных рельефом и/или геометрическими условиями съемки. В результате получается ортотрансформированный снимок (ортофотоплан) – цифровое трансформированное изображение местности, приведенное к плановой проекции, то есть к такой, в которой каждая точка местности наблюдается строго вертикально. Дальнейшие уровни обработки (уровень 4 и выше) предполагают синтез многозональных композитов, слияние панхроматических и мультиспектральных

данных, построение временных рядов и создание тематических продуктов (классификация земного покрова, оценка биомассы, карты нарушений и др.).

Каждый метод стоит рассматривать не как самостоятельный, а как элемент ортокоррекции для более подробного и детального прогнозирования. Преимущества и недостатки каждого отдельного метода можно сформировать в таблицу:

Таблица 1. преимущества и недостатки каждого метода ДЗЗ
Table 1. advantages and disadvantages of each remote sensing method

Метод ДЗЗ	Преимущества	Недостатки
Классификация по спектральному диапазону (оптические данные)	Физическая интерпретируемость: спектральные сигнатуры напрямую связаны с биофизическими характеристиками объектов (хлорофилл, влажность, минеральный состав), что позволяет рассчитывать верифицированные индексы (NDVI, NDWI, NBR и др.). Высокое пространственное разрешение: современные оптические сенсоры (например, установленные на российских спутниках типа «Ресурс-П») обеспечивают максимальную детальность, что критически важно для мониторинга локальных экологических нарушений. Многозональность: наличие нескольких спектральных каналов позволяет различать типы растительности, почв и антропогенных объектов. Долговременные архивы: наличие непрерывных временных рядов обеспечивает возможность ретроспективного анализа и выявления трендов, аномалий, способствует качественному прогнозированию.	Зависимость от погодных условий: облачность делает съемку невозможной, что приводит к пропускам во временных рядах и требует применения сложных методов восстановления данных. Освещенность: работа только в дневное время (за исключением теплового диапазона) ограничивает оперативность мониторинга. Атмосферные искажения: требуют проведения атмосферной коррекции для устранения влияния аэрозолей, водяного пара и газов, что вносит дополнительную неопределенность. Насыщение сигнала: при высокой биомассе (густые леса) вегетационные индексы достигают плато, теряя чувствительность к изменениям.
Классификация по спектральному диапазону (микроволновые данные)	Всепогодность: радиолокационные и радиометрические системы работают независимо от облачности, осадков и времени суток, обеспечивая регулярный мониторинг территорий с высокой облачностью (тропические леса, высокие широты). Чувствительность к структурным характеристикам: микроволновое излучение взаимодействует с внутренней структурой объектов, что позволяет оценивать биомассу, влажность почвы, глубину снежного покрова и деформации земной поверхности. Поляриметрическая информация: поляризационные данные предоставляют дополнительную размерность признакового пространства, повышая точность классификации. Проникающая способность: в зависимости от длины волны сигнал может	Сложная физическая интерпретация: связь между радиолокационным сигналом и биофизическими параметрами нелинейна и зависит от множества факторов (влажность, угол падения, шероховатость поверхности), что затрудняет создание универсальных моделей. Спекл-шум: когерентная природа радиолокационных данных порождает специфический зернистый шум, требующий применения фильтрации, которая может снижать пространственное разрешение. Геометрические искажения: эффекты наложения, тени и

	проникать сквозь растительный покров, позволяя оценивать подстилающую поверхность и древесный ярус.	опрокидывания в горной местности усложняют геометрическую коррекцию.
Классификация по методу зондирования (пассивный метод)	Энергетическая независимость: отсутствие необходимости в генерации зондирующего сигнала упрощает конструкцию аппаратуры и снижает энергопотребление. Широкий спектральный охват: возможность регистрации излучения в различных диапазонах (от УФ до теплового ИК) с высокой спектральной детализацией. Прямая связь с термодинамическими параметрами: тепловой диапазон позволяет напрямую оценивать температуру земной поверхности — ключевой параметр для экологического прогнозирования (засухи, тепловые аномалии). Накопленные архивы: длительные ряды пассивных данных (например, накопленные с помощью спутников Landsat, MODIS, AVHRR) создают уникальную базу для анализа климатически обусловленных изменений.	Зависимость от внешнего источника излучения: в видимом и ближнем ИК-диапазонах работа возможна только при наличии солнечного освещения. Влияние атмосферы: атмосферные газы и аэрозоли вносят существенные искажения, требующие сложной коррекции. Низкая проникающая способность: сигнал не проникает сквозь облака и растительный полог, что ограничивает применение в условиях плотной облачности или густого древостоя.
Классификация по методу зондирования (активный метод)	Управляемость: возможность выбора режимов съемки (поляризация, угол падения, разрешение) в зависимости от решаемой задачи. Независимость от освещения и погоды: обеспечивают регулярность наблюдений, критически важную для оперативного экологического прогнозирования (паводки, пожары, подвижки грунтов). Трехмерная информация: интерферометрическая обработка позволяет измерять деформации земной поверхности с миллиметровой точностью; лидарные данные (воздушное лазерное сканирование) предоставляют детальные модели рельефа и вертикальной структуры растительности. Чувствительность к влажности: радиолокационные данные высокочувствительны к диэлектрическим свойствам объектов, что позволяет оценивать влажность почвы и биомассу.	Высокая стоимость аппаратуры и обработки: активные системы требуют сложной калибровки, а обработка данных (особенно интерферометрическая) предъявляет высокие требования к вычислительным ресурсам и квалификации специалистов. Сложность калибровки: для количественных оценок необходима строгая радиометрическая калибровка. Интерпретационные сложности: эффект зависимости сигнала от геометрии съемки (угол падения, азимут) требует учета при построении прогнозных моделей.
Классификация по методу разрешения	Максимальное пространственное разрешение: достигает 0,3–0,5 м, что позволяет дешифрировать отдельные объекты (здания, дороги, единичные деревья). Высокое отношение сигнал/шум: интегральный канал обеспечивает высокую радиометрическую точность.	Отсутствие спектральной информации: невозможность различать объекты по спектральным характеристикам, что делает панхроматические данные непригодными для тематического анализа без дополнительных источников.

	Компактность: малый объем данных упрощает хранение и обработку. Оптимальный баланс информативности и объема: достаточное количество спектральных каналов для большинства тематических задач (типизация растительности, классификация земного покрова) при умеренных вычислительных затратах. Широкая доступность: данные Landsat, Sentinel-2, MODIS являются открытыми и бесплатными, что делает их основой большинства экологических исследований. Валидированные индексы: разработана обширная библиотека спектральных индексов для оценки различных экологических параметров. Высокая спектральная детализация: возможность идентификации материалов по их уникальным спектральным сигнатурам (спектральные библиотеки). Раннее обнаружение изменений: позволяют фиксировать изменения в содержании пигментов, влажности и биохимическом составе растительности до появления визуальных признаков. Точное картографирование биоразнообразия: дают возможность различать виды растений, типы почв и геологические породы. Обнаружение загрязнений: чувствительность к узким спектральным особенностям позволяет выявлять техногенные загрязнения (нефтепродукты, тяжелые металлы) по изменению спектральных характеристик.	Ограниченная применимость для экологических задач: в чистом виде используются преимущественно для создания ортофотопланов и базовых карт. Невозможность различения близких спектральных классов: широкие каналы не позволяют идентифицировать узкие спектральные особенности, характерные для определенных минералов, видов растений или состояний физиологических изменений. Эффект смешанного пиксела: при среднем пространственном разрешении (10–30 м) один пиксель может содержать несколько типов объектов, что снижает точность классификации. Огромный объем данных: требует значительных вычислительных ресурсов для хранения, обработки и анализа. Высокая корреляция каналов: избыточность информации требует применения методов сокращения размерности, что может приводить к потере интерпретируемости. Ограниченная доступность: коммерческие гиперспектральные данные имеют высокую стоимость; бесплатные источники имеют ограниченное пространственное разрешение и территориальное покрытие. Сложность предварительной обработки: требуют тщательной атмосферной коррекции и калибровки для устранения спектральных артефактов.
Классификация по пространственному разрешению	Детальное дешифрирование объектов; мониторинг локальных нарушений; верификация наземных данных; высокая картометрическая точность. Баланс детальности и покрытия; пригодность для большинства прикладных задач (лесное хозяйство, агрономия,	Высокая стоимость; малая площадь покрытия; большой объем данных. Требует значительных вычислительных ресурсов при региональном масштабе; влияние атмосферных искажений более

	урбанизация). Наличие многолетних архивов; пригодность для регионального анализа трендов; открытый доступ. Максимальная периодичность (суточная и субсуточная); глобальный охват; малый объем данных; пригодность для климатических и биогеохимических моделей.	критично, чем при низком разрешении. Проблема смешанных пикселов; ограниченная возможность обнаружения локальных объектов; сглаживание пространственных градиентов. Невозможность анализа локальных процессов; грубое обобщение; низкая точность геометрической привязки; ограничения для верификации наземными данными.
Классификация по уровням обработки	Сохранность исходной информации; возможность применения специфических алгоритмов калибровки; минимальный объем предварительной обработки. Готовность к анализу; стандартизация данных разных сенсоров; возможность межсенсорного сравнения. Пространственная согласованность с другими данными; возможность интеграции в ГИС; снижение требований к квалификации пользователя. Максимальная геометрическая точность; пригодность для картометрических измерений; совместимость с цифровыми моделями рельефа. Непосредственная пригодность для экологического анализа; стандартизация продуктов; снижение порога входа для пользователей.	Требуют значительных усилий пользователя по калибровке и коррекции; непригодны для прямого анализа без дополнительной обработки. Опциональность атмосферной коррекции снижает сопоставимость разновременных данных; сохраняются геометрические искажения. Систематическая коррекция не устраняет искажения, вызванные рельефом; сохраняются локальные артефакты. Требуют качественной цифровой модели рельефа; при наличии ошибок DEM возможно ухудшение качества; вычислительно затратны. Потеря исходной информации; ограниченная возможность адаптации под специфические задачи; накопление ошибок предыдущих уровней обработки.

Многие недостатки описанных методов можно нивелировать за счет применения машинного обучения и искусственного интеллекта, а также гибридного подхода, основанного на междисциплинарном синтезе геоинформатики, теоретической экологии (включая её отраслевые направления), математического моделирования, дистанционного зондирования и внедрения беспилотных авиационных систем (БАС). Чтобы не выбирать между детальностью и охватом, информативностью и вычислительной сложностью, гибкостью и готовностью к использованию, стоимостью и доступностью — стоит выбирать гибридный подход. Это позволит выйти на сложный уровень прогнозирования, например, через имитацию биогеохимических циклов. Для этого в Российской Федерации уже создан ряд успешных примеров, демонстрирующих эффективность такого подхода.

Одним из наиболее значимых является комплекс геосервисов «Цифровая Земля», разработанный АО «Терра Тех» по заказу Госкорпорации «Роскосмос» в рамках национальной программы «Цифровая экономика Российской Федерации». Данный продукт объединяет современные методы дистанционной

съемки земной поверхности и новейшие алгоритмы обработки больших объемов данных, построенные на искусственном интеллекте. В состав комплекса входят семь отраслевых геосервисов: «Лес-контроль», «Эко-мониторинг», «Карьеры», «Строй-контроль», «Сельхоз-мониторинг», «Чрезвычайные ситуации» и «Нарушенные земли». Использование сверхточных нейронных сетей позволяет существенно сократить трудовые и временные затраты на обработку снимков, автоматически идентифицировать и классифицировать изменения на местности, а также своевременно уведомлять пользователей о критических событиях на объектах мониторинга. Результатом проекта стало создание всеобъемлющей цифровой карты хозяйственной деятельности и состояния природных ресурсов в масштабах всей страны, включая данные о распределении и площади объектов добычи полезных ископаемых, вырубок, лесных гарей, водных объектов и строительства .



Рисунок 1. Пример геосервиса от компании «Терра Тех» с искусственным интеллектом на спутниковых данных

Figure 1. An example of a geo-service from Terra Tech with artificial intelligence based on satellite data

В области лесного мониторинга и оценки углеродного баланса активно работают ученые Института космических исследований РАН. Разрабатываемые в ИКИ РАН методы оценки характеристик лесного покрова, включая карты породного состава и запаса стволовой древесины, базируются на использовании инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» и современных подходах машинного обучения, включая нейронные сети. Кроме того, ведутся исследования по ассимиляции данных спутникового мониторинга в модели распространения огня для уточнения положения фронта пожара и оценки потенциальной эмиссии углерода от лесных пожаров.

Важным направлением развития гибридных подходов стала интеграция спутниковых данных с беспилотными авиационными системами (БАС). В 2025 году ГТЛК, АО «Терра Тех», ООО «ХайТэк» и ООО «БАС» провели успешный эксперимент по комбинированному использованию спутниковых технологий, беспилотников и искусственного интеллекта. В ходе эксперимента был протестирован «бортовой ИИ» — специальный модуль на беспилотнике, который фиксирует изменения объектов наблюдения на основе спутниковых снимков и формирует полетное задание для дрона только в те зоны, которые требуют до разведки. Это позволяет оптимизировать ресурсы и сократить время реагирования при мониторинге чрезвычайных ситуаций, поиске потерявшихся людей и решении других прикладных задач. Применение отечественных ИИ-ускорителей LinQ на базе тензорного процессора собственной архитектуры обеспечивает высокопроизводительную обработку спутниковой информации в реальном времени, что имеет стратегическое значение для демонстрации возможностей российских вычислительных решений в области обработки больших данных ДЗЗ. Это подтверждает перспективность использования гибридных подходов для решения задач лесного мониторинга и низкоуглеродного развития.

Таким образом, гибридный подход, интегрирующий данные ДЗЗ различных типов, методы машинного обучения, наземные наблюдения и беспилотные технологии, позволяет не только нивелировать недостатки каждого отдельного метода, но и создавать принципиально новые возможности для экологического прогнозирования. Российские разработки — от комплекса «Цифровая Земля» до экспериментальных систем ассимиляции данных и комбинирования спутников с БАС — демонстрируют высокий потенциал таких решений для обеспечения технологической независимости страны и повышения эффективности управления природными ресурсами.

Заключение. На сегодняшний день космический мониторинг является единственным источником оперативных данных для глобального и регионального экологического прогнозирования. Однако, как показано в данной работе, ни один из существующих методов сбора и обработки данных ДЗЗ в отдельности не способен в полной мере удовлетворить требованиям, предъявляемым к точности, оперативности и пространственному охвату прогнозных моделей. Интеграция разнородных данных — оптических и радиолокационных, пассивных и активных, спутниковых и наземных — с современными алгоритмами машинного обучения и искусственного интеллекта открывает новые перспективы для развития геоинформатики и экологического прогнозирования. Российские инициативы, такие как комплекс «Цифровая Земля», разработки ИКИ РАН и эксперименты по комбинированию спутниковых и беспилотных технологий, показывают, что переход к системному экологическому прогнозированию на основе гибридных методов уже активно реализуется и имеет значительный потенциал для дальнейшего развития.

Список использованных источников

1. ГОСТ Р 59079—2020. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Правила построения, изложения, оформления и согласования технического задания на создание, модернизацию и сопровождение информационных систем. — Москва : Стандартинформ, 2020. — 27 с.
2. Российская Федерация. Законы. О космической деятельности : Федеральный закон № 5663-1 от 20 августа 1993 г. (ред. от 28.12.2024). — Москва, 1993.
3. Российская Федерация. Законы. О Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» : Федеральный закон № 215-ФЗ от 13 июля 2015 г. (ред. от 08.08.2024). — Москва, 2015.
4. Российская Федерация. Законы. О внесении изменений в Закон Российской Федерации «О космической деятельности» : Федеральный закон № 46-ФЗ от 09.03.2022. — Москва, 2022.
5. Российская Федерация. Законы. О лицензировании отдельных видов деятельности : Федеральный закон № 99-ФЗ от 04.05.2011 (ред. от 26.02.2024). — Москва, 2011.
6. Хвостиков, С. А. Метод уточнения положения фронта пожара на основе ассимиляции данных спутникового мониторинга в модель распространения огня / С. А. Хвостиков, С. А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Т. 19, № 5. — С. 9–18.
7. Терра Тех, АО. Пять лет «Цифровой Земле»: 500 млн кв. километров космоснимков и 27 инфопродуктов [Электронный ресурс] // Терра Тех : официальный сайт. — Москва, 2024. — URL: https://terratech.ru/company/news/pyat-let-tsifrovoy-zemle-500-mln-kv-kilometrov-kosmosnimkov-i-27-infoproduktov/ (дата обращения: 24.03.2026).
8. Институт космических исследований Российской академии наук. Центр коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [Электронный ресурс] : официальный сайт. — Москва. — URL: http://ckp.geosmis.ru/ (дата обращения: 24.03.2026).
9. Никольский, Д. Б. Уровни обработки радиолокационных данных / Д. Б. Никольский // Геоматика. — 2008. — № 1. — С. 25–36.
10. Никитина, А. В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга земель сельскохозяйственного назначения [Электронный ресурс] / А. В. Никитина, О. И. Ботвинникова, А. В. Кевеш // Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. — 2022. — № 6 (106). — С. 47–52. — URL: https://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-13-2022-6.pdf/download/vmgau-13-2022-6.pdf (дата обращения: 24.03.2026).

Reference

1. GOST R 59079-2020. Earth remote sensing data from space. Rules for the construction, presentation, design and approval of technical specifications for the creation, modernization and maintenance of information systems. — Moscow : Standartinform, 2020. — 27 p.
2. The Russian Federation. Laws. On space activities: Federal Law No. 5663-1 of August 20, 1993 (as amended on 12/28/2024). — Moscow, 1993.
3. The Russian Federation. Laws. On the State Corporation for Space Activities Roscosmos : Federal Law No. 215-FZ dated July 13, 2015 (as amended on 08/08/2024). — Moscow, 2015.
4. The Russian Federation. Laws. On Amendments to the Law of the Russian Federation "On Space Activities" : Federal Law No. 46-FZ dated 03/09/2022. — Moscow, 2022.
5. The Russian Federation. Laws. On licensing of certain types of activities: Federal Law No. 99-FZ dated 05/04/2011 (as amended on 02/26/2024). — Moscow, 2011.
6. Khvostikov, S. A. A method for clarifying the position of the fire front based on the assimilation of satellite monitoring data into a fire propagation model / S. A. Khvostikov, S. A. Bartalev // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. — 2022. — Vol. 19, No. 5. — pp. 9-18.
7. Terra Tech, JSC. Five years of "Digital Earth": 500 million square kilometers of satellite images and 27 information products [Electronic resource] // Terra Tech : official website. — Moscow, 2024. — URL:https://terratech.ru/company/news/pyat-let-tsifrovoy-zemle-500-mln-kv-kilometrov-kosmosnimkov-i-27-infoproduktov / (date of access: 03/24/2026).
8. Institute of Space Research of the Russian Academy of Sciences. The Center for collective use "IKI-Monitoring" [Electronic resource] : official website. — Moscow. — URL: http://ckp.geosmis.ru / (date of access: 03/24/2026).
9. Nikolsky, D. B. Levels of radar data processing / D. B. Nikolsky // Geomatics. - 2008. — No. 1. — pp. 25-36.
10. Nikitina, A.V. The use of remote sensing data for monitoring agricultural lands [Electronic resource] / A.V. Nikitina, O. I. Botvinnikova, A.V. Kevesh // Bulletin of the MGAU named after V.P. Goryachkin. — 2022. — № 6 (106). — Pp. 47-52. — URL: https://elib.timacad.ru/dl/full/vmgau-13-2022-6.pdf/download/vmgau-13-2022-6.pdf (date of request: 03/24/2026).

ENVIRONMENTAL FORECASTING BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA

Belaia Anna K.
2th year graduate student
Department of Environmental Safety of Telecommunication Systems,
SPbSUT named after Professor Bonch-Bruevich, Saint Petersburg
e-mail: ania.belaia2017@yandex.ru

© Белая А.К.,2026