



ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Научный журнал

Выпуск 3 (3) | 2025

ISSN 3033-6813

**GEOINFORMATION
MODELING**

gmlgeo.ru

Научно-практический журнал
ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Geoinformation modeling

Выпуск 3 (3), 2025

Редакционный совет:

М. Р. Вагизов, доктор технических наук, доцент (главный редактор),
Н. В. Меламед, кандидат технических наук, доцент, (зам. гл. редактора)
Е. П. Истомина, 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

Учредитель:

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

Адрес редакции: г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Улянка,
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: 31.10.2025.

Технический редактор: Лысенко И. А.

Редактор: Меламед Н. В.



ISSN 3033-6813

© АНО РПРТ УНЛАНД, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗДЕЛ ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ

- Артамкин М.Д., Недбайло О.В., Мартын И.А.** Создание нейросети для обнаружения льда на спутниковых снимках3
- Павлов М. Ю.** Обзор технологий сбора и обработки данных дистанционного зондирования Земли и систем передачи данных для задач мониторинга лесного фонда.....8
- Дзениш М.С., Дзениш Д.И.** Сравнительный анализ цифрового двойника территории и данных топографической съёмки на основе ГИС и дистанционного зондирования Земли18

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

- Маклашин Д.И., Вагизов М.Р.** Планирование покрытия области группой БАС с учётом энергетических и кинематических ограничений (часть 1)29
- Батмазова А.А., Гайдукова Е.В., Дуганна К.Б., Плотникова Е.М., Яковлев К.А.** Автоматизированный сбор и интеграция гидрометеорологических данных: методы и первые результаты37
- Лаврентьева А.А., Назаревич С.А.** Системный анализ процессов робастного проектирования для повышения эффективности каналов логистического сопровождения проекта47

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

- Урусова Е.С., Машина А.И.** Динамика загрязнённости рек Новгородской области57
- Леонов Е.Л., Леонов И. Е., Сазанов В.Н., Вагизов М.Р .** Первопричины деградации малых рек, не учтённые при реализации «Водной стратегии РФ» и возможные способы исправления ситуации на основе систем цифрового мониторинга68

РАЗДЕЛ ГЕОИНФОРМАТИКА, КАРТОГРАФИЯ
SECTION GEOINFORMATICS, CARTOGRAPHY

УДК 004.032.26:551.326.022

Арташкин М.Д., Недбайло О.В., Мартын И.А.

**СОЗДАНИЕ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЬДА НА СПУТНИКОВЫХ
СНИМКАХ**

Арташкин Марк Демидович

студент 4 курса
кафедра прикладной информатики
института информационных систем и геотехнологий
Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: mark577@yandex.ru

Недбайло Олег Владимирович

студент 4 курса
кафедра прикладной информатики
института информационных систем и геотехнологий
Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: olegaz1642@gmail.com

Мартын Ирма Андреевна

кандидат технических наук
доцент кафедры прикладной информатики института информационных систем и геотехнологий
Российский государственный гидрометеорологический университет
Санкт-Петербург
E-mail: irma_martyn@mail.ru

Аннотация. Данная работа посвящена разработке нейронной сети для автоматического обнаружения и сегментации льда на спутниковых снимках. В работе предложен подход, основанный на использовании свёрточных нейронных сетей (CNN), которые позволяют эффективно анализировать изображения и выделять области, не покрытые льдом. Модель была обучена на наборе данных, состоящем из аннотированных спутниковых снимков. Результаты показали, что модель способна успешно идентифицировать воду среди ледовых образований. Разработанная модель имеет практическое применение в мониторинге арктических территорий, прогнозировании изменений ледового покрова и оптимизации судоходных маршрутов. Работа вносит вклад в развитие методов автоматизированного анализа спутниковых данных, что особенно актуально в условиях изменения климата и активного освоения Арктики.

Ключевые слова: нейронные сети, спутниковые снимки, Арктика, лёд.

CREATING A NEURAL NETWORK FOR DETECTING ICE ON SATELLITE IMAGES

Abstract. This work is devoted to the development of a neural network for automatic detection and segmentation of ice on satellite images. The paper proposes an approach based on the use of convolutional neural networks (CNNs), which make it possible to effectively analyze images and identify areas that are not covered with ice. The model was trained on a dataset consisting of annotated satellite images. The results showed that the model is able to successfully identify water among ice formations. The developed model has practical application in monitoring Arctic territories, forecasting changes in the ice cover and optimizing shipping routes. The work contributes to the development of methods for automated analysis of satellite data, which is especially important in the context of climate change and active Arctic exploration.

Keywords: neural networks, satellite images, Arctic, ice.

Введение. Обнаружение льда на спутниковых снимках играет ключевую роль в мониторинге климатических изменений и управлении судоходством в арктических регионах. В данной работе была разработана нейросетевая модель для автоматической сегментации льда на спутниковых изображениях с использованием нейронной сети архитектуры U-Net.

Модель основана на технологии U-Net, поскольку она хорошо зарекомендовала себя в задачах сегментации. Основные компоненты модели:

1. Энкодер (сжатие изображений) с двумя свертками и MaxPooling.
2. Декодер (разворачивание изображений) с двумя транспонированными свертками и UpSampling.
3. Выходной слой с активацией sigmoid, выдающий вероятности принадлежности пикселя к классу "лед".

Для обучения модели было получено 134 оригинальных спутниковых снимка с сайта Polar View [1], далее аугментированы до 1174 изображений с помощью библиотеки albumentations. Все изображения были обработаны в OpenCV для выделения областей, содержащих лед.

Это было сделано в несколько основных шагов:

Загрузка изображения в формате, удобном для обработки в OpenCV.

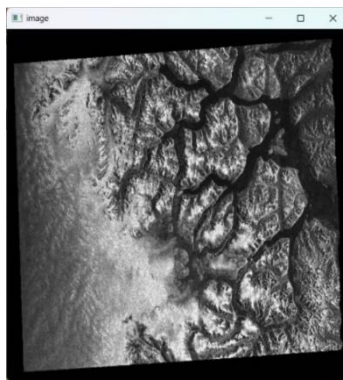


Рисунок 1. Исходное изображение, открытое через OpenCV
Figure 1. The original image opened via OpenCV

Максимизация точек выше заданного предела и определение границ.



Рисунок 2. Бинарно разделённое изображение
Figure 2. Binary split image

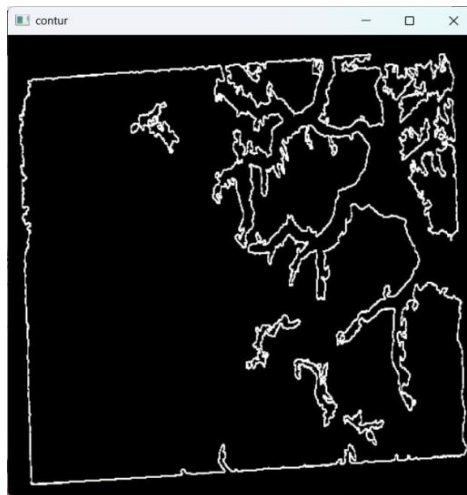


Рисунок 3. Найденные контуры
Figure 3. Contours found

Наложение границ на фон и создание итоговой маски.



Рисунок 4. Область не «вода»
Figure 4. The area is not "water"



Рисунок 5. Готовая маска изображения
Figure 5. Finished image mask

Далее датасет был разделен на две категории:

1. Исходные изображения — RGB-снимки размером 256×256 пикселей (это нужно для более удобной обработки, т.к. изначальные изображения разного разрешения).

2. Маски — изображения, где белые области — для модели ничего, а черные — вода.

Файлы были загружены из директории с помощью `os.listdir()` и обработаны с использованием `cv2.imread()`, `cv2.resize()` и нормализованы до диапазона `[0,1]` (Это нужно, чтобы нейросеть могла нормально их считать).

Перед обучением данных набор был разделен на:

80% обучающая выборка

20% валидационная выборка

Для этого использовалась функция `train_test_split()` из библиотеки `sklearn.model_selection`. Данная процедура используется для более эффективного обучения, чтобы корректировать его в процессе, сравнивая результат обучения с имеющимися данными.

Модель компилировалась с оптимизатором Adam, функцией потерь `binary_crossentropy` и метрикой `accuracy`. Обучение проводилось на 9 эпохах с размером батча 32.

После успешного обучения модель была сохранена в файл `ice_model.h5` с возможностью дальнейшего использования для предсказаний. Сохранение модели в формате H5 гарантирует её совместимость с различными платформами и инструментами для глубокого обучения, что упрощает интеграцию в существующие системы обработки данных и дообучение.

Для оценки работы модели были построены и проанализированы графики:

Функции потерь (Loss) на обучающей и валидационной выборке.

Функция точности (Accuracy) при обучении.

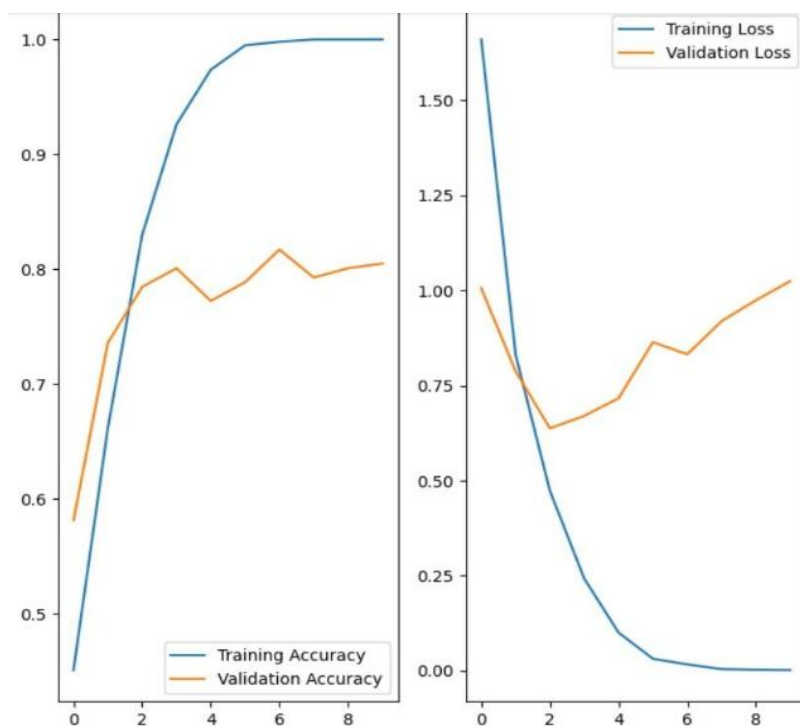


Рисунок 6. График обучения нейронной сети
Figure 6. Neural network training graph

Также было выбрано случайное изображение из валидационного набора, и сравнивались его истинная маска и предсказанная моделью сегментация.

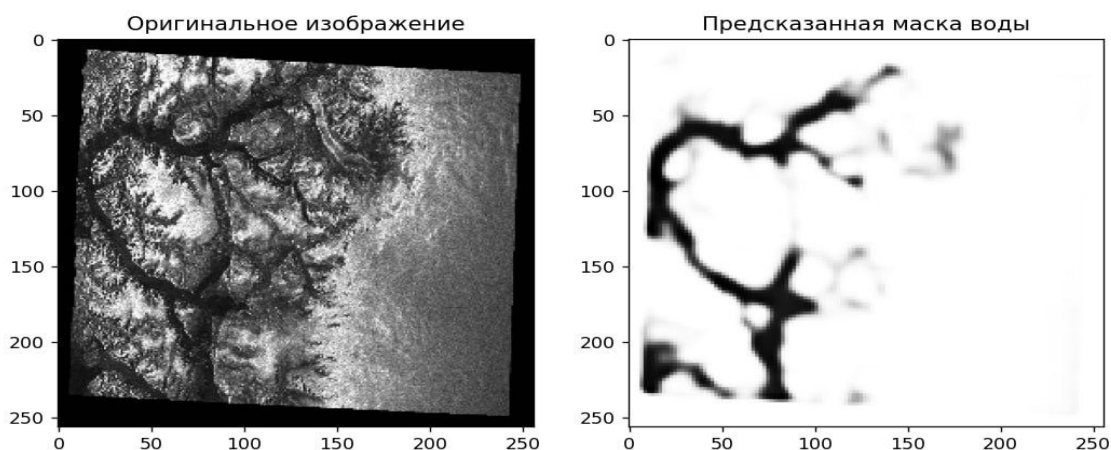


Рисунок 7. Определённое нейросетью положение воды
Figure 7. The position of the water determined by the neural network

Несмотря на то, что текущая версия модели демонстрирует определённые ограничения в точности, это может быть устранено за счёт увеличения объёма обучающих данных, улучшения вычислительных мощностей. Разработанная модель обладает значительным практическим потенциалом, особенно в области мониторинга арктических регионов. Она может быть использована для прогнозирования динамики ледового покрова, анализа изменений климата, а также для оптимизации маршрутов судоходства в условиях сложной ледовой обстановки. Это делает её важным инструментом для решения задач, связанных с изучением, освоением и обеспечением безопасности в Арктике, а также для поддержки научных исследований и оперативного принятия решений.

Список использованных источников

1. Polar view: <https://www.polarview.aq/arctic>
2. Гудфеллоу, Я., Бенджио, И., Курвиль, А. Глубокое обучение. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 652 с.
3. Рашка, С. Python и машинное обучение. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 418 с.

Reference

1. Polar view: <https://www.polarview.aq/arctic>
2. Goodfellow, Ya., Bendjio, I., Courville, A. Deep learning. Moscow: DMK Press, 2017. 652 p.
3. Rashka, S. Python and machine learning. Moscow: DMK Press, 2020. 418 p.

CREATING A NEURAL NETWORK FOR DETECTING ICE ON SATELLITE IMAGES

Artamkin Mark D.

i4th year student

Department of Applied Informatics at the Institute of Information Systems and Geotechnologies of the Russian state hydrometeorological university

Saint-Petersburg

E-mail: Mark577@yandex.ru

Nedbaylo Oleg V.

4th year student

Department of Applied Informatics

Institute of Information Systems and Geotechnologies

Russian state hydrometeorological university

Saint-Petersburg

E-mail: olegaz1642@gmail.com

Martyn Irma A.

Candidate of Technical Sciences

Associate Professor, Department of Applied Informatics,

Institute of Information Systems and Geotechnologies,

Russian state hydrometeorological university

Saint-Petersburg

E-mail: irma_martyn@mail.ru

© Артамкин М.Д., Недбайло О.В., Мартын И.А., 2026

УДК 004.9

Павлов М. Ю.

**ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ДЛЯ ЗАДАЧ
МОНИТОРИНГА ЛЕСНОГО ФОНДА**

Павлов Михаил Юрьевич

аспирант 1 курса

кафедра информационных систем и технологий
Института леса и природопользования
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Санкт-Петербург
E-mail: vigototheroad@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается применение беспилотных авиационных систем (БАС) для мониторинга состояния лесных экосистем России. Проанализированы основные типы данных, получаемых с дронов (высокопространственные RGB-снимки, мультиспектральные, гиперспектральные изображения и LiDAR-облака точек), показаны их преимущества и возможности совместного использования. Особое внимание уделено проблемам работы с большими объемами информации в условиях ограниченной коммуникационной инфраструктуры лесных территорий: методам передачи данных (LOS, сотовая, спутниковая, Mesh/ad-hoc сети), их ограничениям и перспективам. Выявлена необходимость создания единых национальных стандартов и цепочек обработки данных от сбора до интеграции в государственные геоинформационные системы лесного хозяйства для перехода от пилотных проектов к регулярному оперативному мониторингу на всей территории страны.

Ключевые слова: БАС, мониторинг лесных экосистем, дистанционное зондирование, RGB-съёмка, LiDAR, передача данных, хранение данных.

TECHNOLOGIES FOR COLLECTION AND PROCESSING OF UNMANNED AERIAL SYSTEM DATA IN MONITORING OF NATURAL TERRITORIES

Annotation. The article examines the use of unmanned aerial systems (UAS) for monitoring the state of forest ecosystems in Russia. The main types of data obtained from drones are analyzed: high-resolution RGB imagery, multispectral and hyperspectral images, and LiDAR point clouds, with emphasis on their advantages and the benefits of combined application. Particular attention is paid to challenges associated with handling large data volumes in conditions of limited communication infrastructure in forest areas, including data transmission methods (LOS, cellular, satellite, and Mesh/ad-hoc networks), their limitations, and future prospects. The need is highlighted for developing unified national standards and end-to-end data processing workflows — from collection to integration into state forestry geoinformation systems — to enable the transition from pilot projects to regular operational monitoring across the entire country.

Keywords: UAS, forest ecosystem monitoring, remote sensing, high-resolution RGB imaging, LiDAR, data transmission, data storage

Введение. По данным Рослесхоза, леса России покрывают около 70% территории страны, что составляет примерно 1184 млн гектаров. Они играют ключевую роль как один из крупнейших в мире накопителей углерода [1]. Однако в последние десятилетия лесные экосистемы подвергаются возрастающему воздействию негативных факторов: лесным пожарам, вспышкам насекомых-вредителей, болезням древесных пород, незаконным рубкам, а также последствиям климатических изменений. В этих условиях мониторинг становится важным инструментом управления лесным фондом.

В 2024 году по результатам экспедиционных исследований, проведённых в пяти субъектах России на площади более 2 млн га, повреждения лесов были выявлены на 70,7 тыс. га, а очаги

вредителей и болезней – на 47,2 тыс. га [2]. Эти данные отражают масштаб проблемы: усиливающиеся климатические изменения являются причиной, по которой учащаются экстремальные природные явления, такие как засухи, ураганы, штормы, аномальные температурные колебания, что ускоряет процессы деградации лесов.

Минусы стандартных методов наблюдения становятся очевидными при детальном разборе. Космические снимки слишком велики, чтобы по ним можно было идентифицировать проблему вредителей или раннего заражения леса. Наземные исследования хоть и решают проблему масштаба изучения, но используют много ресурсов и привносят человеческий фактор в процесс работы. Здесь раскрывается потенциал применения авиационных беспилотных систем (БАС). Снимки с БАС имеют высокое качество (2-5 см/пиксель), поэтому и называются высокопространственными. Также БАС могут использовать и другие сенсоры, направленные на поиск проблем с рельефом или структурой крон, что далее будет рассмотрено в методах получения данных с БАС.

Несмотря на прогресс в области применения беспилотных систем, остаётся проблема отсутствия систематизированного и последовательного описания всего процесса работы с данными – от момента их получения до этапов передачи, хранения и дальнейшего использования. Такая систематизация необходима, поскольку особенности каждого шага существенно влияют на практическую применимость данных и устойчивость функционирования мониторинговых систем. В полевых условиях процесс сбора информации может осложняться отсутствием сетевого покрытия или техническими ограничениями самих аппаратов. В этих ситуациях данные сохраняются на встроенные или внешние носители, которые оператор извлекает вручную. Такой подход накладывает ограничения на объём собираемых данных и требует предварительной проработки. Возникают вопросы организации, хранения, передачи и обработки информации.

Так же важной технологией, связанной с получением данных, является адаптивное управление в БАС. Эта технология представляет собой автоматическую подстройку законов управления в реальном времени под изменяющиеся параметры БПЛА. Вместо фиксированных ПИД-регуляторов используются методы MRAC, L1-адаптивное управление, Incremental NDI и нейроадаптивные компенсаторы, которые позволяют сохранять устойчивость и точность полёта даже при отказе исполнительных органов или резком изменении условий. Это ключевая технология для современных высокоманевренных и отказоустойчивых дронов, конвертопланов и стратегических БПЛА.

Цель данной работы – рассмотреть современные подходы к работе с данными беспилотных авиационных систем, применяемых в задачах мониторинга состояния лесных экосистем. В рамках исследования анализируются методы получения данных, способы их передачи в условиях ограниченной инфраструктуры, а также технологии хранения и интеграции в геоинформационные системы. Особое внимание уделяется практической применимости данных, возможности работы с ними на различных этапах работы.

Типы данных БАС для мониторинга лесов. БАС опирается на широкий спектр данных, получаемых различными типами сенсоров, устанавливаемых на дронах. Эти данные существенно различаются по целевым назначениям. Они могут выполнять как общие функции, так и более узкие, что определяет их эффективность при решении конкретных задач анализа лесных экосистем.

Наиболее распространённым видом данных являются высокопространственные RGB-снимки, представляющие собой цветные фотографии в диапазонах красного, зелёного и синего каналов. Основное их достоинство – возможность детально визуализировать мелкие проблемы, которые возникают у крон, определять расположение отдельных заражённых деревьев, выявлять признаки повреждений, концентрацию вредителей, незаконные вырубki и другие изменения, имеющие явно выраженные визуальные признаки. При этом RGB-данные не позволяют надёжно оценивать физиологическое состояние объектов из-за специфики съёмки, но эту задачу решают другие сенсоры.

RGB-данные, как правило, хранятся в формате RAW, то есть в виде необработанных несжатых данных, сохраняющих всю информацию, полученную датчиками камеры. RAW – это не один формат: производители камер используют разные варианты, адаптированные под свои устройства. Рассмотрим один пример, чтобы понимать принцип работы такого расширения.

DNG (Adobe Digital Negative) – открытый формат, разработанный компанией Adobe [3]. Его важным преимуществом является открытый код и наличие существующих библиотек Python, например rawpy. По своей структуре это TIFF-файл-контейнер с дополнительными обязательными тегами, поэтому его можно как разбирать, так и собирать обратно без существенных проблем.

Для решения задач оценки жизненного состояния лесов применяется мультиспектральная съёмка, включающая дополнительные спектральные каналы, такие как красная граница (Red Edge) и ближний инфракрасный диапазон (NIR) [4]. Особенность этих сенсоров заключается в возможности выполнять количественный анализ состояния растительности на основе вегетационных индексов NDVI, GNDVI, NDRE, EVI. Индексы представляют собой математические комбинации значений яркости спектральных каналов и позволяют оценивать, что происходит с растением.

Принцип хранения данных в таких сенсорах напоминает RAW-файлы: существует контейнер значений, но теперь данные представляют собой числа, пропорциональные количеству фотонов, попавших на сенсор. Такая съёмка достаточно сложна, поскольку сильно зависит от освещённости в момент съёмки, угла съёмки, наличия затемнения объекта и других факторов.

Гиперспектральная съёмка с БАС представляет собой один из наиболее информативных и технологически сложных методов дистанционного зондирования лесных экосистем. В отличие от мультиспектральных данных, содержащих несколько широких спектральных диапазонов, гиперспектральные изображения включают десятки или даже сотни узких спектральных каналов с высокой спектральной разрешающей способностью, поэтому имеют те же проблемы, как и мультиспектральная съёмка, к тому же появляются проблемы с интенсивностью солнечной радиации и сложности с атмосферной калибровкой. Такие характеристики позволяют регистрировать тонкие особенности отражательной способности объектов, недоступные при использовании других типов съёмки.

Гиперспектральная камера формирует трёхмерный массив данных – датакубом, где две пространственные координаты соответствуют пикселям изображения, а третье измерение – спектральному диапазону. Каждый пиксель в таком датакубе содержит полный спектр отражённого излучения, что делает возможным применение широкого набора методов спектрального анализа: от вычисления узкоспециализированных индексных показателей до использования машинного обучения и методов обнаружения аномалий.

С точки зрения формата хранения гиперспектральные данные чаще всего представляют собой специализированные контейнеры, включающие наборы бинарных файлов, например ENVI, сопровождаемых метаданными, описывающими параметры съёмки, калибровку спектральных каналов, профили сенсоров и характеристики оптики. Такие форматы обеспечивают возможность точной реконструкции полного спектра в каждом пикселе и допускают использование существующих библиотек обработки, ориентированных на научные и инженерные задачи.

Отдельное место занимает лазерное сканирование (LiDAR). Оно является одним из наиболее точных методов. В отличие от прошлых методов, LiDAR представляет собой активную систему, излучающую лазерные импульсы и фиксирующую время их возвращения после отражения от объектов. Благодаря этому обеспечивается возможность прямого измерения расстояний и построения трёхмерной модели исследуемой территории с высокой точностью.

Основным продуктом лазерного сканирования является облако точек – набор пространственных координат, каждая из которых представляет положение частиц, отражающих

лазерное излучение. Дополнительно для каждой точки может фиксироваться интенсивность возвращённого сигнала, характеризующая отражательные свойства поверхности. Данные LiDAR позволяют получать точные метрики строения лесного надземного яруса: высоту деревьев, плотность кроны, вертикальную структуру полога, распределение биомассы, а также оценивать характеристики рельефа под пологом, что невозможно при использовании исключительно оптических методов.

Применение LiDAR в лесных исследованиях даёт возможность решать широкий спектр задач. Среди наиболее значимых – построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) высокой точности, реконструкция внутренней структуры древостоя, детекция поваленной древесины, оценка неоднородности лесных участков и моделирование процессов сукцессии. Высокая детализация и независимость от условий освещения определяют эффективность LiDAR при мониторинге труднодоступных участков, а также при выполнении съёмки в условиях плотного полога.

Форматы хранения LiDAR-данных, как правило, представлены стандартами LAS или LAZ (его сжатая версия), включающими координаты X, Y, Z, интенсивность, номер отражения, угол сканирования и другие метаданные. Эти форматы обеспечивают совместимость с специализированным программным обеспечением и позволяют эффективно обрабатывать большие массивы точек.

Наиболее полная картина состояния лесных экосистем достигается при использовании комбинированных данных, то есть совместном применении нескольких типов сенсоров на БАС. Каждый вид съёмки фиксирует разные аспекты состояния растительности, и объединение таких данных позволяет получить более точное и надёжное представление о происходящих процессах. Имея понимание, какие ресурсы получает каждый метод, соберем все в одну схему (рисунок 1).



Рисунок 1. Схема ресурсов, получаемых с помощью БАС
Figure 1. Scheme of resources obtained with the help of UAS

RGB-снимки обеспечивают детальное визуальное восприятие объектов и позволяют выявлять изменения, имеющие выраженные внешние признаки. Мультиспектральные данные дают возможность количественно оценивать физиологическое состояние растений с помощью вегетационных индексов. Гиперспектральная съёмка предоставляет доступ к спектральным «подписям» растительности, что помогает обнаруживать ранние признаки стрессов и нарушений,

которые ещё не проявляются визуально. LiDAR дополняет эту информацию структурными характеристиками – высотой деревьев, плотностью крон, параметрами рельефа и внутренней организацией древостоя.

Комбинирование таких данных позволяет сопоставлять результаты разных методов, устранять неоднозначности и компенсировать недостатки отдельных сенсоров. Например, структурная информация LiDAR может уточнять интерпретацию спектральных индексов, а мультиспектральные и гиперспектральные показатели помогают выделять те участки, где наблюдаются изменения, требующие дополнительного анализа по строительным параметрам.

Интеграция данных обычно выполняется на уровне геопривязки и последующей совместной обработки в специализированных программных средах. Это повышает точность мониторинга, позволяет выявлять сложные пространственные паттерны и обеспечивает более глубокое понимание состояния лесных экосистем.

На основе ранее созданной схемы и определения всех выходных данных составим общую схему выходных данных, объединив их по типу (рисунок 2).

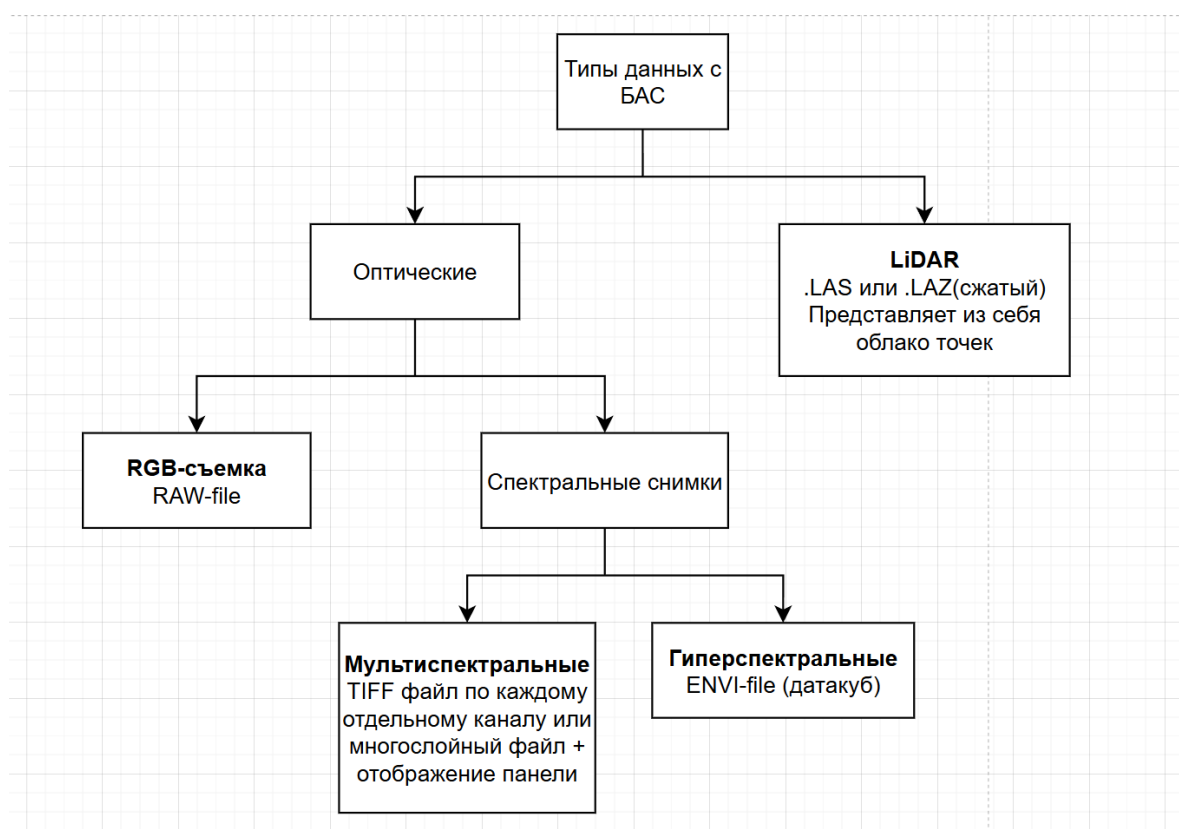


Рисунок 2. Схема выходных данных, получаемых с помощью БАС
Figure 2. Schematic diagram of the output data obtained by the UAS

Методы и технологии передачи данных БАС. Передача данных с БАС является критическим звеном в цепочке оперативного мониторинга лесных экосистем, особенно в условиях труднодоступной тайги и горных территорий России. Современные дроны, оснащённые RGB-, мультиспектральными, гиперспектральными и LiDAR-сенсорами, способны генерировать от 5-15 ГБ данных за один полёт длительностью 20-40 минут (в зависимости от разрешения и набора датчиков). При выполнении регулярного мониторинга одного лесничества площадью 50-100 тыс. га в течение сезона объём накапливаемых данных достигает 1-5 ТБ. В условиях слабого покрытия сотовой связью.

Передача данных по радиоканалам прямой видимости (Line-of-Sight, LOS) является одним из основных способов связи между БАС и наземной станцией управления. Такой тип канала предполагает, что передающий и принимающий устройства находятся в зоне прямой видимости, без значимых препятствий, которые могли бы блокировать или сильно ослаблять сигнал.

В основе работы LOS-связи лежит использование радиочастотных диапазонов, которые обеспечивают устойчивую передачу телеметрии, управляющих команд и, при необходимости, потокового видеосигнала. Обычно для этой цели применяются частоты от нескольких сотен мегагерц до нескольких гигагерц, поскольку они обеспечивают приемлемый баланс между дальностью связи и устойчивостью сигнала.

Качество передачи данных по LOS существенно зависит от ряда факторов. Наиболее важными являются высота полёта дрона, рельеф местности и наличие крупных объектов, способных экранировать радиосигнал. Чем выше находится дрон, тем меньше влияние препятствий, что позволяет увеличить дальность действия канала. В то же время плотная застройка, высокие деревья или холмистый рельеф могут создавать зоны затенения и приводить к потере пакетов данных.

Характерной особенностью LOS-каналов является сравнительно низкая задержка передачи, что делает их подходящими для оперативного контроля и ручного управления. Используемые протоколы обычно включают механизмы коррекции ошибок, что повышает надёжность канала при умеренных уровнях помех. Однако пропускная способность ограничена возможностями конкретного оборудования и условиями распространения радиоволн. Это означает, что объём передаваемых данных (например, видеопотока высокой чёткости) может снижаться при увеличении расстояния или появлении помех.

В условиях лесных экосистем LOS-связь сохраняет преимущества, но сталкивается с ограничениями из-за неоднородного рельефа и плотности растительности. Поэтому при планировании полётов важно учитывать высоту маршрута и потенциальные зоны потери сигнала. Несмотря на эти ограничения, радиоканалы прямой видимости остаются надёжным и широко используемым инструментом передачи данных между БАС и наземной станцией.

Спутниковая связь используется в тех случаях, когда традиционные наземные каналы, включая радиоканалы прямой видимости, недоступны или недостаточно надёжны. Для БАС это особенно важно при выполнении полётов на больших расстояниях, в труднодоступных районах или при необходимости передачи данных вне зоны покрытия стандартных сетей.

Основой спутниковой связи является передача данных через орбитальные спутники, которые выступают промежуточными ретрансляторами между дронами и наземными станциями. Канал может работать через низкоорбитальные (LEO), среднеорбитальные (MEO) или геостационарные (GEO) спутниковые системы. LEO-системы, такие как современные глобальные сети, обеспечивают меньшую задержку сигнала и лучше подходят для динамичных объектов, включая БАС.

Главным преимуществом спутниковой связи является практически глобальное покрытие, которое позволяет поддерживать канал передачи данных независимо от рельефа, плотности растительности или отсутствия инфраструктуры. Это делает технологию востребованной при выполнении мониторинга лесных территорий, особенно в удалённых регионах, где связь LOS невозможна.

Однако спутниковые каналы обладают рядом ограничений. Прежде всего, это более высокая задержка сигнала по сравнению с наземными каналами, особенно в случае использования GEO-спутников. Кроме того, пропускная способность может быть ограничена, что влияет на возможность передачи больших объёмов данных, например потокового видео в высоком разрешении. Передача крупных массивов сенсорных данных также требует более длительного времени или предварительной компрессии.

Ещё один важный фактор – энергопотребление. Спутниковые модули требуют значительных ресурсов для стабильной передачи, что влияет на время автономной работы дрона. Также оборудование сложнее и тяжелее аналогов, работающих в LOS-режиме, что накладывает ограничения на полезную нагрузку.

Тем не менее, спутниковая связь остаётся эффективным инструментом для обеспечения устойчивой передачи данных в условиях, где другие типы каналов не работают или работают с сильными ограничениями. В сочетании с onboard-хранилищами, системами компрессии и адаптивными протоколами спутниковая связь позволяет надёжно выполнять задачи мониторинга лесных экосистем преимущественно на больших расстояниях.

Сотовые сети являются одним из наиболее удобных и широко распространённых способов передачи данных для БАС, особенно при работе в районах, где имеется стабильное покрытие операторов мобильной связи. Использование таких сетей позволяет дронам передавать телеметрию, служебную информацию и объёмы данных средней величины практически в режиме реального времени.

Основой работы является доступ к базовым станциям сотовых операторов по стандартам 4G/LTE или 5G. Эти технологии обеспечивают высокую пропускную способность, низкие задержки и относительно устойчивое соединение, что делает их подходящими для задач мониторинга и передачи данных с сенсоров. В случае 5G возможна ещё более высокая скорость и улучшенная устойчивость связи, что особенно полезно при передаче картографической информации, изображений и потокового видеосигнала.

Однако качество связи напрямую зависит от плотности и распределения базовых станций. В лесных экосистемах покрытие может быть частично или полностью отсутствующим, особенно вдали от населённых пунктов. Дополнительные сложности возникают из-за рельефа, плотной растительности и ограниченного проникновения сигнала на малых высотах. Поэтому для БАС, работающих в лесных массивах, сотовая связь может использоваться только как дополнительный канал в зонах уверенного покрытия.

Ещё одним фактором являются особенности движущегося абонента. При быстром перемещении дрон может быстро переходить между зонами обслуживания разных базовых станций, что может вызывать кратковременные потери связи или снижение качества передачи. Современные модули связи частично компенсируют эти эффекты, но полностью исключить их невозможно.

Сотовые сети отличаются умеренным энергопотреблением оборудования и удобством в эксплуатации: модуль связи относительно лёгкий, прост в интеграции и не требует развёртывания специально выделенной инфраструктуры. Это делает их хорошим вариантом для оперативных полётов там, где покрытие есть, но при работе в удалённых или слабо освоенных лесных районах надёжность такого канала остаётся ограниченной.

В итоге сотовые сети являются эффективным и гибким способом передачи данных, но сильно зависят от условий местности и качества покрытия. Они хорошо подходят для регулярных мониторинговых полётов вблизи населённых пунктов или вдоль инфраструктурных объектов, однако в глубинных лесных массивах требуют резервирования другими типами каналов связи.

Сети Mesh и ad-hoc рассматриваются как перспективный способ организации связи для БАС, особенно в условиях, где отсутствует стабильное покрытие традиционными каналами или требуется динамическое развёртывание сети непосредственно в районе работ. Эти технологии позволяют дронам обмениваться данными напрямую, формируя распределённую сеть без фиксированной инфраструктуры. Структуру такой сети можно представить в виде схемы. (Рис.1)

Сети типа ad-hoc представляют собой временные самоорганизующиеся сети, где каждый узел (в данном случае – дрон) одновременно выполняет функции приёмника, передатчика и маршрутизатора. Это позволяет быстро организовать передачу данных между устройствами при отсутствии центральной точки управления. Однако такие сети чувствительны к изменениям топологии: при активном движении БАС маршруты передачи данных могут часто перестраиваться, что влияет на стабильность работы и скорость обмена.

Mesh-сети являются развитием ad-hoc подхода и обеспечивают более устойчивую маршрутизацию и самовосстановление при сбоях. Каждый узел может передавать данные по нескольким путям, а сеть автоматически выбирает оптимальный маршрут. Это делает Mesh-технологии особенно полезными для группового применения БАС, когда несколько дронов работают на одной территории и должны синхронизировать данные между собой или передавать их на наземную станцию через промежуточные узлы.

Основные преимущества Mesh и ad-hoc сетей включают независимость от внешней инфраструктуры, устойчивость к частичным отказам и возможность увеличивать зону покрытия за счёт добавления новых узлов. На практике это позволяет использовать такие сети в труднодоступных районах, где отсутствуют LOS-каналы или сотовая связь, а также при выполнении длительных миссий, требующих непрерывной передачи данных между несколькими дронами.

В то же время существуют и ограничения. Ключевыми являются ограниченная пропускная способность при увеличении числа узлов, высокая нагрузка на энергию из-за постоянной работы радиомодуля в режиме ретрансляции, а также сложность поддержки стабильной связи при быстром перемещении дронов. Кроме того, эффективность сети существенно зависит от расстояния между узлами и наличия препятствий, влияет плотная растительность и особенности рельефа.

Несмотря на эти ограничения, Mesh и ad-hoc сети рассматриваются как эффективное решение для создания локальных коммуникационных систем БАС. Они обеспечивают гибкость, автономность и возможность масштабирования, что делает их перспективными для задач мониторинга лесных экосистем, особенно при использовании групп дронов, работающих совместно.

Заключение. Проведённый анализ показывает, что беспилотные авиационные системы стали высокоэффективным инструментом мониторинга лесных экосистем России, в условиях нарастающих климатических и антропогенных угроз. Благодаря высокому разрешению и возможности одновременного применения RGB-, мультиспектральных, гиперспектральных сенсоров и LiDAR они обеспечивают раннее обнаружение вредителей, болезней, точную оценку физиологического состояния и трёхмерной структуры древостоев – задачи, недоступные традиционным методам. Максимальная информативность достигается при комплексном использовании всех типов данных с последующей совместной обработкой.

Однако огромные объёмы информации (до 5 ТБ за сезон на лесничество), практически полное отсутствие устойчивой связи в большинстве лесных территорий и отсутствие единых стандартизированных цепочек работы с данными от сбора до интеграции в государственные ГИС существенно ограничивают масштабируемость технологий. Технологическая готовность БАС уже высока, но для перехода к регулярному оперативному применению по всей стране необходимы национальные стандарты обработки и передачи данных, развитие гибридных систем связи с акцентом на LEO-спутники и Mesh-сети, а также глубокая интеграция результатов в единый геопрограммный банк цифровой информации лесного фонда. Только при выполнении этих условий беспилотные технологии смогут стать основным инструментом сохранения российского лесного фонда – крупнейшего наземного накопителя углерода планеты – в эпоху климатических вызовов.

Список использованных источников

1. Рослесхоз, Обобщенные данные ГЛР/ [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest-register/> (дата обращения 12.11.2025).
2. Рослесхоз. Рослесхоз: в 2024 году экспедиционные обследования лесов проведены на площади около 2 млн га // Пресс-центр. 28.10.2024. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosleshoz.gov.ru/news/federal/rosleskhoz-v-2024-godu-ekspeditsionnye-obsledovaniya-lesov-provedeny-na-ploshchadi-okolo-2-mln-ga-n11201/> (дата обращения: 12.11.2025).
3. Adobe. Общедоступный формат архива для необработанных данных цифровых камер (Raw) / [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://helpx.adobe.com/ru/camera-raw/digital-negative.html> (дата обращения 12.11.2025).
4. Ольхин Ю. В., Гаврилова О. И., Грязькин А. В. Использование БПЛА и мультиспектральных снимков при обследовании фитоценозов на вырубках // Трансформация экосистем. 2025. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bpla-i-multispektralnyh-snimkov-pri-obsledovanii-fitotsenozov-na-vyrubkah> (дата обращения: 14.11.2025).
5. Шпанев, А. М. Применение гиперспектральной съёмки с беспилотного летательного аппарата для оценки засорённости посевов зерновых культур / А. М. Шпанев, А. Ф. Петрушин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 3. – С. 136-148. – DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-3-136-148. – EDN SDSYLM.
6. Цай Сергей Сергеевич Использование материалов лидарной съёмки участков лесного фонда, полученных с беспилотных летательных аппаратов, для определения углов наклона местности // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. №2 (282). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-materialov-lidarnoy-semki-uchastkov-lesnogo-fonda-poluchennyh-s-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-dlya-opredeleniya> (дата обращения: 14.11.2025).
7. Карапетян Т. С., Прокофьева А. А., Дмитроченко Б. А. О способах автоматической передачи информации с беспилотных летательных аппаратов // Инновации и инвестиции. 2019. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-sposobah-avtomaticheskoy-peredachi-informatsii-s-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 18.11.2025).
8. Воронов Е. М., Оболенский Ю. Г., Чеглаков Д. И. Адаптивное автоматическое управление беспилотным летательным аппаратом на этапе сближения и стыковки процесса дозаправки топливом в воздухе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2017. №3 (114). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnoe-avtomaticheskoe-upravlenie-bespilotnym-letatelnyim-apparatom-na-etape-sblizheniya-i-stykovki-protsessa-dozapravki-toplivom-v> (дата обращения: 18.11.2025).

Reference

1. Rosleskhoz, Generalized Data of the State Forest Register/ [Electronic resource] Available at: <https://rosleshoz.gov.ru/activity/forest-register/> (Accessed: 12.11.2025).
2. Rosleskhoz. Rosleskhoz: In 2024, expeditionary forest surveys were conducted on an area of approximately 2 million hectares // Press Center. 28.10.2024. [Electronic resource]. Available at: <https://rosleshoz.gov.ru/news/federal/rosleskhoz-v-2024-godu-ekspeditsionnye-obsledovaniya-lesov-provedeny-na-ploshchadi-okolo-2-mln-ga-n11201/> (Accessed: 12.11.2025).
3. Adobe. Publicly available archive format for raw digital camera data (Raw) / [Electronic resource]. Access mode: <https://helpx.adobe.com/ru/camera-raw/digital-negative.html> (date of access: 12.11.2025).

4. Olkhin Yu. V., Gavrilova O. I., Gryazkin A. V. Using UAVs and Multispectral Imagery in Surveying Phytocenoses in Cleared Areas // Ecosystem Transformation. 2025. No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-bpla-i-multispektralnyh-snimkov-pri-obsledovanii-fitotsenozov-na-vyrubkah> (date of access: 14.11.2025).
5. Shpanev, A. M. Application of hyperspectral imaging from an unmanned aerial vehicle to assess weed infestation of grain crops / A. M. Shpanev, A. F. Petrushin // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. - 2025. - Vol. 22, No. 3. - Pp. 136-148. - DOI 10.21046/2070-7401-2025-22-3-136-148. - EDN SDSYLM.
6. Tsai Sergey Sergeevich USE OF LIDAR SURVEY MATERIALS OF FOREST AREAS OBTAINED FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES TO DETERMINE TERRAIN SLOPE ANGLES // Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management, and Renewable Resource Processing. 2024. No. 2 (282). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-materialov-lidarnoy-semki-uchastkov-lesnogo-fondapoluchennyh-s-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-dlya-opredeleniya> (Accessed: 14.11.2025).
7. Karapetyan T. S., Prokofieva A. A., Dmitrochenko B. A. On Methods of Automatic Information Transmission from Unmanned Aerial Vehicles // Innovations and Investments. 2019. No. 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-sposobah-avtomaticheskoy-peredachi-informatsii-s-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (Accessed: 18.11.2025).
8. Voronov E. M., Obolensky Yu. G., Cheglakov D. I. Adaptive automatic control of an unmanned aerial vehicle at the approach and docking stage of the in-flight refueling process // Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series "Instrument Engineering". 2017. No. 3 (114). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnoe-avtomaticheskoe-upravlenie-bespilotnym-letatelnyh-apparatom-na-etape-sblizheniya-i-stykovki-protssessa-dozapravki-toplivom-v> (date of access: 18.11.2025).

TECHNOLOGIES FOR COLLECTION AND PROCESSING OF UNMANNED AERIAL SYSTEM DATA IN MONITORING OF NATURAL TERRITORIES

Pavlov M.Y.

graduate student, department of information systems and technologies
Institute of forest and nature management
Saint Petersburg State Forest Technical University named after S. M. Kirov,
Saint Petersburg
E-mail: vigototheroad@mail.ru

© Павлов М.Ю. 2026

УДК 004.9:528.85

Дзениш М.С., Дзениш Д.И.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ТЕРРИТОРИИ И ДАННЫХ ТОПОГРАФИЧЕСКОЙ СЪЁМКИ НА ОСНОВЕ ГИС И ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Дзениш Маргарита Сергеевна

аспирант 2 курса Института леса и природопользования
кафедра лесной таксации, лесоустройства и геоинформационных систем
Институт леса и природопользования

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Санкт-Петербург
E-mail: margo_makeeva@bk.ru

Дзениш Денис Игоревич

аспирант 3 курса Института леса и природопользования
кафедра общей экологии, анатомии и физиологии растений
Институт леса и природопользования
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
Санкт-Петербург
E-mail: dzenish14@yandex.ru

Аннотация. В данной статье рассматривается процесс создания цифрового двойника территории с помощью геоинформационных систем и открытых баз данных. Описаны метод обработки информации и инструменты, использованные при работе над цифровым двойником. Для определения корректности получаемых данных проводится сравнительный анализ с данными топографической съемки той же территории. Представлены результаты цифровой обработки и предложены перспективы дальнейшего развития метода.

Ключевые слова: цифровой двойник, геоинформационная система, топография, сравнительный анализ.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DIGITAL TWIN OF THE TERRITORY AND TOPOGRAPHIC SURVEY DATA BASED ON GIS AND REMOTE SENSING OF THE EARTH

Abstract. This article discusses the process of creating a digital twin of a territory using geographic information systems and open databases. The information processing method and the tools used when working on a digital twin are described. To determine the correctness of the data obtained, a comparative analysis is carried out with the data of the topographic work of the same territory. The results of digital processing are presented and prospects for further development of the method are proposed.

Keywords: digital twin, geographic information system, topography, comparative analysis.

Введение. В последние годы концепция цифровых двойников территорий получила широкое распространение в задачах территориального планирования, мониторинга окружающей среды и управления пространственным развитием. Цифровой двойник представляет собой виртуальную модель реального объекта или пространства, которая воспроизводит его геометрические, топологические и функциональные характеристики на основе разнородных пространственных данных. Применение подобных моделей позволяет повысить точность анализа, сократить временные и материальные затраты, а также обеспечить возможность многовариантного моделирования и прогнозирования.

Процесс создания цифрового двойника территории включает сбор и обработку данных дистанционного зондирования, геодезических измерений и геоинформационных систем (ГИС), а также их интеграцию в единую цифровую среду. Ключевым этапом является оценка точности полученной модели, поскольку качество цифрового двойника напрямую влияет на корректность принимаемых на его основе, решений. В качестве эталонных данных для такой оценки традиционно используются результаты топографической съёмки, отличающиеся высокой точностью и нормативной регламентированностью.

В данной статье рассматривается процесс создания цифрового двойника исследуемой территории на основе открытых источников информации, и проводится сравнительный анализ результатов с данными топографической съёмки, полученными с помощью приёмника спутниковой геодезической аппаратуры PrinCe i30 IMU Tx и электронного тахеометра Sokkia SET 550 RX-L. Сравнение направлено на выявление расхождений в плановом и высотном положении объектов, а также на оценку применимости цифрового двойника для практических задач. Полученные результаты позволяют определить степень соответствия цифровой модели реальной территории и обозначить перспективы её дальнейшего использования и совершенствования.

Исследуемая территория располагается в Республике Карелия, Прионежском муниципальном районе, Шуйском сельском поселении, д. Шуйская Чупа.

Площадь территории – 60 га.

Обследуемый участок расположен в северной части Прионежского муниципального района, к северу от территории базы отдыха Cosmos Karelia Resort, между восточным берегом оз. Укшозеро и д. Шуйская Чупа.

В таблице 1.1 представлены сведения об учтенных земельных участках, расположенных в границах обследуемого участка по данным «Публичной кадастровой карты» [3].

Таблица 1. Сведения об учтенных земельных участках

Table 1. Data on registered land plots

Адрес	Категория земель	Форма собственности	Разрешенное использование
Республика Карелия, Прионежский муниципальный район, Прионежское лесничество, Перозаводское участковое лесничество, 20В.41,54	Земли лесного фонда	Собственность публично-правовых образований	Для ведения лесного хозяйства

В соответствии с почвенной картой Республики Карелия Ведлозёрского сельского поселения Пряжинского национального муниципального района и Информационной системы «Почвенно-географическая база данных России» исследуемая территория характеризуется выходами прочных, твердых горных пород и подзолистым типом почвы [1] [2].

Сбор пространственных данных исследуемой территории целесообразно начинать с получения векторных данных границ участка в формате .shp на интернет-ресурсе High Conservation Value Forests (HCVF) [4]. Данный ресурс разработан в партнёрстве с системой добровольной лесной сертификации «Лесной эталон» и функционирует при поддержке ряда неправительственных природоохранных организаций, включая СПОК, Ассоциацию «НРГ», НП «Прозрачный мир» и другие, а также Фонда «Природа и люди». На интерактивной карте сайта границы исследуемой территории задаются путём построения полигонального объекта, после чего осуществляется выгрузка соответствующего векторного файла в формате .shp, используемого на последующих этапах анализа (рисунок 1).



Рисунок 1. Границы исследуемой территории
Figure 1. Study area boundaries

Для расчёта нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) применялись космические снимки Sentinel-2, полученные со спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства. В расчётах используются данные 4-го (Red) и 8-го (NIR) спектральных каналов за летний и зимний периоды при условии облачности не более 10%, что обеспечивает достаточное качество и информативность исходных данных. Загрузка спутниковых снимков осуществлялась с использованием веб-платформы Sentinel-Hub EO Browser [8]. Полученный файл границ территории в формате .shp импортируется в программную среду QGIS (версия 3.16), после чего дополнительно подключается модуль OSMStandart для работы с картографической подосновой и пространственной привязкой данных (рисунок 2).

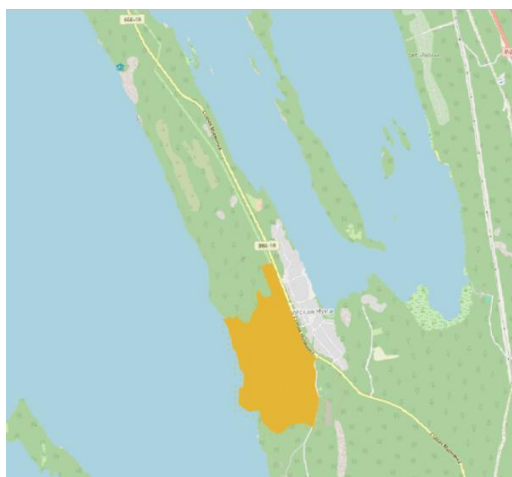


Рисунок 2. Файл .shp в QGIS
Figure 2. .shp-file in QGIS

Расчёт значений NDVI для зимнего и летнего периодов выполнялся на основе спутниковых снимков Sentinel-2 с использованием стандартной формулы: $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$. Вычисления проводились с применением инструмента «Калькулятор растров» в среде QGIS. По результатам расчётов формируются растровые изображения, визуализированные в виде градиентных цветовых шкал, что позволяет наглядно отразить

пространственное распределение растительного покрова и выявить сезонные различия его состояния (рисунок 3, рисунок 4).

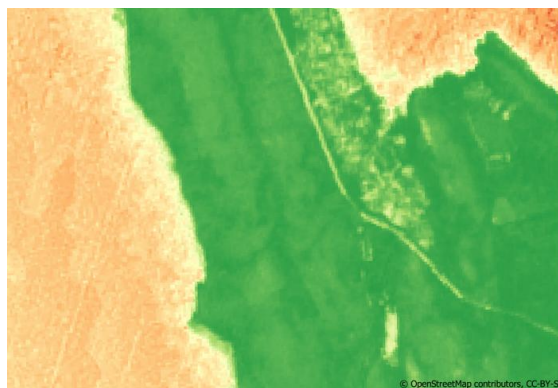


Рисунок 3. NDVI в летний период
Figure 3. NDVI in summer

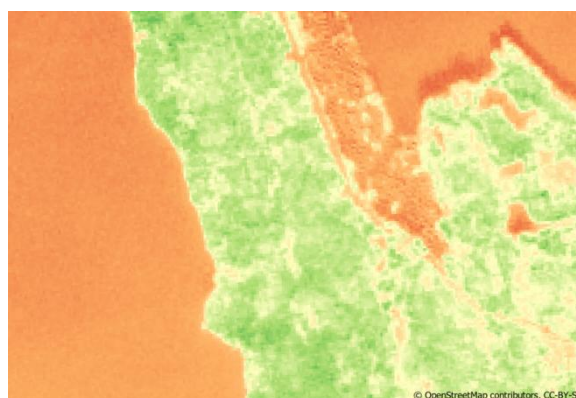


Рисунок 4. NDVI в зимний период
Figure 4. NDVI in winter

Для построения изолиний рельефа используется программное обеспечение QGIS (версия 3.16) в сочетании с модулем OpenTopography DEM и программным пакетом SAGA GIS (версия 2.3.3). С целью получения доступа к данным цифровой модели рельефа необходимо зарегистрироваться на сайте OpenTopography: High-Resolution Topography Data and Tools [5] и получить индивидуальный ключ доступа (API_key). В модуле OpenTopography DEM в качестве источника цифровой модели рельефа выбирается набор данных Copernicus Global DSM 30 m, а формат предоставления данных задаётся в режиме «Показать на карте». После загрузки DEM выполняется перепроецирование слоя через инструменты меню «Растр», что позволяет привести данные к единой системе координат и повысить точность дальнейшего анализа.

На заключительном этапе настройки визуализации в свойствах растрового слоя в разделе «Оформление» в качестве типа отображения выбирается режим «Теневой рельеф». Для интерполяции применяется метод кубической интерполяции; значение фактора задаётся равным 3, а также активируется параметр «ранняя передискретизация», что способствует более корректному отображению микрорельефа и повышает наглядность полученной модели поверхности (рисунок 6).

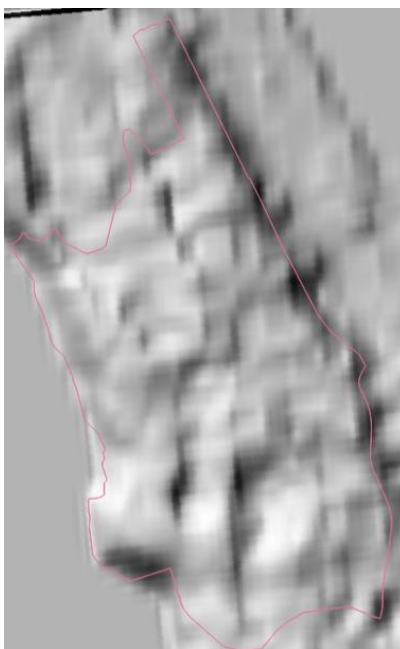


Рисунок 5. Перепроецированный рельеф
Figure 5. The reprojected terrain

С целью уменьшения вероятности ошибочной интерпретации кроны древесной растительности в качестве элементов рельефа необходимо выполнить предварительную обработку данных в программном комплексе SAGA GIS (рисунок 6). Данный этап позволяет повысить корректность моделирования рельефной поверхности за счёт фильтрации и сглаживания высотных аномалий, обусловленных наличием растительного покрова.

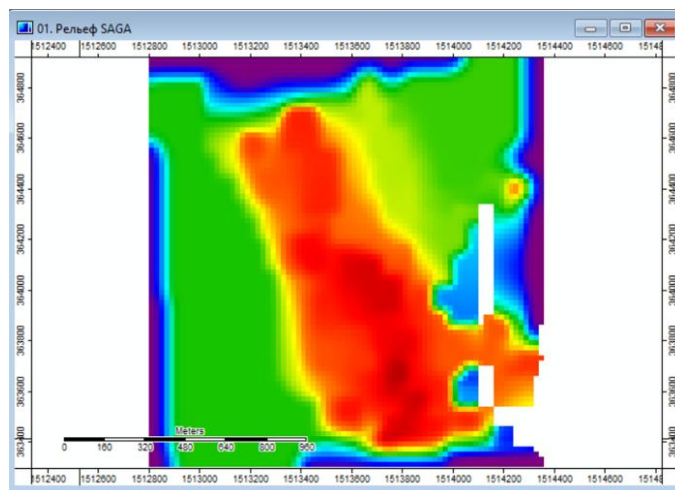


Рисунок 6. Рельеф в SAGA GIS
Figure 6. The SAGA terrain

Полученный в результате обработки файл далее импортируется в среду QGIS, где осуществляется построение изолиний рельефа. В качестве шага между изолиниями выбрано значение 0,5 м, что обеспечивает достаточную детализацию отображения высотных характеристик. Для повышения наглядности и удобства анализа изолинии снабжаются подписями абсолютных высот (рисунок 7).

Анализ таблицы атрибутов сформированного слоя изолиний показывает, что минимальное значение высоты на исследуемой территории составляет 34,5 м, в то время как максимальное значение достигает 80 м.



Рисунок 7. Изолинии рельефа в QGIS
Figure 7. Terrain isolines in QGIS

С целью исключения наложения участков с открытой поверхностью среди леса на участки, которые на последующих этапах исследования будут классифицированы как участки лесного покрова лиственного типа, выполняется формирование соответствующих полигональных объектов. Данные полигоны создаются на основе анализа разности высот, полученной из ранее построенных изолиний рельефа. При этом предполагается, что выявленные таким образом зоны характеризуются отсутствием древесной растительности (рисунок 8).

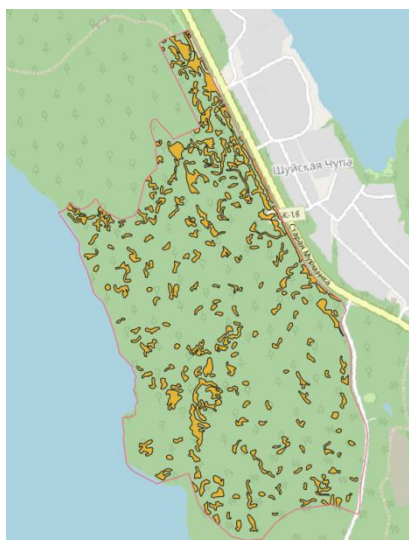


Рисунок 8. Полигоны «Участки территории с отсутствием древесной растительности»
Figure 8. Polygons of "Land plots with the absence of woody vegetation"

Получив необходимые данные по рельефу, на следующем этапе в проекте сохраняется только слой «Участки территории с отсутствием древесной растительности» и выполняется обработка космического снимка зимнего периода, который позволит выявить различия между хвойными и лиственными породами на исследуемой территории. Для получения результата применяется инверсия цветовой шкалы значений. Значения индекса в диапазоне от $-0,1454191$ до $0,0283727$ визуализируются белым цветом. Как показано на рисунке 4, указанные значения соответствуют водным объектам и дорожной инфраструктуре, расположенной вблизи исследуемой территории. Также белым цветом выделяется значение $0,2021645$, расположенное в пределах исследуемого участка. Данное значение интерпретируется как соответствующее лиственным участкам. Значения $0,3759563$ и $0,5497481$ отображаются единым цветом для упрощения визуального разграничения с остальной территорией и принимаются за участки, занятые хвойными насаждениями (рисунки 8 и 9).

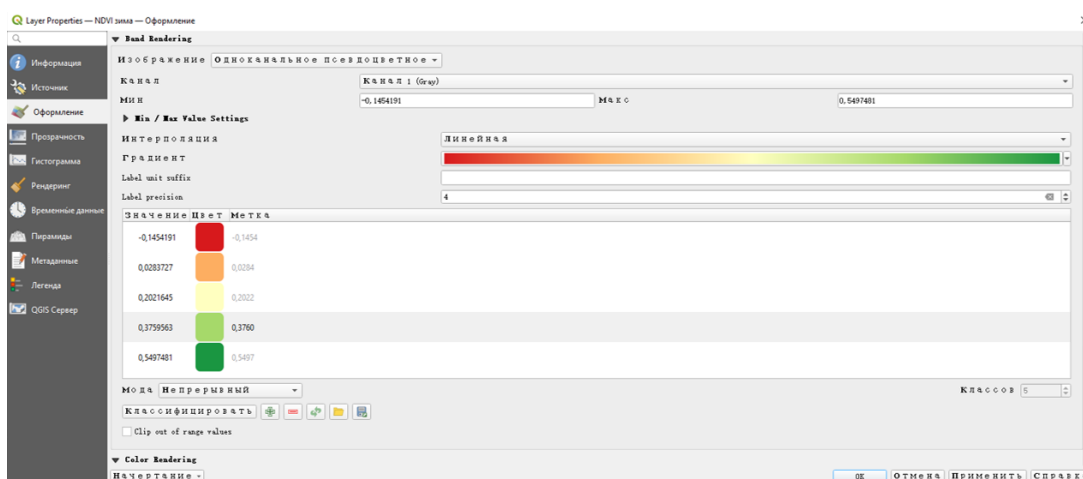


Рисунок 8. Одноканальное псевдоцветное изображение NDVI в зимний период
Figure 8. Single-channel pseudo-color NDVI image in winter

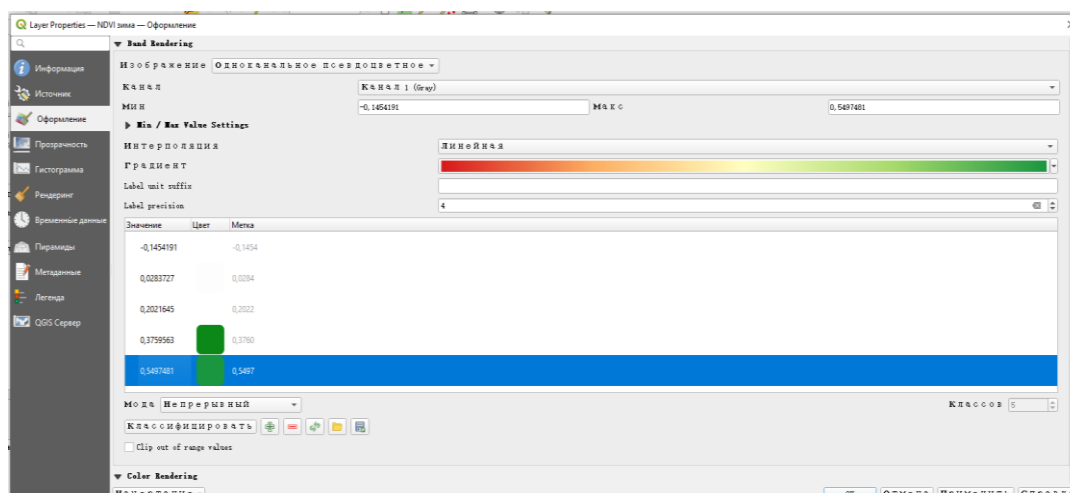


Рисунок 9. Одноканальное псевдоцветное инверсированное изображение NDVI в зимний период
Figure 9. Single-channel pseudo-color inverted NDVI image in winter

Далее производится векторизация участков с наименьшими значениями показателя за зимний период, которые интерпретируются как территории, занятые лиственными породами, что обусловлено характерными сезонными особенностями их спектрального отклика (рисунк 10).

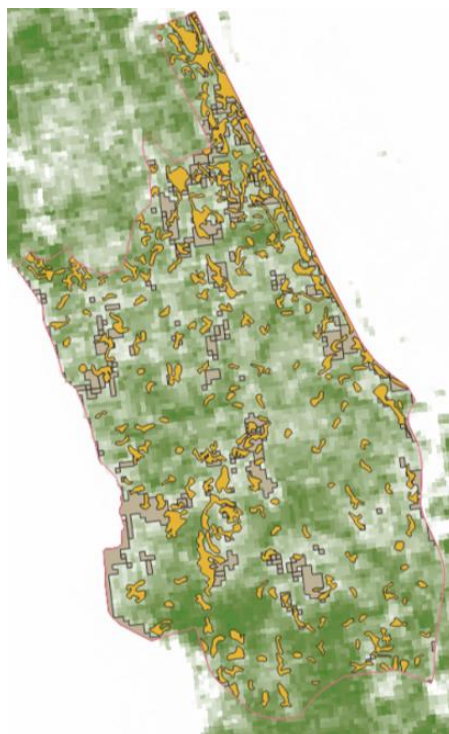


Рисунок 10. Полигоны «Территории с отсутствием древесной растительности» и лиственных пород

Figure 10. Polygons of "Territories with the absence of woody vegetation" and deciduous species

Для определения площади полигонов использовался Калькулятор полей. Площадь лиственных пород составила 5.5 га. Следовательно, можно сделать вывод, что из 60 гектаров 8.26 гектара – площадь с отсутствием древесной растительности, 5.5 гектар – площадь с лиственными деревьями, а площадь хвойных деревьев – 46.24 гектар (в процентном соотношении: территории с отсутствием древесной растительности и с древесной растительностью на этапе подроста – 13,8%, лиственные породы – 9,2%, хвойные породы – 77,6%).

Был выполнен сравнительный анализ полученных результатов с результатами топографических работ. Сопоставление данных дистанционного зондирования и результатов геоинформационного анализа с топографическими материалами позволяет оценивать точность выполненных расчётов, выявлять расхождения и оценивать корректность интерпретации пространственных характеристик исследуемой территории.

Инженерно-топографический план территории был составлен в масштабе 1:500 с сечением рельефа 0.5 м в местной системе координат МСК-10 и Балтийской системе высот 1977 года. Использовались следующие приборы: приёмник спутниковой геодезической аппаратуры PrinCe i30 IMU Tx и электронный тахеометр Sokkia SET 550 RX-L.

Камеральная обработка полевых данных проводилась на ПЭВМ с использованием программных комплексов CREDO и графического редактора «AutoCAD».

Часть топографической съёмки на открытой местности и развитие плано-высотного геодезического съёмочного обоснования на некоторых участках работы выполнено методом спутниковых геодезических измерений в режиме реального времени (RTK) с использованием спутникового геодезического приёмника PrinCe i30 IMU Tx.

На объекте, для обеспечения выполнения детальной съёмки всей протяжённости объекта, было заложено геодезическое обоснование с помощью электронного тахеометра и спутникового GPS оборудования.

По данным изысканий большая часть участка изысканий покрыта смешанным лесом, на части территории расположены отдельно стоящие деревья мелколиственных и хвойных пород, часть покрыта порослью, кустарниками и травами.

Согласно составленной пересчётной ведомости общее количество деревьев – 31 341, из них: сосна – 23 836, ель – 310, берёза – 3116, ива – 23, рябина – 56, осина – 3654, ольха – 306, липа – 16, черёмуха – 24. Данные о площади подроста, кустарников и непокрытых лесом участков отсутствуют. Следовательно, если предполагать, что территория полностью покрыта древесными растениями, по результатам перечёта 77% территории покрывают хвойные породы, 23% – лиственные (что составляет в пересчёте на площадь участка 46.2 и 13.8 га).

Почвенный покров участка представлен в основном урбанозёмами и конструкторскими, сформированными на техногенных насыпных и ледниковых отложениях.

В геоморфологическом отношении район работ характеризуется грядово-холмистым рельефом. Минимальное значение высоты рельефа – 34,5 м, максимальное – 70 м.

В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод о том, что расхождение площадей, покрытых древесной растительностью составило 7%, а расхождение высот рельефа составило 14%.

Заключение. В результате проведённого исследования был разработан и апробирован процесс создания цифрового двойника территории, основанный на интеграции пространственных данных и современных методов их обработки. Полученная цифровая модель была сопоставлена с результатами топографической съёмки, что позволило оценить точность и достоверность предложенного подхода. Сравнительный анализ показал высокую степень соответствия между параметрами цифрового двойника и данными топографической съёмки, а выявленные расхождения носят локальный характер и в большинстве случаев укладываются в допустимые пределы погрешностей. Это подтверждает возможность использования цифровых двойников в качестве надёжного инструмента пространственного анализа и моделирования территорий при отсутствии доступа к топографическим профессиональным данным.

Применение цифрового двойника позволило не только воспроизвести характеристики рельефа и объектов местности, но и обеспечить более наглядное представление пространственной структуры территории, а также повысить оперативность обновления данных по сравнению с традиционными методами топографической съёмки. Таким образом, метод цифрового двойника может рассматриваться как эффективное дополнение, а в ряде задач — как альтернатива классическим картографическим и геодезическим подходам.

Перспективы использования цифровых двойников в картографии связаны, прежде всего, с развитием динамических и интерактивных карт, поддержкой мониторинга изменений территории в реальном или квазиреальном времени, а также моделированием сценариев природных и антропогенных процессов. В дальнейшем данный метод может быть применён для задач территориального планирования, управления инфраструктурой, оценки рисков природных явлений, анализа землепользования и градостроительного моделирования. Кроме того, цифровые двойники открывают возможности для автоматизации обновления картографических материалов, интеграции разнородных источников данных и повышения точности пространственных прогнозов, что делает их одним из ключевых направлений развития современной картографии.

Список использованных источников

1. Ведлозёрское сельское поселение Пряжинского национального муниципального района [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://vedlozero.ru/karelia/maps/map-pochva> (дата обращения: 10.12.2025).

2. Информационная система Почвенно-географической базы данных России [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://soil-db.ru/soilatlas/razdel-8-ispolzovanie-zemelnyh-resursov-i-pochv/8-2-regiony-rossiyskoi-federacii/respublika-kareliya> (дата обращения: 30.11.2025).
3. Публичная кадастровая карта [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://pkk5.rosreestr.ru/> (дата обращения: 17.11.2025).
4. High Conservation Value Forests [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://hcvf.ru/ru/maps/karelia> (дата обращения: 22.12.2025).
5. OpenTopography High-Resolution Topography Data and Tools [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://opentopography.org/> (дата обращения: 25.12.2025).
6. QGIS [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://www.qgis.org/ru/site/about/>
7. SAGA GIS [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://saga-gis.sourceforge.io/>
8. Sentinel-Hub EO Browser [Электронный ресурс]. Режим доступа - <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (дата обращения 30.11.2025).

Reference

1. Vedlozerskoye rural settlement of Pryazhinsky National Municipal district [Electronic resource]. Access mode - <https://vedlozero.ru/karelia/maps/map-pochva> (date of request: 12/10/2025).
2. The information system of the Soil and geographical database of Russia [Electronic resource]. Access mode - <https://soil-db.ru/soilatlas/razdel-8-ispolzovanie-zemelnyh-resursov-i-pochv/8-2-regiony-rossiyskoi-federacii/respublika-kareliya> (date of request: 11/30/2025).
3. Public cadastral map [Electronic resource]. Access mode - <https://pkk5.rosreestr.ru/> (date of request: 11/17/2025).
4. High Conservation Value Forests [Electronic resource]. Access mode - <https://hcvf.ru/ru/maps/karelia> (date of request: 12/22/2025).
5. OpenTopography High-Resolution Topography Data and Tools [Electronic resource]. Access mode - <https://opentopography.org/> (date of request: 12/25/2025).
6. QGIS [Electronic resource]. Access mode - <https://www.qgis.org/ru/site/about/>
7. SAGA GIS [Electronic resource]. Access mode - <https://saga-gis.sourceforge.io/>
8. Sentinel-Hub EO Browser [Electronic resource]. Access mode - <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (date of request: 11/30/2025).

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE DIGITAL TWIN OF THE TERRITORY AND TOPOGRAPHIC SURVEY DATA BASED ON GIS AND REMOTE SENSING OF THE EARTH

Dzenish Margarita S.,

2nd year postgraduate student at Institute of forest and nature management
Department of Forest Taxation, Forest Management and Geoinformation Systems,
St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov
Saint-Petersburg
E-mail: margo_makeeva@bk.ru

Dzenish Denis I.,

3^d year postgraduate student at Institute of forest and nature management
Department of General Ecology, Plant Anatomy and Physiology,
St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov
Saint-Petersburg
E-mail: dzenish14@yandex.ru

© Дзениш М.С., Дзениш Д.И., 2026

РАЗДЕЛ СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СТАТИСТИКА

SECTION SYSTEM ANALYSIS, MANAGEMENT, INFORMATION PROCESSING AND STATISTICS

УДК 004.9:629.7

Маклашин Д.И., Вагизов М.Р.

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЯ ОБЛАСТИ ГРУППОЙ БАС С УЧЁТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ (ЧАСТЬ 1)

Маклашин Денис Игоревич

аспирант 1 курса

кафедра информационных систем и технологий

Институт леса и природопользования

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова

Санкт-Петербург

E-mail: densuper2005@gmail.com

Вагизов Марсель Равильевич

доктор технических наук, доцент

проректор по информационным технологиям и цифровой трансформации,

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается задача планирования траекторий покрытия областей сложной формы группой дронов. В отличие от геометрических методов планирования покрытия, предложенный подход комплексно учитывает ограниченный энергобюджет и кинематику движения (минимальный радиус поворота). Метод базируется на представлении области в виде гексагональной сетки и энергетически ограниченной кластеризации, что позволяет автоматически определять необходимое число БАС. Построение маршрутов внутри кластеров выполняется муравьиным алгоритмом оптимизации с использованием кривых Дубинса. Экспериментальное моделирование подтверждает, что алгоритм обеспечивает полное покрытие территории и равномерное распределение нагрузки, гарантируя кинематическую реализуемость маршрутов в рамках заданного энергобюджета.

Ключевые слова: Групповое управление БАС, планирование покрытия (CPP), траектории Дубинса, муравьиный алгоритм, энергоэффективность, гексагональная сетка.

PLANNING THE COVERAGE OF THE AREA BY THE UAS GROUP, TAKING INTO ACCOUNT ENERGY AND KINEMATIC LIMITATIONS (PART 1)

Annotation. The problem of planning trajectories for covering areas of complex shape by a group of drones is considered. Unlike geometric coverage planning methods, the proposed approach comprehensively takes into account a limited energy budget and motion kinematics (minimum turning radius). The method is based

on the representation of an area in the form of a hexagonal grid and energy-limited clustering, which allows you to automatically determine the required number of BAS. Routes within clusters are built using an ant-like optimization algorithm using Dubins curves. Experimental modeling confirms that the algorithm provides complete coverage of the territory and uniform load distribution, ensuring the kinematic feasibility of routes within a given energy budget.

Keywords: *UAS group control, coverage planning (CPP), Dubins trajectories, ant algorithm, energy efficiency, hexagonal grid.*

Введение. В последние годы беспилотные авиационные системы (БАС) становятся всё более востребованным инструментом в широком спектре прикладных задач — от мониторинга территорий и сельского хозяйства до поисково-спасательных операций и инспекции труднодоступных объектов. Во многих из этих сценариев требуется обеспечить полное и систематическое покрытие заданной области, например при обследовании сельскохозяйственных угодий, крыш зданий, лесных массивов или зон разрушений. Подобные задачи традиционно относятся к классу задач планирования траектории покрытия (*coverage path planning, CPP*) [1, 4].

На практике автономные дроны, особенно малые и относительно недорогие платформы, существенно ограничены по ёмкости аккумулятора, манёвренности и общей энергетической эффективности. Классические стратегии покрытия, такие как «зигзагообразные» или сеточные маршруты, ориентированы преимущественно на геометрическую полноту покрытия и часто приводят к большому числу разворотов и неэффективных перелётов. В результате значительная часть энергии расходуется на манёвры, что снижает фактическое время полезной работы и может сделать выполнение задачи покрытия невозможным в рамках доступного энергобюджета.

В связи с этим всё большую актуальность приобретают методы CPP, ориентированные не только на минимизацию длины траектории, но и на учёт энергетической стоимости движения, ограничений на кривизну траектории и общего энергобюджета дрона. В ряде работ уже предпринимались попытки учитывать эти факторы. Так, в [2] предлагается алгоритм планирования покрытия, минимизирующий энергопотребление с учётом затрат на манёвры и характеристик силовой установки. В работе [3] показано, что явный учёт кривизны траектории, в частности с использованием модели Дубинса, может существенно повлиять на энергетическую эффективность и реализуемость маршрутов для манёвренных ограниченных платформ.

Тем не менее большинство классических методов CPP — включая клеточную декомпозицию, регулярные сетки и зигзагообразные траектории — по-прежнему ориентированы главным образом на геометрическое покрытие области и лишь в ограниченной степени учитывают кинематические и энергетические ограничения. Это существенно ограничивает их применимость в задачах, где дрон должен действовать в рамках жёстких ограничений по аккумулятору и минимальному радиусу поворота.

В данной работе предлагается подход к планированию покрытия области, объединяющий несколько ключевых идей. Во-первых, область покрытия представляется в виде гексагональной сетки, обеспечивающей плотное и равномерное распределение точек покрытия. Во-вторых, точки покрытия кластеризуются с учётом ограничений по допустимому энергобюджету одного маршрута, что позволяет декомпозировать исходную задачу на подзадачи, каждая из которых может быть выполнена отдельным дроном. В-третьих, планирование маршрутов внутри кластеров осуществляется с явным учётом ограничений на кривизну траектории, используя модели, близкие к траекториям Дубинса, что обеспечивает кинематическую реализуемость маршрутов. Наконец,

оптимизация порядка посещения точек направлена на минимизацию суммарных энергетических затрат, а не только геометрической длины пути.

Предлагаемый метод ориентирован прежде всего на применение в системах малых БАС, выполняющих задачи покрытия относительно компактных, но сложных по форме областей, где критически важны экономия энергии, снижение числа манёвров и надёжное выполнение задачи покрытия в рамках ограниченного энергобюджета.

Постановка задачи. Пусть задана ограниченная область покрытия $\Omega \subset \mathbb{R}^2$, описанная произвольным многоугольником. Требуется обеспечить полное покрытие области Ω с использованием множества малых беспилотных авиационных систем (БАС), обладающих ограниченным энергобюджетом и кинематическими ограничениями, характерными для реальных летательных платформ.

Для аппроксимации задачи покрытия область Ω дискретизируется в конечное множество точек $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, полученных в результате гексагональной дискретизации области. Использование гексагональной сетки позволяет обеспечить равномерное покрытие области с минимальной избыточностью и равномерным перекрытием зон обзора. Шаг сетки определяется параметром R , соответствующим эффективному радиусу покрытия одной точки.

Все БАС стартуют и возвращаются в общую базовую точку (депо) $D \in \mathbb{R}^2$. Для каждого дрона требуется построить замкнутый маршрут, начинающийся и заканчивающийся в точке D и проходящий через подмножество точек из P .

Маршруты БАС должны удовлетворять следующим ограничениям:

1. Суммарные энергетические затраты маршрута не должны превышать заданный порог $E \leq E_{max}$, где E_{max} — максимально допустимый энергобюджет одного дрона;
2. Траектория движения БАС должна быть реализуема с учётом минимального радиуса поворота, что моделируется с использованием кривых Дубинса.
3. Требуется минимизировать суммарные энергетические затраты маршрутов при условии полного покрытия всех точек множества P .

Таким образом, задача состоит в следующем:

- обеспечить покрытие всей области Ω с дискретизацией гексагональной сеткой с шагом R ;
- разбить множество точек покрытия P на K кластеров, каждый из которых может быть обслужен отдельным дроном в рамках допустимого энергобюджета;
- для каждого кластера построить маршрут БАС, начинающийся и заканчивающийся в депо D , с учётом энергетических и кинематических ограничений.

Основные этапы предлагаемого алгоритма. Решение задачи осуществляется в несколько этапов. Этапы изображены на рисунке 1, где представлена диаграмма активности алгоритма. На первом этапе (Дискретизация) выполняется генерация гексагональной сетки внутри многоугольной области Ω с последующей фильтрацией точек, лежащих вне области. В работе используется шаг сетки $R=45$.

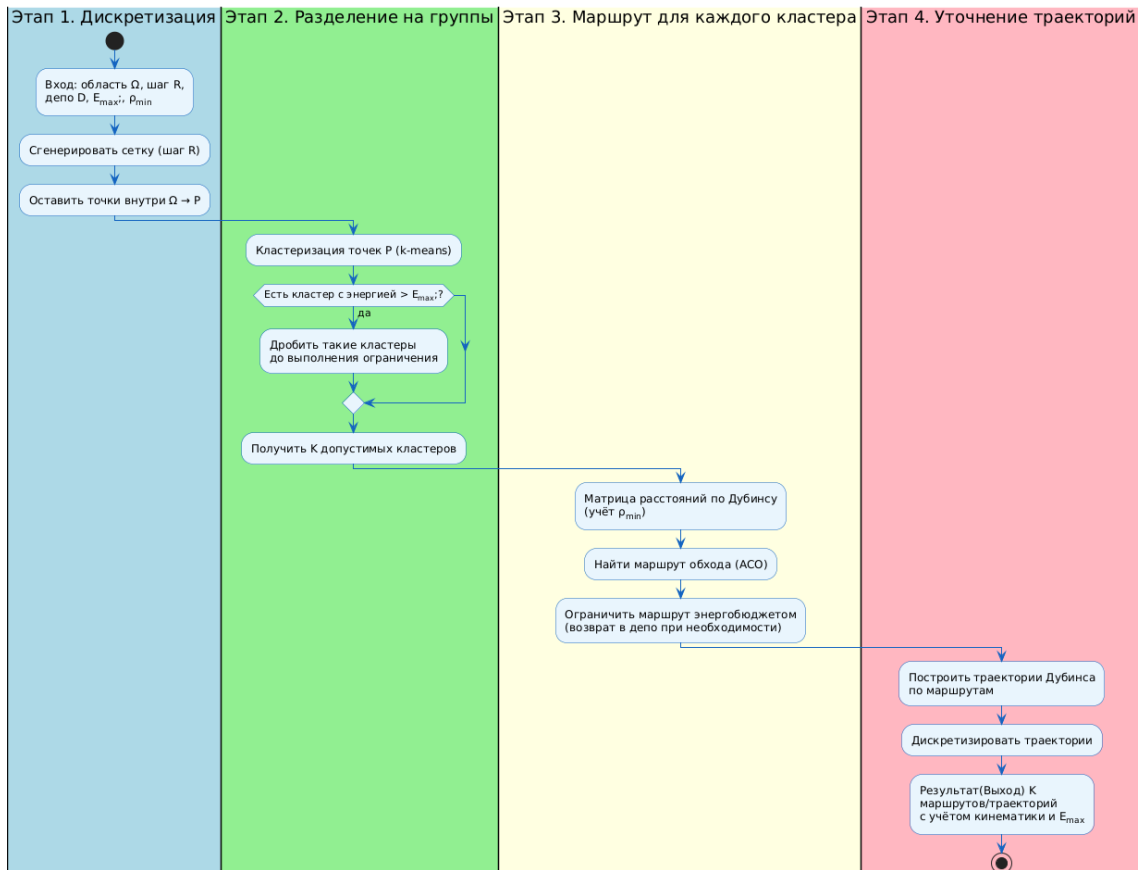


Рисунок 1 – Диаграмма активности предложенного алгоритма для покрытия области БАС.

Figure 1 – Activity diagram of the proposed algorithm for covering the UAV area.

На втором этапе (Разделение на группы) выполняется рекурсивная кластеризация точек покрытия с учётом энергетических ограничений. Инициализация центроидов осуществляется методом наиболее удалённых точек (*farthest point sampling*), после чего применяется алгоритм k с числом кластеров $k = 3-5$. Для каждого кластера оценивается приближённая энергетическая стоимость маршрута по формуле:

$$E \sim 2 \times \sum d(i, c) \times k_t \times e_m, \text{ где}$$

$d(i, c)$ — евклидово расстояние до центра, $k_t = 1.2$ — коэффициент учёта разворотов, $e_m = 1$ — энергозатраты на метр. В случае превышения порога E_{max} кластер рекурсивно разбивается на подкластеры.

На третьем этапе для каждого кластера решается задача маршрутизации с возвратом в депо с учётом кинематических ограничений. Для этого используется муравьиный алгоритм (ACO) оптимизации с числом муравьёв 40 и числом итераций 60 (гиперпараметры: $\alpha = 1$, $\beta = 2$, $q = 100$, $\rho = 0.1$) Матрица расстояний рассчитывается на основе длины кратчайших траекторий Дубинса. При построении маршрутов вводится жёсткое ограничение на энергобюджет: при превышении допустимого остатка энергии дальнейшее расширение маршрута прекращается.

На заключительном этапе (Уточнение траекторий) для каждого сегмента маршрута строится соответствующая траектория Дубинса, которая затем дискретизируется с заданным шагом (1 метр) для последующей визуализации и анализа.

Вычислительные эксперименты. Для оценки предложенного метода была реализована программная модель на языке Python с использованием библиотек *NumPy*, *SciPy*, *scikit-learn*, *Shapely*

и *Matplotlib*. Планирование траекторий с учётом кинематических ограничений осуществлялось с использованием библиотеки *dubins*.

В качестве тестовой среды рассматривалась двумерная область покрытия Ω , заданная произвольным невыпуклым многоугольником с пятью вершинами. Геометрия области генерировалась случайным образом с фиксированным зерном генератора случайных чисел, что обеспечивало воспроизводимость экспериментов ($seed=42$).

Для дискретизации области использовалась регулярная гексагональная сетка с шагом $R = 45$. В результате внутри области было сгенерировано от 40 до 70 точек покрытия (в зависимости от формы полигона). В качестве общей базовой точки (депо) была выбрана фиксированная точка, расположенная вне области покрытия.

Максимально допустимый энергобюджет одного дрона был установлен равным $E_{max} = 5000$ условных единиц. Минимальный радиус поворота при построении траекторий Дубинса составлял 45 м. Удельные энергозатраты на метр пути принимались равными $e_m = 1$, а коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на манёвры, — $k_t = 1.2$.

Методика проведения эксперимента. Эксперимент состоял из следующих этапов:

1. Генерация области покрытия и построение гексагональной сетки точек покрытия.
2. Кластеризация точек покрытия с учётом энергетических ограничений.
3. Планирование маршрутов для каждого кластера с использованием муравьиного алгоритма оптимизации и кинематических ограничений Дубинса.
4. Построение и дискретизация итоговых траекторий для каждого дрона.
5. Анализ полученных маршрутов и проверка выполнения всех ограничений.

В ходе эксперимента фиксировались следующие показатели:

- количество полученных кластеров (фактически задействованных дронов);
- число точек покрытия, обслуженных каждым дроном;
- длина маршрута каждого дрона;
- суммарная длина всех маршрутов;
- затрачена энергия.

Результаты. На рис. 2 представлена визуализация типичного результата работы алгоритма для области сложной формы.

Цветом обозначены кластеры точек покрытия, соответствующие отдельным дронам, а сплошными линиями показаны построенные траектории движения с учётом кинематических ограничений. Стрелки указывают направление движения дронов. Как видно на рисунке в результате работы алгоритма все точки покрытия внутри области Ω были успешно обслужены, при этом каждый маршрут начинался и завершался в общей базовой точке. Число задействованных дронов определялось автоматически в процессе кластеризации и в рассматриваемом эксперименте составило три дрона.

Длина индивидуальных маршрутов не превышала допустимого энергетического порога $E_{max} = 5000$, что подтверждает корректность этапа энергетически ограниченной кластеризации. При этом маршруты демонстрировали плавный характер без резких разворотов, что обусловлено использованием траекторий Дубинса при расчёте матрицы расстояний. В таблице 1 приведены результаты работы алгоритма, представленного на рисунке 2.

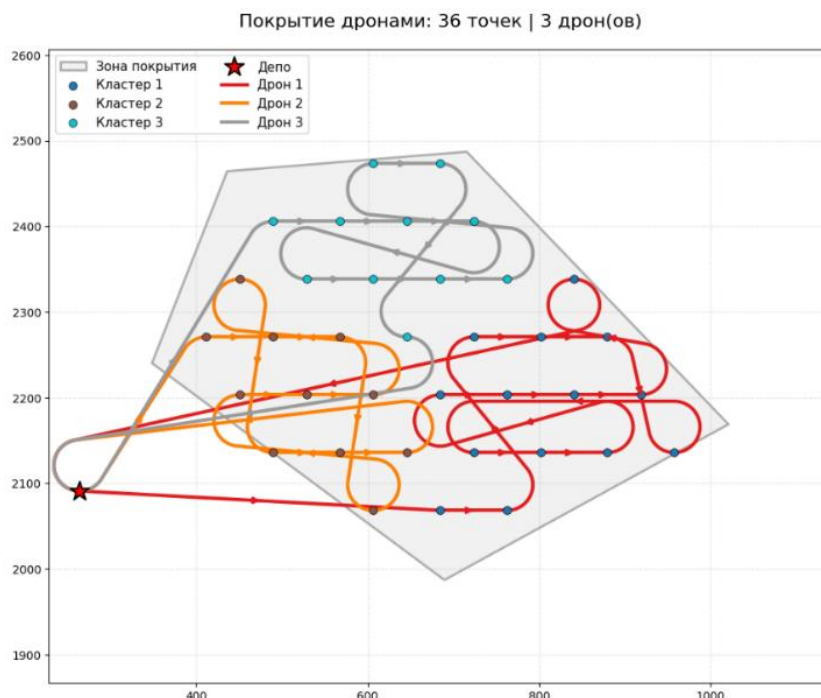


Рисунок 2 - Результат работы алгоритма для 36 точек и 3-х БАС.
Figure 2 is the result of the algorithm for 36 points and 3 drones.

Суммарная длина всех маршрутов составила порядка 9481,7 метров, при этом наблюдалось разумное распределение нагрузки между дронами: кластеры имели сопоставимое число точек покрытия и близкие энергетические затраты. Это свидетельствует о способности предложенного метода эффективно балансировать маршруты при ограниченном энергобюджете.

Таблица 1 – Результаты эксперимента облета БАС синтетического полигона

Table 1 - Results of the UAS flyby experiment of a synthetic testing ground.

Дрон	Кластер	Количество точек	Длина маршрута (м)	Затраченная энергия (y.e)
1	1	14	3805,1	4025,6
2	2	11	2804,2	3145,8
3	3	11	2872,5	2998,7
Итого	-	36	9481,7	

Отдельно следует отметить, что введение жёсткого ограничения на энергопотребление на этапе муравьиного алгоритма приводило к раннему завершению построения маршрута в случаях, когда дальнейшее расширение становилось невозможным. Это позволяло избежать построения нереализуемых маршрутов и повышало устойчивость алгоритма.

Обсуждение. Полученные экспериментальные результаты показывают, что предложенный метод позволяет эффективно решать задачу покрытия области сложной формы с учётом энергетических и кинематических ограничений. Использование гексагональной сетки обеспечивает равномерное покрытие области, а энергетически ограниченная кластеризация позволяет автоматически определять необходимое число дронов.

Следует отметить, что используемая модель энергопотребления носит приближённый характер и не учитывает, например, влияние ветра, изменения высоты полёта или динамику

скорости. Тем не менее даже в таком упрощённом виде она позволяет существенно повысить реализуемость маршрутов по сравнению с чисто геометрическими методами покрытия.

Заключение. В данной работе был предложен метод планирования траектории покрытия области сложной формы для группы беспилотных летательных аппаратов с учётом энергетических и кинематических ограничений. В отличие от классических подходов coverage path planning (планирование покрытия), ориентированных преимущественно на геометрическую полноту покрытия, предложенный метод явно учитывает ограниченный энергобюджет дронов и минимальный радиус поворота, что делает построенные маршруты кинематически реализуемыми и более близкими к условиям реальной эксплуатации.

Ключевой особенностью подхода является использование энергетически ограниченной кластеризации точек покрытия, полученных на основе гексагональной дискретизации области. Такой подход позволяет автоматически определять количество необходимых маршрутов и эффективно распределять нагрузку между БАС, избегая построения маршрутов, превышающих допустимый энергетический порог. Планирование маршрутов внутри кластеров осуществляется с использованием муравьиного алгоритма оптимизации и модели траекторий Дубинса, что обеспечивает плавность движения и снижение затрат энергии на манёвры.

Результаты вычислительных экспериментов на моделируемых областях сложной формы подтверждают работоспособность предложенного метода и его способность обеспечивать полное покрытие области при соблюдении заданных ограничений. Полученные маршруты характеризуются разумным балансом между длиной, числом манёвров и энергетическими затратами, а также демонстрируют устойчивость алгоритма к изменению формы области покрытия.

В качестве направлений дальнейших исследований можно отметить расширение энергетической модели с учётом динамики скорости, влияния ветра и изменения высоты полёта, а также исследование более строгих методов оптимизации маршрутов, включая гибридные и детерминированные алгоритмы. Кроме того, представляется перспективным рассмотрение сценариев с неоднородными дронами, различающимися по энергобюджету и манёвренным характеристикам, а также интеграция предложенного подхода в системы онлайн-планирования для адаптации маршрутов в реальном времени.

Список использованных источников

1. Cabreira, T.M., Brisolara, L.B., & Ferreira Jr., P.R. (2019). Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. *Drones*.
2. Xiong, Z.; Han, C.; Wang, X.; Gao, L. A Coverage Path Planning Method with Energy Optimization for UAV Monitoring Tasks. *J. Low Power Electron. Appl.* 2025, 15, 39.
3. Li L, Shi D, Jin S, Yang S, Zhou C, Lian Y, Liu H. Exact and Heuristic Multi-Robot Dubins Coverage Path Planning for Known Environments. *Sensors (Basel)*. 2023 Feb 25;23(5):2560. doi: 10.3390/s23052560. PMID: 36904764; PMCID: PMC10007483.
4. Enric Galceran, Marc Carreras, A survey on coverage path planning for robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 61, Issue 12, 2013, Pages 1258-1276, ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
5. Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colonies for the traveling salesman problem. *BioSystems*, 43(2), 73–81.
6. Dubins, L. E. (1957). On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 79(3), 497–516.

Reference

1. Cabreira, T.M., Brisolara, L.B., & Ferreira Jr., P.R. (2019). Survey on Coverage Path Planning with Unmanned Aerial Vehicles. *Drones*.
2. Xiong, Z.; Han, C.; Wang, X.; Gao, L. A Coverage Path Planning Method with Energy Optimization for UAV Monitoring Tasks. *J. Low Power Electron. Appl.* 2025, 15, 39.
3. Li L, Shi D, Jin S, Yang S, Zhou C, Lian Y, Liu H. Exact and Heuristic Multi-Robot Dubins Coverage Path Planning for Known Environments. *Sensors (Basel)*. 2023 Feb 25;23(5):2560. doi: 10.3390/s23052560. PMID: 36904764; PMCID: PMC10007483.
4. Enric Galceran, Marc Carreras, A survey on coverage path planning for robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 61, Issue 12, 2013, Pages 1258-1276, ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>.
5. Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colonies for the traveling salesman problem. *BioSystems*, 43(2), 73–81.
6. Dubins, L. E. (1957). On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 79(3), 497–516.

PLANNING THE COVERAGE OF THE AREA BY THE UAS GROUP, TAKING INTO ACCOUNT ENERGY AND KINEMATIC LIMITATIONS (PART 1)

Maklashin Denis I.,

1st year postgraduate student

Department of Information Systems and Technologies of St. Petersburg State Technical University named after S.M. Kirov

Saint-Petersburg

E-mail: densuper2005@gmail.com

Vagizov Marsel R.,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Vice-Rector for information technologies and digital transformation

Russian State Hydrometeorological University

Saint-Petersburg

E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

© Маклашин Д.И., Вагизов М.Р., 2026

УДК 004.9:556.043:551.506

Батмазова А.А., Гайдукова Е.В., Дуганна К.Б., Плотникова Е.М., Яковлев К.А.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ СБОР И ИНТЕГРАЦИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ: МЕТОДЫ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Батмазова Анна Александровна

ассистент

кафедры Инженерной гидрологии,

Институт гидрологии и океанологии

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: batmazovaa@mail.ru

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

Дуганна Кавиша Бандара

Магистр 1 курса

Институт гидрологии и океанологии

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: bandarakaveesha1998@gmail.com

Плотникова Екатерина Максимовна

Магистр 1 курса

Институт гидрологии и океанологии

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: sam.tdk@bk.ru

Яковлев Кирилл Алексеевич

Магистр 1 курса

Институт гидрологии и океанологии

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: sulfatokulov@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается возможность создания платформы, предоставляющей пользователю гидрометеорологические данные в архивном формате, полученные с использованием технологий парсинга и прошедших предварительную обработку. Приводится обзор существующих открытых ресурсов гидрометеорологических данных и погодных API. Особое внимание уделяется попытке формирования запросов – с помощью среды программирования Matlab – с целью извлечения данных. Описаны возможности интеграции кода в некоторые конструкторы сайтов для удобства потенциального использования, а также работа с инструментами по созданию баз данных.

Ключевые слова: гидрометеорологические данные, парсинг, погодные API, Matlab, phpMyAdmin.

AUTOMATED COLLECTION AND INTEGRATION OF HYDROMETEOROLOGICAL DATA: METHODS AND FIRST RESULTS

Annotation. The article explores the feasibility of creating a platform that provides users with pre-processed, archived hydrometeorological data obtained using parsing technologies. An overview of existing open hydrometeorological data resources and weather APIs is provided. Particular attention is paid to query generation using the Matlab programming environment for data extraction. The article also describes the possibilities of integrating the code into certain website builders for ease of use, as well as working with database creation tools.

Keywords: Hydrometeorological data, parsing, weather API, Matlab, phpMyAdmin.

Введение. Ежегодно возрастает объем гидрометеорологической информации, требующий эффективных решений для сбора, обработки и анализа больших массивов разнородных данных.

В настоящее время существует не так много открытых источников с гидрометеорологическими данными (далее по тексту – ГМ-данные). Наиболее популярными и широко известными являются такие ресурсы как *R-ArcticNet*, *Climate Explorer (KNMI)*; архивы Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО), Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ МЦД); данные с сайтов «Расписание погоды» (*rp5.ru*), справочно-информационного портала «Погода и климат», ГИС ЦП Вода (ранее – АИС ГМВО), ГИС-портал Центра регистра и кадастра, *allrivers.ru*.

Перечисленные выше ресурсы – лишь малая, наиболее часто используемая часть колоссального объема информации.

Цель настоящего исследования – описать первые этапы создания платформы, которая будет предоставлять в архивном и графическом формате гидрометеорологические данные, собранные с различных ресурсов и прошедшие предварительную обработку для удобства восприятия, решая тем самым вопрос разрозненности данных.

Для достижения цели решались следующие задачи:

- обзор функционала и определение недостатков перечисленных выше ресурсов, содержащих ГМ-данные;
- создание базы гидрологических данных средствами *phpMyAdmin*;
- формирование запросов по автоматизированному сбору гидрометеорологических данных с различных ресурсов;
- обзор погодных API и получение API ключа;
- выбор системы управления контентом для создания сайта и интеграция результатов предыдущих задач.

1. Обзор функционала существующих ресурсов ГМ-данных

- *R-ArcticNet* – база данных речного стока и некоторых метеорологических характеристик Арктической зоны. Электронный ресурс предоставляет информацию о стоке арктических водосборных бассейнов за период с 1960 по 2001 гг. [1]. Данные доступны для копирования и переноса в *Excel*, после чего требуют дополнительной обработки.

- *Climate Explorer* – веб-приложение для статистического анализа климатических данных. Содержит большой объем климатических данных, а также инструменты для анализа. Является частью климатического центра Всемирной Метеорологической организации при Королевском нидерландском метеорологическом институте (*KNMI*). Дает возможность получить данные как ретроспективные, так и сценарные, за период с 1850 по 2100 гг., по сетке с разрешением 1/16°.

Данные для моделирования в *Climate Explorer* берутся из набора *Localized Constructed Analogs (LOCA)*. *LOCA* масштабирует температуру или осадки, которые моделируются с помощью климатических моделей с заданным разрешением [2]. Результат представляется в виде *raw data*, то есть в формате сырых данных месячной дискретности, без какой-либо трансформации, очистки или агрегации. Массив, отображенный на рисунке 1 (б), доступен для копирования и переноса в *Excel* также с последующей обработкой.

а)

б)

Choose a field and press this button							# ave_region :: lon= 40.312 42.188, lat= 63.750 65.000	# tas [Celsius] near-Surface Air Temperature	# tas [Celsius] near-Surface Air Temperature						
							# raising grid box region lon= 40.312 42.188, lat= 63.750 65.000	# tas [Celsius] near-Surface Air Temperature	# tas [Celsius] near-Surface Air Temperature						
							1850 -19.11369	-15.75522	-9.890991	-2.782177	3.966949	10.38031	13.79309	11.73813	6.712219
							1851 -17.34345	-16.69828	-9.775935	-2.794356	3.946528	10.02589	13.36846	11.95395	6.543185
							1852 -17.37624	-15.55820	-9.393250	-2.314941	4.143463	10.54987	13.87385	11.75494	6.868530
							1853 -18.12091	-16.14515	-9.202576	-2.746300	4.183350	11.14117	13.69391	11.99020	6.951935
							1854 -17.85394	-15.20276	-10.14329	-3.021688	4.933142	10.62088	13.35413	11.66440	6.472364
							1855 -18.53485	-16.87134	-10.08115	-2.536743	4.265945	10.90576	13.49799	12.83598	6.326984
							1856 -17.62422	-15.19214	-9.743973	-2.800291	4.817359	10.60412	13.88637	11.81861	6.133520
							1857 -17.58597	-14.23251	-9.905929	-3.285259	4.164688	10.24957	12.77551	11.46158	6.455566
							1858 -16.96555	-15.84866	-10.31714	-3.164215	4.134988	10.68187	13.35767	11.73831	6.201965
							1859 -18.42361	-16.63528	-9.870568	-2.857880	4.470917	10.63531	13.62487	11.43846	6.358088
							1860 -17.84025	-15.53763	-9.182709	-2.397125	4.712250	10.22275	13.68614	11.77954	6.205475
							1861 -17.97807	-16.33257	-10.63020	-3.085432	4.212799	10.61182	13.39813	11.14954	6.616760
							1862 -18.87397	-16.78190	-10.18866	-3.174483	4.352448	10.69916	13.75281	11.83914	6.628876
ssp126	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1863 -19.56598	-15.55951	-10.52082	-2.718766	3.619084	10.48448	13.62735	11.39858	6.499717
							1864 -17.48941	-15.28300	-10.01870	-3.095660	4.919861	10.48889	13.74600	11.45187	6.297882
							1865 -17.17906	-15.15393	-9.672099	-2.562866	4.883449	10.59875	13.24486	11.84819	6.568730
							1866 -16.65952	-14.70947	-9.522654	-3.423737	4.178253	10.22183	13.16183	11.73877	6.372120
ssp245	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1867 -17.62296	-16.40741	-10.10043	-3.536560	4.826387	10.84491	13.22842	12.13153	6.812287
							1868 -19.72374	-16.39387	-10.30081	-3.040180	4.414978	10.38449	13.80618	11.74146	6.507996
							1869 -17.69766	-16.20817	-9.821169	-3.452637	4.161880	10.67548	13.67783	11.63634	6.457122
							1870 -18.47916	-16.67923	-9.208954	-2.284119	4.202972	10.38153	13.80304	11.64847	6.744476
ssp370	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1871 -16.84839	-16.07578	-9.621268	-3.089563	4.897989	10.12813	13.62216	11.93622	6.296936
							1872 -18.89832	-15.54685	-9.827942	-3.214783	3.775421	10.31033	13.52249	11.84634	6.568394
							1873 -18.48820	-16.20956	-9.790742	-2.938888	4.504000	10.47440	13.68319	11.68904	6.443451
							1874 -18.87811	-17.35126	-10.54956	-3.246246	4.193714	10.21683	13.78659	11.54114	6.156836
ssp585	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1875 -17.33252	-15.99746	-9.118195	-2.837555	4.567566	10.46927	13.74155	11.78356	6.867878
							1876 -18.13091	-16.43198	-10.23313	-3.214466	3.991089	10.58716	13.56781	11.63574	6.868835
							1877 -18.83152	-16.64563	-10.85815	-2.789398	4.385162	10.64807	13.39789	11.41913	6.328789
ssp126	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1878 -17.42567	-15.91843	-9.920009	-2.938995	4.886553	10.62953	13.66959	11.68558	6.175964
							1879 -17.58985	-15.98427	-9.731643	-3.543328	4.131992	11.86619	13.37431	11.96119	6.893741
							1880 -16.88788	-14.73645	-9.288382	-3.942119	10.56186	10.89188	13.91855	11.91855	6.299316
							1881 -17.73860	-16.82753	-10.69534	-3.208442	4.951543	10.45409	13.11761	12.23819	6.382996
ssp245	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1882 -18.36420	-16.46997	-9.884491	-3.487898	3.818730	10.17548	13.19187	11.19284	6.369680
							1883 -18.84623	-14.74886	-9.897949	-2.557424	3.708737	10.54482	13.50546	11.98868	6.566708
							1884 -17.96308	-15.28976	-9.885443	-3.526123	4.211378	9.898167	13.87519	10.89532	6.765908
							1885 -19.58000	-16.48885	-10.93889	-3.646830	3.584980	9.954681	13.30536	11.65980	6.313124
							1886 -18.17055	-15.70612	-9.621796	-2.750958	4.252145	10.87856	13.11878	11.81845	6.638646
ssp370	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	1887 -17.47955	-15.27936	-9.548248	-3.281311	3.787281	10.43967	13.18661	11.80493	6.459980
							1888 -19.25818	-16.43112	-9.765980	-2.647400	4.253558	10.97955	13.54169	11.68854	6.126148

Рисунок 1. а – Таблица выбора данных *KNMI Climate Explorer*, б – формат данных для копирования
 Figure 1. a – *KNMI Climate Explorer* data selection table, b – data format for copying

- ГИС-портал Центра регистра и кадастра – информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. На данный момент времени регистрация на сайте недоступна, но есть возможность получить гидрограф-информер с месячным разрешением.

- «Расписание погоды» (*rp5.ru*) – сайт, предоставляющий прогноз погоды, а также позволяющий скачивать архив метеорологических срочных данных [3].

- ГИС ЦП Вода – новая государственная информационная система Федерального агентства водных ресурсов, к которой был осуществлен переход с АИС ГМВО в сентябре 2025 года. Функционал сайта для внешних пользователей не широк, полученные в формате *.csv* данные требуют времени на обработку. На рисунке 2 представлены фрагменты таблиц скачанных данных (а) и прошедших минимальную обработку (б). В свою очередь, АИС ГМВО представлял собой программный продукт, позволяющий получать материалы наблюдений за гидрологическими и прочими характеристиками водных объектов на станциях и постах [4].

- *Allrivers.ru* – сервис ежедневного мониторинга уровня воды в водных объектах России. На сайте можно найти графики уровня воды, статистику по годам и сопутствующие данные. На данный момент обновления по большому ряду гидропостов России прекратились в связи с отсутствием данных на источниках в открытом доступе.

а)

б)

№	A	B	C	D	E	F	G	H	№	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Код поста	Год	Река-пост	Месяц	Число	Значение	Условные обозначения		1	Код поста	Год	Река-пост	Месяц	Число	Значение	Условные обозначения	
2	8145	2016	Куда - р.К	2	22	нб			2	8145	2016	Куда - р.К	2	22	нб		
3	8145	2016	Куда - р.К	2	26	нб			3	8145	2016	Куда - р.К	2	26	нб		
4	8145	2016	Куда - р.К	2	27	нб			4	8145	2016	Куда - р.К	2	27	нб		
5	8147	2016	Мурин - р	2	12	нб			5	8145	2016	Куда - р.К	1	25	нб		
6	8145	2016	Куда - р.К	1	25	нб			6	8145	2016	Куда - р.К	3	1	нб		
7	8145	2016	Куда - р.К	3	1	нб			7	8145	2016	Куда - р.К	1	9	нб		
8	8145	2016	Куда - р.К	1	9	нб			8	8145	2016	Куда - р.К	2	24	нб		
9	8145	2016	Куда - р.К	2	24	нб			9	8145	2016	Куда - р.К	2	24	нб		
10	8147	2016	Мурин - р	1	4	нб			10	8145	2016	Куда - р.К	2	16	нб		
11	8147	2016	Мурин - р	1	5	нб			11	8145	2016	Куда - р.К	2	13	нб		
12	8147	2016	Мурин - р	12	31	нб			12	8145	2016	Куда - р.К	1	26	нб		
13	8147	2016	Мурин - р	12	30	нб			13	8145	2016	Куда - р.К	1	28	нб		
14	8147	2016	Мурин - р	1	2	нб			14	8145	2016	Куда - р.К	1	29	нб		
15	8145	2016	Куда - р.К	2	24	нб			15	8145	2016	Куда - р.К	2	3	нб		
16	8147	2016	Мурин - р	12	18	нб			16	8145	2016	Куда - р.К	1	30	нб		
17	8147	2016	Мурин - р	1	1	нб			17	8145	2016	Куда - р.К	1	24	нб		

Рисунок 2. а – Исходный массив данных, б – отбор данных по одному посту
Figure 2. a – Initial data array, b – data selection for one post

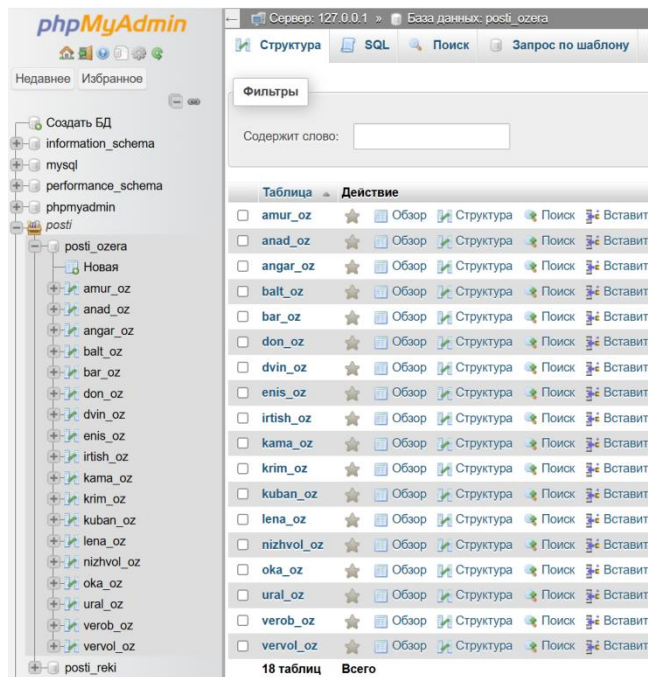
Резюмируя, можно сделать вывод, что имеются определенные проблемы, связанные как с разрозненностью данных, так и в целом с отсутствием и прекращением обновления той или иной информации.

2. База гидрологических данных

Наиболее проблемным моментом в вопросе доступности гидрометеорологических данных являются именно данные по гидрологии. Была поставлена задача собрать всю информацию воедино.

Существует несколько программ для создания баз данных, в том числе *Microsoft Access*, доступный всем пользователям персональных компьютеров. Однако было принято решение использовать веб-приложение *phpMyAdmin*, представляющее собой веб-интерфейс для администрирования систем управления базами данных (СУБД) *MySQL* и позволяющее интегрировать БД на веб-сайты.

а)



б)

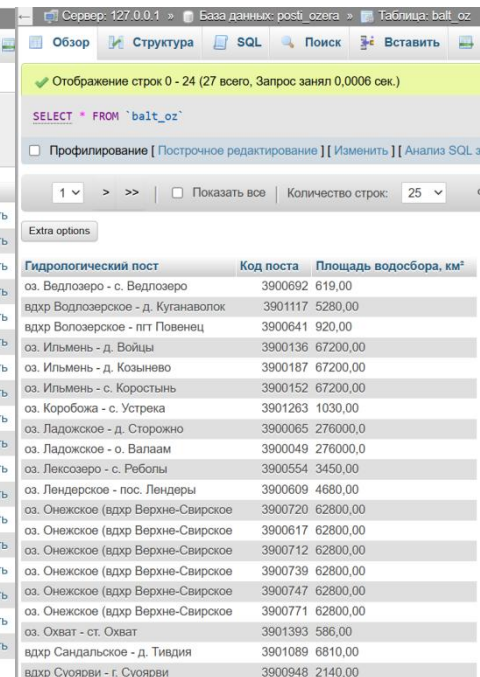


Рисунок 3. Представление БД *phpMyAdmin*, а – общий вид таблиц, содержащих данные по озерным гидрологическим постам, б – содержание таблицы с озерными постами бассейна Балтийского моря
Figure 3. Presentation of the *phpMyAdmin* database, a – general view of tables containing data on lake hydrological posts, b – contents of the table with lake posts of the Baltic Sea basin

За основу была взята база данных АИС ГМВО. На данном этапе исследования осуществлен перенос таблиц с информацией о речных и озерных гидрологических постах (рис. 3).

3. Автоматизированный сбор ГМ-данных

Для формирования запросов для автоматизированного сбора ГМ-данных были выбраны сайты *rp5.ru* и *gis.vodinfo.ru* как источники метеорологической и гидрологической информации соответственно: «Расписание погоды» как наиболее популярный, не требующий регистрации и позволяющий скачивать информацию архивом в форматах *.csv* и *.xls*, а ГИС-портал Центра регистра и кадастра предлагает использовать код для получения гидрографа-информера.

Код для информера, предлагаемый сайтом *gis.vodinfo.ru*, написан на *HTML*. Для возможности пользователем самостоятельно вводить код интересующего поста исходный скрипт был переписан в приложении *Matlab* и предполагает: построение полного динамического *URL*-адреса изображения с автоматической подстановкой кода интересующего гидрологического поста; настройку размера рисунка, поскольку *HTML*-код имеет выдает изображение с размерами 400×300 , а при отображении изображения на рисунке *MATLAB* с помощью команды *imshow* оно обычно отображается в исходном разрешении; загрузку изображения во временный файл и размещение файла во временном каталоге, подходящем для конкретной системы; считывание и отображения изображения на новом рисунке; регулирование положения и размера рисунка для лучшего просмотра. Результатом компиляции и запуска кода является гидрограф, изображенный на рисунке 4.

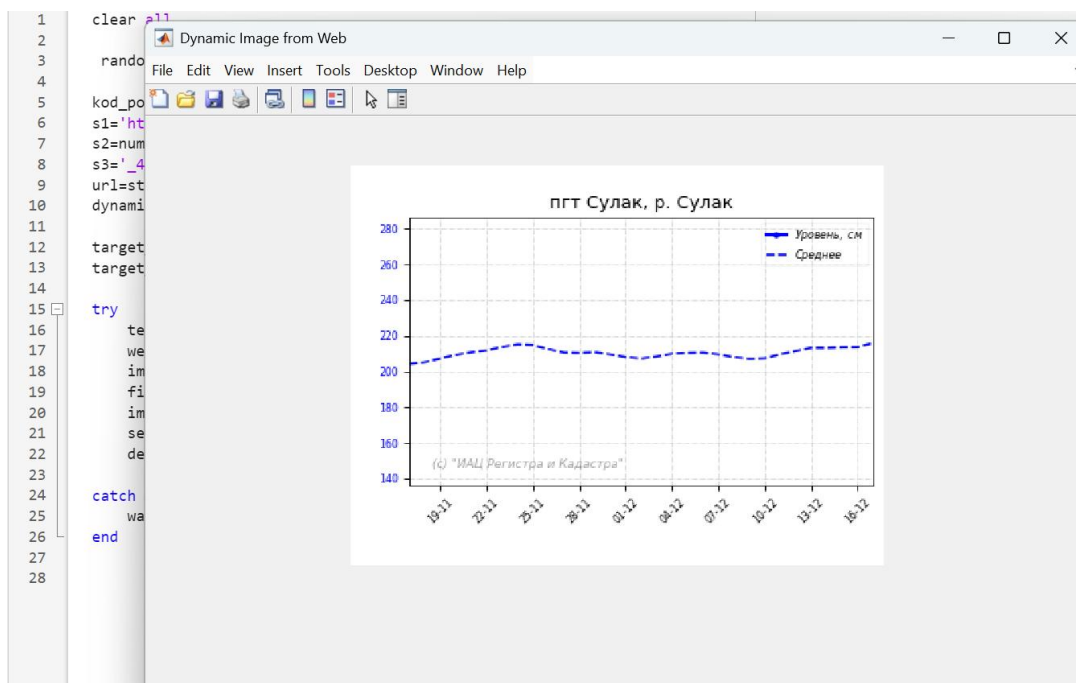


Рисунок 4. Результат работы *Matlab* кода по сбору гидрологической информации с сайта *gis.vodinfo.ru*

Figure 4. The result of the *Matlab* code for collecting hydrological information from the website *gis.vodinfo.ru*

Сбор метеорологической информации был сопряжен рядом трудностей. Первая попытка, как и в случае с гидрологическими данными, заключалась в формировании *URL*-адреса для скачивания напрямую. Для этого была проанализирована структура адреса (см. рис. 5). Предполагалось его разбиение: элемент 1 остается неизменным, кроме динамического поддомена; в элементе 2 пользователем задаются пункты два и три, первый пункт подбирается в соответствии с кодом поста, пункты четыре и пять – неизменны. Формирование *URL* сопровождалось перебором доступных

поддоменов с регулярной отправкой запроса на скачивание архива данных, однако на каждый запрос сайт выдавал ошибку, информирующую о том, что сервер запрос понял, но не выполнил в связи с запретом доступа к запрошенному ресурсу. Результат перебора поддоменов и сформированных URL-адресов с помощью *Matlab* представлен на рисунке 6.

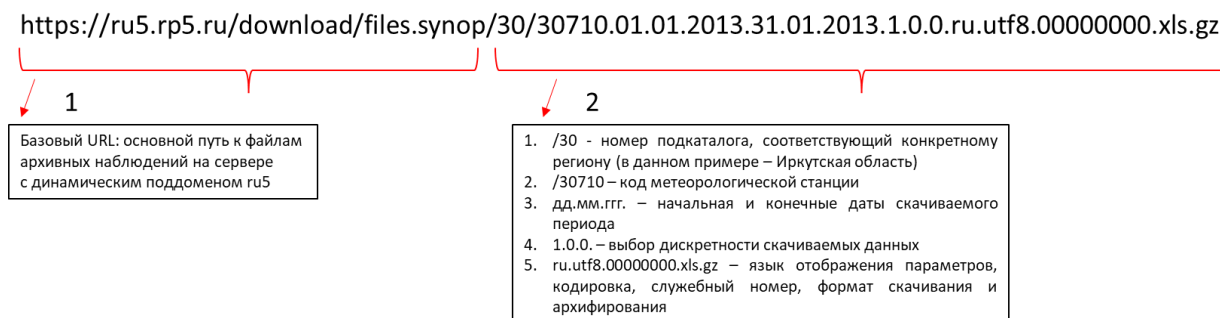


Рисунок 5. Анализ структуры URL-адреса

Figure 5. URL structure analysis

```
>> downloadRP5Data
Пробуем https://ru1.rp5.ru/download/files.synop/30710/01.01.2013.31.01.2013.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz...
Ошибка с ru1: The server returned the status 403 with message "Forbidden" in response to the request to URL https://ru1.rp5
Пробуем https://ru2.rp5.ru/download/files.synop/30710/01.01.2013.31.01.2013.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz...
Ошибка с ru2: The server returned the status 403 with message "Forbidden" in response to the request to URL https://ru2.rp5
Пробуем https://ru3.rp5.ru/download/files.synop/30710/01.01.2013.31.01.2013.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz...
Ошибка с ru3: The server returned the status 403 with message "Forbidden" in response to the request to URL https://ru3.rp5
Пробуем https://ru4.rp5.ru/download/files.synop/30710/01.01.2013.31.01.2013.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz...
Ошибка с ru4: The server returned the status 403 with message "Forbidden" in response to the request to URL https://ru4.rp5
Пробуем https://ru5.rp5.ru/download/files.synop/30710/01.01.2013.31.01.2013.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz...
Ошибка с ru5: The server returned the status 403 with message "Forbidden" in response to the request to URL https://ru5.rp5
Пробуем https://ru6.rp5.ru/download/files.synop/30710/01.01.2013.31.01.2013.1.0.0.ru.utf8.00000000.xls.gz...
Ошибка с ru6: The connection to URL 'https://ru6.rp5.ru/download/files.synop/30710/01.01.2013.31.01.2013.1.0.0.ru.utf8.0000
Error using downloadRP5Data (line 40)
Не удалось скачать данные ни с одного поддомена
```

Рисунок 6. Результат формирования запросов с подбором поддоменов

Figure 6. Result of generating queries with subdomain selection

Таким образом, был сделан вывод о сложной системе защиты от прямого скачивания с сайта *rp5.ru* не только с помощью динамических поддоменов, но и с помощью, вероятно меняющихся *cookies*-файлов, перебор которых также не дал положительного результата.

Второй подход находится на стадии реализации и заключается в формировании запросов, имитирующих поведение пользователя на сайте.

4. Временная альтернатива архивным метео данным и создание сайта

Выбор платформы для создания сайта сводился к поиску возможности интеграции собственного кода. По этой причине было рассмотрено два варианта: первый — визуальный интуитивный конструктор *Tilda*, позволяющий в одном из режимов создать визуально комфортный сайт, а при использовании модуля *Zero Block* – вставлять пользовательский *HTML/CSS* код [5]; второй — система управления контентом *WordPress*, представляющая собой полноценный фреймворк для сайтов любой сложности и позволяющая, используя дочерние темы и пользовательские плагины, интегрировать любой код [6].

В качестве теста сайты были созданы с помощью обоих ресурсов. Базовое наполнение их не содержит сложных скриптов и пока что не позволяет скачивать данные, но для некоторых действий прописаны коды, перенаправляющие пользователя на уже существующие сайты с гидрологической информацией, а также выдающие фактическую погоду как по координатам населенного пункта (в том числе, учитывая геолокацию устройства пользователя), так и по названию.

Структура сайта – древовидная, что позволяет делать вложенность любой глубины и с любой страницы осуществлять переходы в другие разделы, в том числе на главную страницу сайта. Схема структуры сайта представлена на рисунке 7.

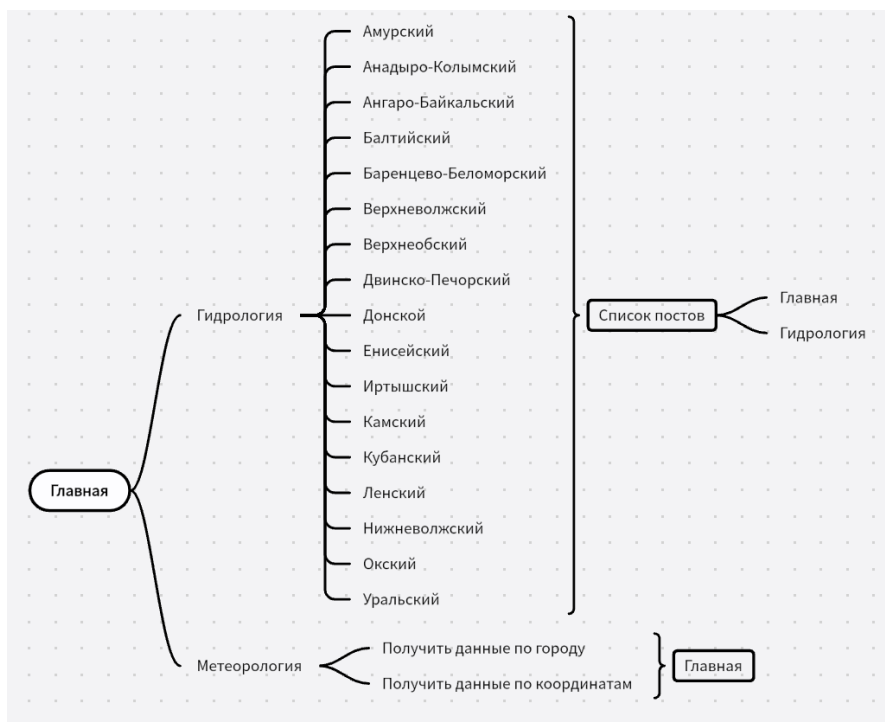


Рисунок 7. Схема структуры сайта
Figure 7. Site structure diagram

На рисунке 8 можно увидеть интерфейс сайта и процесс перехода по разделу выбора гидрологических данных по бассейновым округам. После выбора интересующего бассейнового округа и нажатия на кнопку «Список постов» осуществляется переход на соответствующую страницу сайта *allrivers.ru*, где представлен список гидрологических постов.

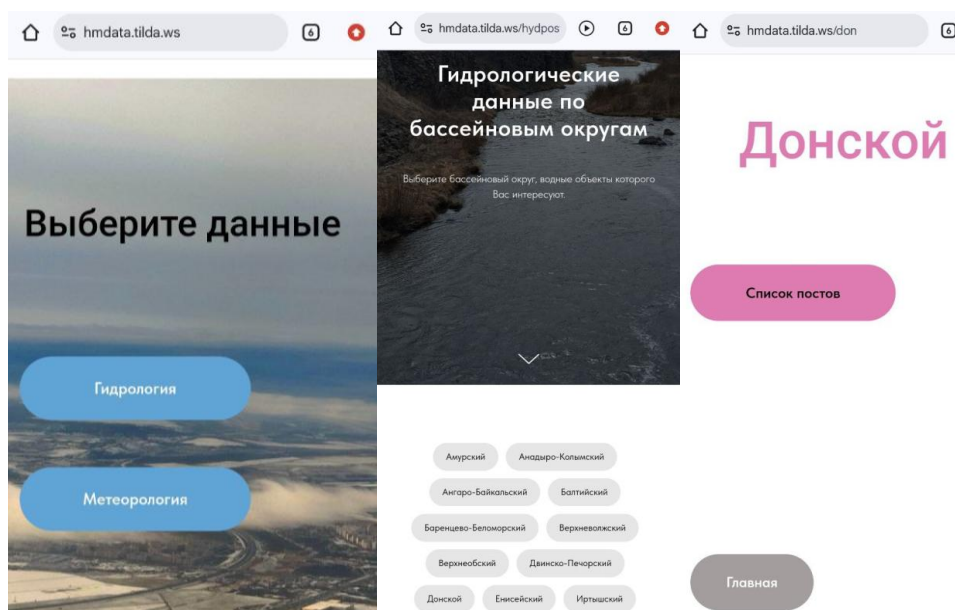


Рисунок 8. Переход к выбору гидрологических постов на авторском сайте *hmdata.tilda.ws*
Figure 8. Transition to the selection of hydrological posts on the author's website *hmdata.tilda.ws*

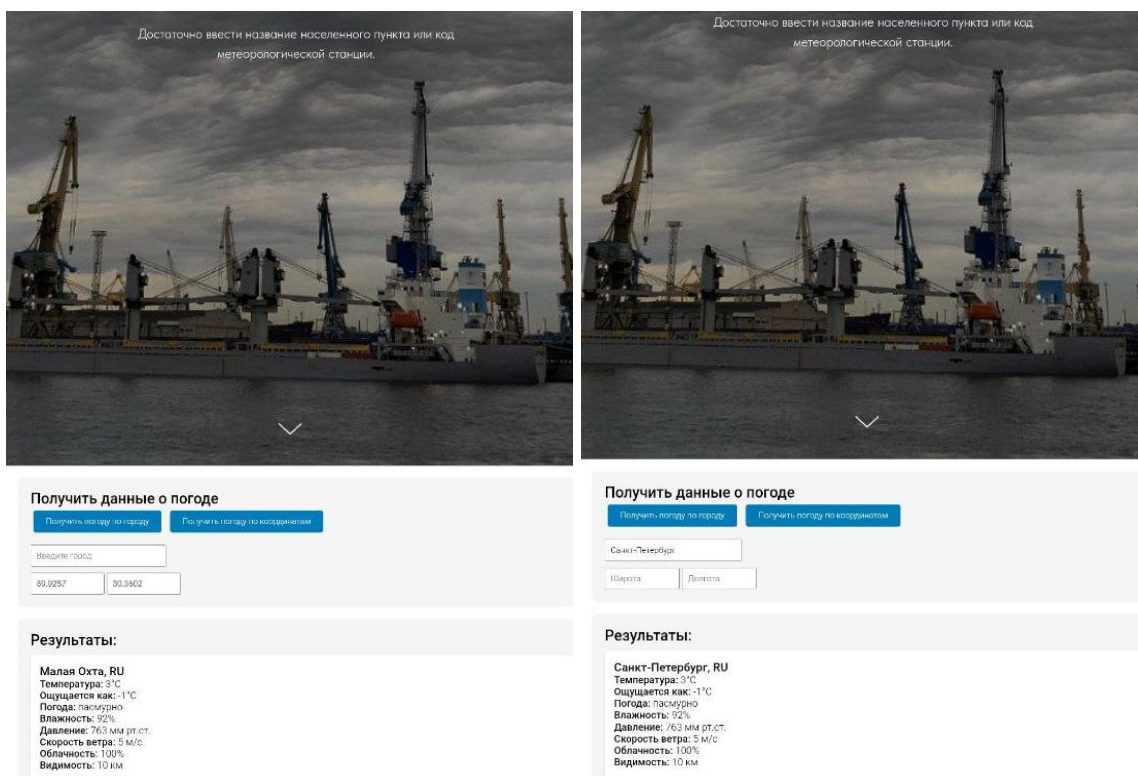


Рисунок 9. Переход к получению метеорологических данных на сайте *hmdata.tilda.ws*
Figure 9. Transition to receiving meteorological data on the website *hmdata.tilda.ws*

На рисунке 9 изображен процесс получения фактической метеорологической информации как по введенным или автоматически определенным координатам, так и по названию населенного пункта. Доступ к фактической погоде получен через погодный API, для чего на сайте OpenWeatherMap был заведен стандартный API ключ.

Существующие погодные API предоставляют доступ к историческим данным в том числе, но для большинства гидрометеорологических задач они могут быть менее пригодны по сравнению с архивными данными напрямую с метеостанций, как, например, на *gr5.ru*. Главный недостаток многих API — предоставление не прямых измерений, а смоделированных или интерполированных данных [7], в то время как сайты аналогичные *gr5.ru* предоставляют доступ к первичным данным метеостанций, зашифрованным в форматах SYNOP и METAR.

Ниже, в таблице 1, приведено сравнение некоторых популярных погодных API по таким характеристикам как тип исторических данных, основные характеристики и разрешение.

Аналогичным вышеописанному способом происходит наполнение сайта на WordPress (рис. 10).

Таблица 1. Сравнение погодных API
Table 1. Comparison of weather APIs

Тип API	Исторические данные	Разрешение
<i>Yandex.Weather</i>	Наблюдения и реанализ	Высокое (почасовая детализация)
<i>Open-Meteo</i>	Архив прогнозов (<i>Historical Forecast API</i>) Реанализ (<i>Historical Weather API</i>)	Высокое (1-9 км)
<i>meteoblue</i>	Смоделированные данные (<i>history+</i> , API)	~30 км для климатических данных

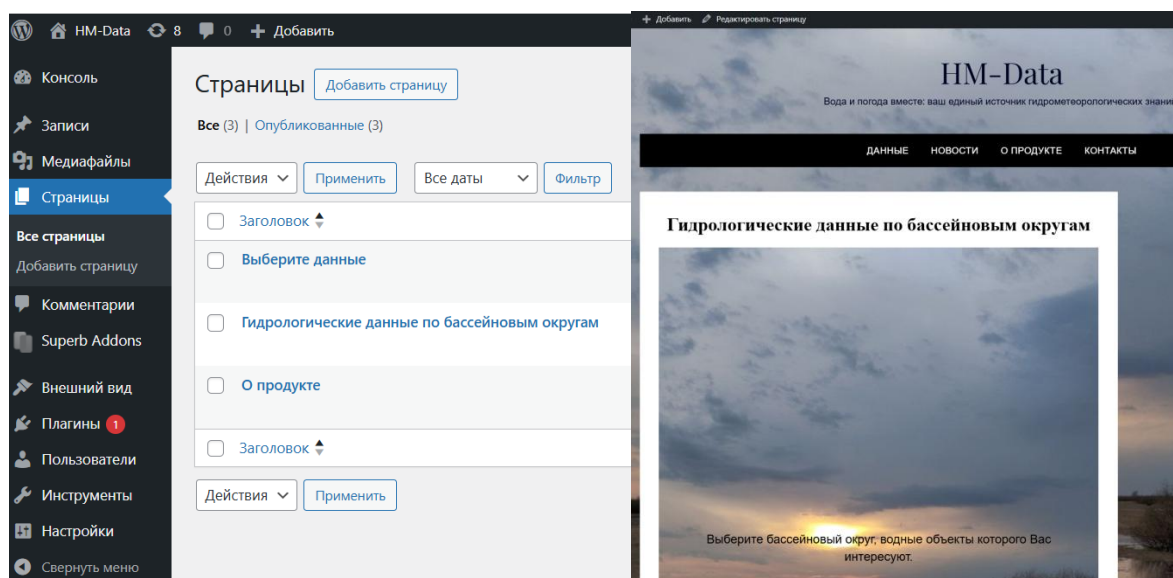


Рисунок 10. Наполнение сайта на *WordPress*
Figure 10. Filling a WordPress site

Вывод. В ходе проведенного исследования были проанализированы существующие открытые источники гидрометеорологических данных, выявлены их ключевые недостатки, такие как разрозненность, прекращение обновлений, сложность доступа к прямым измерениям и необходимость дополнительной обработки. Предложены первые шаги по созданию единой платформы для предоставления обработанных гидрометеорологических данных: создана и наполняется база гидрологических данных в *phpMyAdmin*, опробованы методы автоматизированного сбора данных с использованием *Matlab*, протестирована интеграция пользовательского кода в сайты на *Tilda* и *WordPress*. Несмотря на трудности с парсингом данных с некоторых ресурсов (например, с *rp5.ru*), использование погодных *API* в целом позволяет получать актуальные данные. Дальнейшая работа будет направлена на совершенствование алгоритмов сбора, расширение базы данных и разработку полнофункционального веб-интерфейса для удобного доступа пользователей к архивным и текущим гидрометеорологическим данным с целью обеспечения уже обработанной исходной информацией исследований гидрометеорологов [8].

Список использованных источников

1. R-ArcticNet dataset information page // CSDMS: Community Surface Dynamics Modeling System. Explore Earth's surface with community software URL: <https://csdms.colorado.edu/wiki/Alldata:R-ArcticNet> (дата обращения: 15.12.2025).
2. The Climate Explorer // The Climate Explorer URL: <https://crt-climate-explorer.nemac.org/faq/> (дата обращения: 15.12.2025).
3. О сайте // *rp5.ru* URL: <https://rp5.in/docs/about/ru> (дата обращения: 16.12.2025).
4. Школьный Д.И., Завадский А.С. Мониторинг берегов рек в рамках государственного мониторинга водных объектов: современное состояние и перспективы развития // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - 2021. - №2. - С. 22-39.
5. Вставка HTML кода // *Tilda* help center URL: <https://help-ru.tilda.cc/html> (дата обращения: 17.12.2025).
6. Implementing namespaces and coding standards in WordPress plugin development // WordPress Developer Blog URL: <https://developer.wordpress.org/news/2025/09/implementing-namespaces-and-coding-standards-in-wordpress-plugin-development/> (дата обращения: 17.12.2025).

7. Introducing the Historical Forecast API // Open-Meteo URL: <https://openmeteo.substack.com/p/introducing-the-historical-forecast> (дата обращения: 17.12.2025).
8. Батмазова А.А., Гайдукова Е.В. Построение регрессионных моделей для оценки уровня озера северо-западной части России // Гидрометеорология и экология. - 2025. - № 78. - С. 151-165. DOI: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165.

Reference

1. R-ArcticNet dataset information page // CSDMS: Community Surface Dynamics Modeling System. Explore Earth's surface with community software URL: <https://csdms.colorado.edu/wiki/Alldata:R-ArcticNet> (accessed: 15.12.2025).
2. The Climate Explorer // The Climate Explorer URL: <https://crt-climate-explorer.nemac.org/faq/> (accessed: 15.12.2025).
3. About the site // rp5.ru URL: <https://rp5.in/docs/about/ru> (accessed: 16.12.2025).
4. Shkolny D.I., Zavadskiy A.S. Riverbank monitoring as part of state water monitoring: current status and development prospects // Water management in Russia: problems, technologies, management. 2021. No. 2. P. 22-39.
5. Inserting HTML code // Tilda help center URL: <https://help-ru.tilda.cc/html> (accessed: 17.12.2025).
6. Implementing namespaces and coding standards in WordPress plugin development // WordPress Developer Blog URL: <https://developer.wordpress.org/news/2025/09/implementing-namespaces-and-coding-standards-in-wordpress-plugin-development/> (accessed: 17.12.2025).
7. Introducing the Historical Forecast API // Open-Meteo URL: <https://openmeteo.substack.com/p/introducing-the-historical-forecast> (accessed: 17.12.2025).
8. Batmazova A.A., Gaidukova E.V. Construction of regression models for assessing the level regime of lakes in the northwestern part of Russia // Hydrometeorology and Ecology. 2025. No. 78. P. 151-165. DOI: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165.

AUTOMATED COLLECTION AND INTEGRATION OF HYDROMETEOROLOGICAL DATA: METHODS AND FIRST RESULTS

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

Duganna Kavisha B.

1st year Master degree, Institute of Hydrology and Oceanology
Russian State Hydrometeorological University
St. Petersburg
E-mail: bandarakaveesha1998@gmail.com

Plotnikova Ekaterina M.

1st year Master degree, Institute of Hydrology and Oceanology
Russian State Hydrometeorological University
St. Petersburg
E-mail: sam.tdk@bk.ru

Yakovlev Kirill A.

1st year Master degree, Institute of Hydrology and Oceanology
Russian State Hydrometeorological University
St. Petersburg
E-mail: sulfatokulov@gmail.com

© Батмазова А.А., Гайдукова Е.В., Дуганна К.Б., Плотникова Е.М., Яковлев К.А., 2026

УДК 65.01:004.9

Лаврентьева А.А., Назаревич С.А.

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ РОБАСТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЛЯ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАНАЛОВ ЛОГИСТИЧЕСКОГО
СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОЕКТА**

Лаврентьева Анастасия Андреевна

бакалавр 4 курса ФПТИ
институт фундаментальной подготовки и технологических инноваций (Институт ФПТИ)
Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения
E-mail: anastasia.lavren@yandex.ru

Назаревич Станислав Анатольевич

Доцент, кандидат технических наук
Заместитель директора института фундаментальной подготовки и технологических инноваций
Санкт-Петербургский Государственный Университет Аэрокосмического Приборостроения
E-mail: nazarevich@guap.ru

Аннотация: В статье представлена интегрированная методология проектирования устойчивых логистических каналов на основе синтеза системного анализа и принципов робастного проектирования Г. Тагути. Продемонстрирован алгоритм перехода от фрагментарной оптимизации отдельных параметров к созданию целостных логистических систем, изначально устойчивых к возмущениям различной природы. Предложена классификация факторов «шума» в логистических каналах и формализованы критерии оценки робастности.

Ключевые слова: системный анализ, робастное проектирование, метод Тагути, логистический канал, устойчивость, цифровой двойник.

SYSTEMS ANALYSIS OF ROBUST DESIGN PROCESSES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROJECT LOGISTICS SUPPORT CHANNELS

Abstract. *The article presents an integrated methodology for designing sustainable logistics channels based on the synthesis of system analysis and principles of robust design by G. Taguchi. An algorithm for the transition from fragmentary optimization of individual parameters to the creation of integrated logistics systems that are initially resistant to disturbances of various nature is demonstrated. A classification of "noise" factors in logistics channels is proposed and criteria for assessing robustness are formalized.*

Keywords: *system analysis, robust design, Taguchi method, logistics channel, sustainability, digital twin.*

Введение. Не смотря на высокую динамику и неопределенность, как условия, в которых сейчас функционирует современная логистическая система, где традиционные подходы к проектированию каналов снабжения и дистрибуции часто оказываются недостаточно эффективными. Возможные проблемы носят смешанный характер, сочетая количественные и качественные факторы, что требует методологий, способных не только решать текущие задачи, но и закладывать устойчивость (робастность) системы к будущим возмущениям.

Основная проблема заключается в противоречии между требованиями к эффективности логистических операций (минимизация затрат и сокращение времени) и необходимостью обеспечения устойчивости к внешним и внутренним возмущениям. Традиционные методы оптимизации, ориентированные на достижение экстремума целевой функции в статических условиях, не учитывают вариабельность параметров и их чувствительность к «шумам» – неконтролируемым факторам различной природы.

Целью исследования является изучение интегрированной методологии проектирования устойчивых логистических каналов на основе синтеза системного анализа и принципов робастного проектирования.

Научная новизна исследования заключается в:

- синтезе методологии системного анализа и инженерного подхода Тагути для задач проектирования логистических систем,
- разработке многоуровневой классификации факторов «шума» в логистике,
- создании комплексного критерия оценки устойчивости логистических каналов.

1. Теоретические основы робастного проектирования в логистике. Философия робастного проектирования Г. Тагути. Метод робастного проектирования, разработанный Генити Тагути, демонстрирует принципиально иной подход к обеспечению качества. Что отличает его от традиционной парадигмы, которая ориентирована на соблюдение установленных допусков, при том, что философия Генити Тагути фокусируется на минимализации вариабельности и отклонений от идеального (номинального) значения. Любое отклонение, даже в пределах формально установленных границ, ведет к потерям – так называемым «потерям качества».

Функция потерь качества формализуется как квадратичная зависимость:

$$L(y) = k \times (y - T)^2 \quad (1)$$

где: $L(y)$ – потери качества при значении параметра y , k – коэффициент стоимости, определяющий чувствительность системы к отклонениям, T – целевое (номинальное) значение параметра, y – фактическое значение параметра.

Сам Тагути объяснял квадратичную зависимость следующим образом: «Если постепенные отклонения от номинала дают непропорциональное увеличение потерь, то, скорее всего, это — квадратичные увеличения». Однако это положение в значительной степени является гипотезой.

Центральным инструментом анализа и оптимизации в методе Тагути является отношение «сигнал/шум», представляющее собой количественную меру робастности системы:

$$\eta = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

где η – отношение сигнал/шум, y_i – значения отклика в i -м эксперименте, n – количество экспериментов.

1.2. Классификация факторов в логистических системах. Для применения метода Тагути в логистике необходима адаптация классификации факторов. Предложена следующая классификация, рисунок 1.

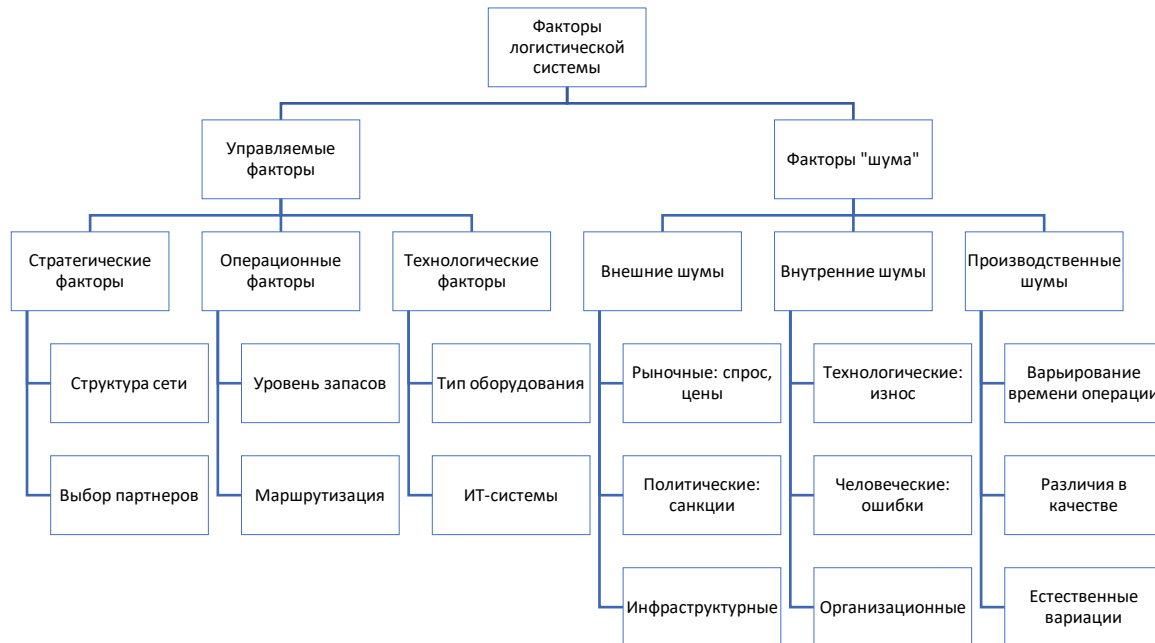


Рисунок 1. Классификация факторов в логистических системах для робастного проектирования
Figure 1. Classification of factors in logistics systems for robust design

Для успешной реализации методологии робастного проектирования необходимо не только разделить факторы на управляемые и «шумовые», но и детализировать их по природе, источникам возникновения и степени влияния на логистические процессы. Это позволяет более точно настраивать эксперименты, выбирать адекватные планы исследования и интерпретировать результаты.

Классификация управляемых факторов:

Управляемые факторы, представляют собой переменные, на которые можно непосредственно влиять в процессе проектирования или эксплуатации системы. Их можно разделить на следующие подгруппы:

- стратегические факторы, которые определяют общую архитектуру логистической системы. К ним относятся: выбор количества и географии поставщиков, стратегия взаимодействия с перевозчиками, тип используемых каналов распределения.

- операционные факторы, которые определяют параметры текущего функционирования. К ним относятся: уровень страхового запаса по различным номенклатурным позициям, критерии запуска заказа, выбор конкретного маршрута или вида транспорта для конкретной поставки, установленные нормативы времени на выполнение операций.

– ресурсные факторы, которые связаны с выделением и использованием ресурсов. К ним относятся: объем выделенных финансовых средств на логистику, количество и квалификация персонала, тип и производительность складского и погрузочно-разгрузочного оборудования.

– информационно-технологические факторы, такие факторы определяют способы обработки информации. Это выбор платформы для управления цепью поставок, степень автоматизации процессов отслеживания, используемые стандарты обмена данными.

Классификация факторов «шума»:

Факторы «шума», представляют переменные, которые сложно, дорого или невозможно контролировать в реальных условиях, но которые оказывают существенное влияние на выходные параметры системы. Их классификация позволяет системно оценивать риски:

– внешние макроэкономические и политические факторы: изменения валютных курсов и таможенных пошлин, введение или отмена экономических санкций и эмбарго, политическая нестабильность в стране-поставщике или транзитной стране, глобальные кризисы.

– внешние рыночные и инфраструктурные факторы: колебания рыночного спроса на конечную продукцию, действия конкурентов, изменения тарифов на транспортные услуги.

– внутренние производственные и операционные факторы: непредвиденные поломки ключевого производственного или складского оборудования, отклонения от планового графика производства, ошибки в прогнозировании потребности.

– межоперационные и координационные факторы: несогласованность действий между различными подразделениями предприятия, сбои в коммуникации и передаче данных между партнерами по цепочке поставок, расхождения в документации, приводящие к таможенным или административным задержкам.

– факторы форс-мажора: стихийные бедствия, крупные аварии на транспорте.

Соответственно такая детализированная классификация служит основой для системного анализа уязвимостей логистического канала и целенаправленного подбора управляемых факторов для экспериментальной оптимизации, направленной на повышение устойчивости к наиболее значимым «шумам».

1.3. Трехэтапный процесс проектирования робастных логистических систем. Реализация метода Тагути в логистике осуществляется через последовательность трех ключевых этапов, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Трехэтапный процесс проектирования робастных логистических систем

Table 1 – Three-stage design process for robust logistics systems

Этап	Цель	Методы	Результат
Системное проектирование	Определение архитектуры логистической системы	Системный анализ, SWOT-анализ, сценарное планирование	Концептуальная модель системы, требования к робастности
Параметрическое проектирование	Поиск оптимальных значений управляемых параметров	Планирование экспериментов, ортогональные массивы, имитационное моделирование	Оптимальные уровни факторов
Проектирование допусков	Определение экономически обоснованных допусков	Анализ чувствительности, стоимостной анализ, анализ «цена-качество»	Технические требования, спецификации процессов

2. Методология системного анализа для проектирования робастных логистических каналов. Концептуальная основа интеграции подходов. Для проектирования логистических каналов,

способных сохранять целевую функциональность в условиях неопределенности, необходима структурированная методология, объединяющая сильные стороны системного анализа и робастного проектирования, что продемонстрировано на рисунке 2.



Рисунок 2. Концептуальная схема интеграции системного анализа и робастного проектирования
Figure 2. Conceptual diagram of the integration of system analysis and robust design

2.2. Алгоритм проектирования робастных логистических каналов

Разработанный алгоритм включает следующие этапы:

1. Формулировка проблемы и целей:
 - идентификация несоответствий между желаемым и фактическим состоянием,
 - определение требований к робастности,
 - формирование критериев успеха.
2. Декомпозиция логистической системы:
 - выделение элементов-участников (поставщики, перевозчики, склады),
 - идентификация функциональных элементов (процессы),
 - определение ресурсных элементов (активы, компетенции).
3. Идентификация и классификация факторов:
 - разделение факторов на управляемые и «шум»,
 - оценка значимости факторов,
 - определение диапазонов варьирования.
4. Моделирование системы и экспериментирование:
 - разработка имитационной модели (цифрового двойника),
 - планирование экспериментов с использованием ортогональных массивов,
 - проведение виртуальных экспериментов.
5. Анализ результатов и оптимизация:
 - расчет отношения сигнал/шум для каждой конфигурации,
 - определение оптимальных уровней управляемых факторов,
 - анализ чувствительности и устойчивости.
6. Верификация и внедрение:
 - тестирование оптимальной конфигурации в реальных условиях,

- мониторинг ключевых показателей,
- корректировка на основе обратной связи.

2.3. Инструментарий методологии

Для реализации методологии предложен комплекс взаимодополняющих инструментов:

Таблица 2 – Инструментарий интегрированной методологии
Table 2 – Tools of the integrated methodology

Категория	Инструменты	Назначение
Аналитические	PEST-анализ, SWOT-анализ, причинно-следственные диаграммы	Структурирование проблемы, идентификация факторов
Моделирования	Имитационное моделирование, системная динамика, агентное моделирование	Создание цифрового двойника, тестирование сценариев
Статистические	Планирование экспериментов, дисперсионный анализ, регрессионный анализ	Оптимизация параметров, оценка значимости факторов
Оценочные	Функция потерь качества, отношение сигнал/шум, анализ чувствительности	Количественная оценка робастности, выбор оптимального решения

3. Практическая апробация методологии

3.1. Описание кейса: цепь поставок авиастроительного предприятия

Для апробации методологии выбрана цепь поставок комплектующих для авиастроительного предприятия, производящего локаторы.

Проблема: высокие риски срыва сборки из-за сбоев в поставках критических компонентов (соединители).

Исходные данные:

1. Годовой объем поставок: 100 циклов.
2. Стоимость простоя линии сборки: 500 000 руб./сутки.
3. Среднее время доставки: 45 дней.
4. Дисперсия времени доставки: 96 дней².

3.2. Применение методологии

Этап 1: Идентификация факторов:

Управляемые факторы:

1. X_1 : Количество поставщиков (1 или 2)
2. X_2 : Уровень страхового запаса (10, 20, 30 дней)
3. X_3 : Тип логистического маршрута (прямой, через хаб, комбинированный)
4. X_4 : Наличие альтернативного перевозчика (да/нет)

Факторы «шума»:

1. Z_1 : Задержки таможенного оформления (5-20 дней)
2. Z_2 : Сбои в авиаперевозках (до 10 дней)
3. Z_3 : Политические ограничения (вероятность 0.2)

Этап 2: Планирование эксперимента:

Использован ортогональный массив для планирования экспериментов с учетом смешанных уровней факторов.

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента

Table 3 – Experimental Planning Matrix

№	X1	X2	X3	X4	η	L (т.р.)
1	1	10	Прямой	Нет	10.2	240
2	1	10	Хаб	Да	12.5	190
3	1	20	Прямой	Да	13.8	150
4	1	20	Хаб	Нет	12.1	200
5	2	10	Прямой	Да	14.5	120
6	2	10	Хаб	Нет	11.9	210
7	2	20	Прямой	Нет	13.2	170
8	2	20	Хаб	Да	15.8	90

η - данная величина является безразмерным логарифмическим показателем: чем выше её значение, тем выше робастность системы

Этап 3: Анализ результатов

Анализ влияния факторов представлен в таблице 4.

Таблица 4 – Среднее отношение сигнал/шум для различных уровней факторов

Table 4 – Average signal-to-noise ratio for different levels of factors

Фактор	Уровень 1	Уровень 2
X1 – Поставщики	12.4 – 1 поставщик	14.8 – 2 поставщика
X2 – Запас	12.1 – 10 дней	14.6 – 20 дней
X3 – Маршрут	13.2 – прямой маршрут	13.9 – маршрут через хаб
X4 – Перевозчик	12.8 – без альтернативны	14.3 – с альтернативой

Этап 4: Определение оптимальной конфигурации

Оптимальная конфигурация (эксперимент):

1. X1: 2 поставщика (разные страны).
2. X2: Страховой запас 20 дней.
3. X3: Маршрут через логистический хаб.
4. X4: Наличие контракта с альтернативным перевозчиком.

3.3. Экономический эффект

Расчет потерь качества:

$$L = k \times \sigma^2 \quad (3)$$

где $k = 2\,500$ руб./день² – коэффициент стоимости, определенный на основе анализа потерь от простоя.

Исходная конфигурация (базовая):

$$L_1 = 2\,500 \times 96 = 240\,000 \text{ руб./цикл}$$

Оптимизированная конфигурация:

$$L_2 = 2\,500 \times 36 = 90\,000 \text{ руб./цикл}$$

Годовая экономия:

$$\Delta L_{\text{год}} = (L_1 - L_2) \times N \quad (4)$$

$$\Delta L_{\text{год}} = (240\,000 - 90\,000) \times 100 = 15\,000\,000 \text{ руб.}$$

Дополнительные эффекты:

1. Снижение вариабельности времени доставки на 65%.
2. Повышение надежности поставок с 78% до 94%.
3. Сокращение риска срыва сборки на 40%

3.4. Итоги практической апробации. Проверка методики на реальном примере цепи поставок авиастроительного предприятия успешно подтвердила её практическую ценность и работоспособность. Реализация подхода позволила не просто теоретически обосновать важность отдельных факторов, но и количественно измерить их влияние на стабильность логистической системы, а также определить конкретную, оптимальную конфигурацию, обеспечивающую максимальную устойчивость к сбоям.

В ходе исследования был проведён статистический анализ, который наглядно продемонстрировал, что именно количество поставщиков и размер страхового запаса оказывают наиболее существенное и статистически значимое влияние на конечную робастность системы. На основе этих данных была определена и верифицирована наилучшая конфигурация логистического канала, включающая работу с двумя поставщиками для диверсификации рисков, поддержание страхового запаса в двадцать дней, использование маршрута через центральный хаб и наличие контракта с альтернативным перевозчиком.

Внедрение этой оптимальной настройки привело к измеримым и значительным улучшениям ключевых показателей. Колебания времени доставки, измеряемые дисперсией, сократились более чем на шестьдесят процентов, что напрямую свидетельствует о резком повышении предсказуемости и стабильности процесса. Надёжность поставок, выражаемая в проценте выполненных в срок заказов, возросла почти до девяноста четырёх процентов, а риск полного срыва критически важной сборки снизился почти в три раза. Эти операционные улучшения напрямую трансформировались в экономический результат. Годовая экономия, рассчитанная через функцию потерь качества, составила пятнадцать миллионов рублей, при этом все единовременные затраты на модификацию цепи поставок, такие как заключение новых контрактов и создание дополнительных запасов, окупились всего за шесть с половиной месяцев.

Таким образом, апробация не только доказала эффективность методологии в достижении поставленных целей по повышению устойчивости, но и выявила условия её успешного применения.

Методика требует для своей реализации определённых исходных данных, вычислительных мощностей для построения и запуска имитационных моделей, а также учёта отраслевой специфики. Однако эти требования не являются непреодолимым барьером. Стратегия поэтапного, пилотного внедрения с последующей калибровкой модели под конкретные условия предприятия позволяет успешно применять разработанный подход на практике, переводя логистику из источника операционных рисков в фактор надёжности и конкурентного преимущества.

Заключение. В представленной работе выполнено исследование, направленное на разработку и верификацию интегрированной методологии повышения устойчивости логистических каналов проектного сопровождения. В качестве концептуальной основы выступил синтез двух методологических подходов: системного анализа, обеспечивающего целостное представление о структуре и взаимосвязях логистической системы, и методологии робастного проектирования Г. Тагути, предоставляющей формальный аппарат для минимизации вариабельности выходных характеристик под воздействием неконтролируемых возмущающих факторов («шума»).

В ходе исследования были решены следующие ключевые задачи:

Во-первых, осуществлена адаптация философии и инструментария робастного проектирования для задач логистики, что включало формализацию функции потерь качества и критерия «сигнал/шум» применительно к таким показателям, как время и надежность поставок.

Во-вторых, разработана структурированная классификация факторов, влияющих на логистический канал, с их разделением на управляемые параметры (количество поставщиков, уровень запасов, стратегия маршрутизации) и факторы «шума» различной природы (внешние, внутренние, межоперационные).

В-третьих, предложен алгоритмизированный процесс проектирования, объединяющий этапы системного анализа (декомпозиция, моделирование, сценарное планирование) и этапы робастной оптимизации (параметрическое проектирование, анализ чувствительности, верификация).

Практическая апробация предложенной методологии была осуществлена на примере цепи поставок критических компонентов для авиастроительного предприятия. С использованием ортогональных планов эксперимента и имитационного моделирования была идентифицирована оптимальная конфигурация логистического канала, демонстрирующая максимальное значение отношения «сигнал/шум» ($\eta = 15.8$ дБ).

Данная конфигурация, включающая дублирование поставщиков, поддержание страхового запаса в 20 дней, маршрутизацию через хаб и наличие альтернативного перевозчика, показала существенное улучшение операционных показателей: снижение дисперсии времени поставки на 62.5% и повышение надежности с 78% до 93.7%. Количественная оценка экономической эффективности, выполненная через расчет функции потерь качества, подтвердила целесообразность внедрения, продемонстрировав годовой экономический эффект в 15 млн рублей при сроке окупаемости менее 7 месяцев.

Таким образом, результаты работы подтверждают основную гипотезу исследования о том, что интеграция системного анализа и принципов робастного проектирования позволяет перейти от реактивного управления рисками в логистике к проактивному созданию изначально устойчивых систем. Разработанная методология предоставляет структурированный инструментарий для проектирования логистических каналов, способных сохранять целевую функциональность и экономическую эффективность в условиях высокой динамики и неопределенности внешней и внутренней среды.

Полученные выводы обладают как теоретической ценностью, внося вклад в развитие методологии управления цепями поставок, так и практической значимостью, предлагая конкретный алгоритм действий для предприятий реального сектора.

Список использованных источников

1. Теплов А. В. Системный подход к повышению производительности склада // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2024. – Т. 28, № 2. – С. 410–420.
2. Меркулова А. Ю., Назаревич С. А. Робастность как метод контроля качества технологических процессов организационной системы // Метрологическое обеспечение инновационных технологий : сб. ст. V Междунар. форума (Санкт-Петербург, 02 марта 2023 г.) / под ред. В. В. Окрепилова. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2023. – С. 231.
3. Пашина Е. А. Инструменты хронометража для контроля уровня качества технологических процессов // Взгляд молодых исследователей: экономика, управление, инновации 2023 : материалы общерос. науч.-практ. конф. (Мытищи, 27–28 апр. 2023 г.). – Москва : Научные технологии, 2023. – С. 229–231.

4. Яценко В. В. Исследование возможности улучшения процесса аудита на основе его оптимизации методом Тагути // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2024. – Т. 26, № 6 (122). – С. 96–108.
5. Ивахненко А. Г., Аникеева О. В. Оптимальное управление при достижении целей в области качества промышленного предприятия // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2021. – Т. 23, № 4. – С. 18–26.

References

1. Teplov, A. V. (2024). A systems approach to improving warehouse productivity. *Systems Analysis in Design and Management*, 28(2), 410–420.
2. Merkulova, A. Yu., & Nazarevich, S. A. (2023). Robustness as a method for controlling the quality of technological processes in an organizational system. In V. V. Okrepilov (Ed.), *Metrological support of innovative technologies: Proceedings of the V International Forum* (p. 231). Saint Petersburg: SUAI Publishing.
3. Pashina, E. A. (2023). Timekeeping tools for monitoring the quality level of technological processes. In *The View of Young Researchers: Economics, Management, Innovations 2023: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference* (pp. 229–231). Moscow: Scientific Technologies.
4. Yashchenko, V. V. (2024). Research on the possibility of improving the audit process through its optimization using the Taguchi method. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 26(6(122)), 96–108.
5. Ivakhnenko, A. G., & Anikееva, O. V. (2021). Optimal management in achieving quality objectives for an industrial enterprise. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 23(4), 18–26.

SYSTEMS ANALYSIS OF ROBUST DESIGN PROCESSES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF PROJECT LOGISTICS SUPPORT CHANNELS

Lavrentyeva Anastasia Andreevna

4th year bachelor's student, Faculty of Fundamental Training and Technological Innovation (FPTI Institute)

Institute of Fundamental Training and Technological Innovation (FPTI Institute)

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

E-mail: anastasia.lavren@yandex.ru

Nazarevich Stanislav Anatolyevich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences

Deputy Director of the Institute of Fundamental Training and Technological Innovation

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

E-mail: nazarevich@guap.ru

© Лаврентьева А.А., Назаревич С.А., 2026

РАЗДЕЛ ГЕОЭКОЛОГИЯ

SECTION GEOECOLOGY

УДК 504.453

Урусова Е.С., Машина А.И.

ДИНАМИКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ РЕК НОВГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ

Урусова Елена Сергеевна

Кандидат географических наук, доцент

кафедра Прикладной и системной экологии

Экологического факультета

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет,

Санкт-Петербург

E-mail: e.s.urusova@yandex.ru

Машина Анастасия Ивановна

Студентка 3 курса Магистратуры

Кафедра Прикладной и системной экологии

Экологического факультета

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

Санкт-Петербург

E-mail: nastrnkakarpovich@gmail.com

Аннотация. *Статья содержит комплексный анализ гидрологического и гидрохимического режимов крупнейших рек притоков озера Ильмень, протекающих в Новгородской области. Рассматриваются реки Пола, Ловать и Шелонь. Проведена оценка динамики среднегодового, максимального и минимального стока рек. Проанализирована динамика изменения среднегодовых концентраций загрязняющих веществ. Анализ временной динамики проводился с применением оценки трендов отдельно по каждому показателю загрязненности. Представлен анализ и даны предположения источников негативного воздействия на исследуемые реки. В результате исследования было получено, что реки Пола, Ловать и Шелонь имеют схожий гидрологический режим. В результате оценки загрязненности рек было выявлено, что наиболее чистой является река Пола, наиболее загрязненной – р. Шелонь и река Ловать в г. Великие Луки.*

Ключевые слова: *загрязненность рек, качество вод, река Пола, река Шелонь, река Ловать, озеро Ильмень, класс качества вод, гидрологический режим, гидрохимический режим.*

DYNAMICS OF POLLUTION IN RIVERS OF THE NOVGOROD REGION

Annotation. *The article provides a comprehensive analysis of the hydrological and hydrochemical regimes of the largest tributaries of Lake Ilmen in the Novgorod Region. The Pola, Lovat, and Shelon rivers are examined. The dynamics of the average annual, maximum, and minimum river flows are assessed. The dynamics of changes in average annual pollutant concentrations are analyzed. The analysis of temporal dynamics was conducted using a trend assessment for each pollution indicator separately. An analysis and hypotheses regarding the sources of negative impacts on the rivers under study are presented. The study found that the Pola, Lovat, and Shelon rivers have similar hydrological regimes. A river pollution assessment*

revealed that the Pola River is the cleanest, while the Shelon River and the Lovat River in Velikiye Luki are the most polluted.

Keywords: River pollution, water quality, Pola River, Shelon River, Lavat River, Lake Ilmen, water quality class, hydrological regime, hydrochemical regime.

Введение. В результате интенсивного использования человечеством водных ресурсов происходит количественное и качественное изменение гидросферы. Изменяется водный баланс, режим рек, состав воды, что связано с загрязнением природных вод сточными водами, а также с привнесением загрязняющих веществ с поверхностным и внутрипочвенным стоком и непосредственно из воздуха.

В результате загрязнения происходит резкое ухудшение качества воды, снижается способность поверхностных водных объектов к самоочищению. Загрязнение природных вод создает угрозу для жизни и здоровья населения. Поэтому оценка качества и экологического состояния водных экосистем является одной из наиболее актуальных и приоритетных задач охраны окружающей среды (в части охраны и использования водных ресурсов).[1]

В современном мире качество водных ресурсов приобретает особое значение для экологической безопасности, устойчивого развития регионов и здоровья населения. Исследование гидрологического режима и степени загрязненности рек является важной научной задачей, позволяющей выявить основные тенденции изменения водных экосистем, определить источники загрязнений и разработать рекомендации по их охране и рациональному использованию.[1,2]

Реки Ловать, Пола и Шелонь играют значимую роль в регионе: они являются самыми крупными притоками озера Ильмень и напрямую влияют на качество его вод в южной части. Данные реки являются водотоками первой рыбохозяйственной категории, обеспечивают населенные пункты, расположенные по их берегам, пресной питьевой водой для нужд населения, промышленности и сельского хозяйства.[2,3] Кроме того, данные реки являются приемниками коммунально-бытовых, промышленных и сельскохозяйственных стоков разной степени очистки.[4,5] В связи с этим отмечается достаточно высокий уровень загрязненности рек Ловать, Пола и Шелонь по отдельным гидрохимическим показателям [4,5,6]. Высокая значимость исследуемых рек для водной системы озера Ильмень определяет необходимость их совместного комплексного исследования и сравнения. Данные обстоятельства делают анализ пространственно-временной динамики загрязненности рек Ловать, Пола и Шелонь актуальным. Анализ гидрологического режима исследуемых рек необходим для комплексной оценки состояния экосистемы водотоков. На рисунке 1 представлена карта исследуемых рек.



Рисунок 1. Карта региона исследования [8]

Figure 1. Map of the study region

Целью данной работы является проведение комплексной оценки качества вод рек Новгородской области с целью выявления текущего состояния водных объектов, причин загрязнения и предложения мероприятий по их охране и повышению качества воды.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Провести анализ гидрологического режима исследуемых рек.
- 2) Оценить пространственно-временную динамику загрязненности рек.
- 3) Проанализировать зависимость гидрологического и гидрохимического режимов исследуемых рек.

Исходные данные для исследования предоставлены архивом Северо-западного УГМС.

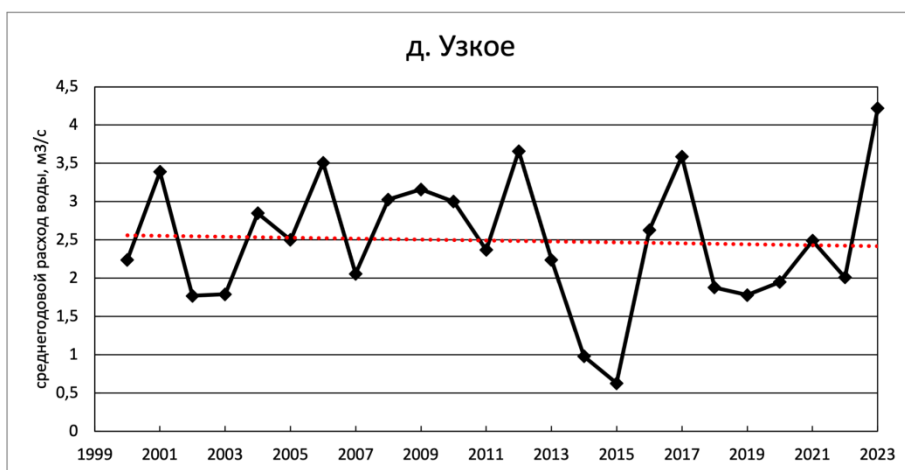
В качестве основных методик исследования были использованы методы статистической обработки данных (оценки числовых характеристик, однородности рядов наблюдений и оценка тренда), а также методы территориальных обобщений и гидрологической аналогии.

Анализ гидрологического режима рек Пола, Ловать и Шелонь. В работе проводится оценка гидрологического режима рек Пола, Ловать и Шелонь. Данные реки являются крупнейшими притоками южной части озера Ильмень и оказывают существенное влияние на его состояние. [6,7]

Оценка динамики стока проводится по среднегодовым, максимальным и минимальным расходам воды за период с 2000 по 2023 год. Данные предоставлены архивом Северо-Западного УГМС.

Река Ловать – водоток, протекающий в Витебской области Республики Беларусь, а также Псковской и Новгородской областях России. Длина реки составляет 530 км, площадь бассейна 21,9 тыс. км² [8,9] Принадлежит к бассейну Балтийского моря. На реке расположены города Великие Луки, Холм и посёлок городского типа Парфино. Относится к типично равнинным рекам малой водности, со слабой скоростью течения и преимущественно низкими, заболоченными берегами. Большая часть бассейна покрыта лесами (52 %), озера и болота занимают 2 % и 8 % от водосборной площади реки. В низовье р. Ловать судоходна. Река зарегулирована плотиной в г. Великие Луки, что повлияло на её гидрологический режим за счет сглаживания максимальных и минимальных пиков. На реке находятся три действующих гидрологических пункта: д. Узкое, г. Великие Луки и г. Холм.

На рисунке 2 представлены среднегодовые расходы воды для реки Ловать. Для оценки тенденции изменения значений были построены и проанализированы линейные тренды.



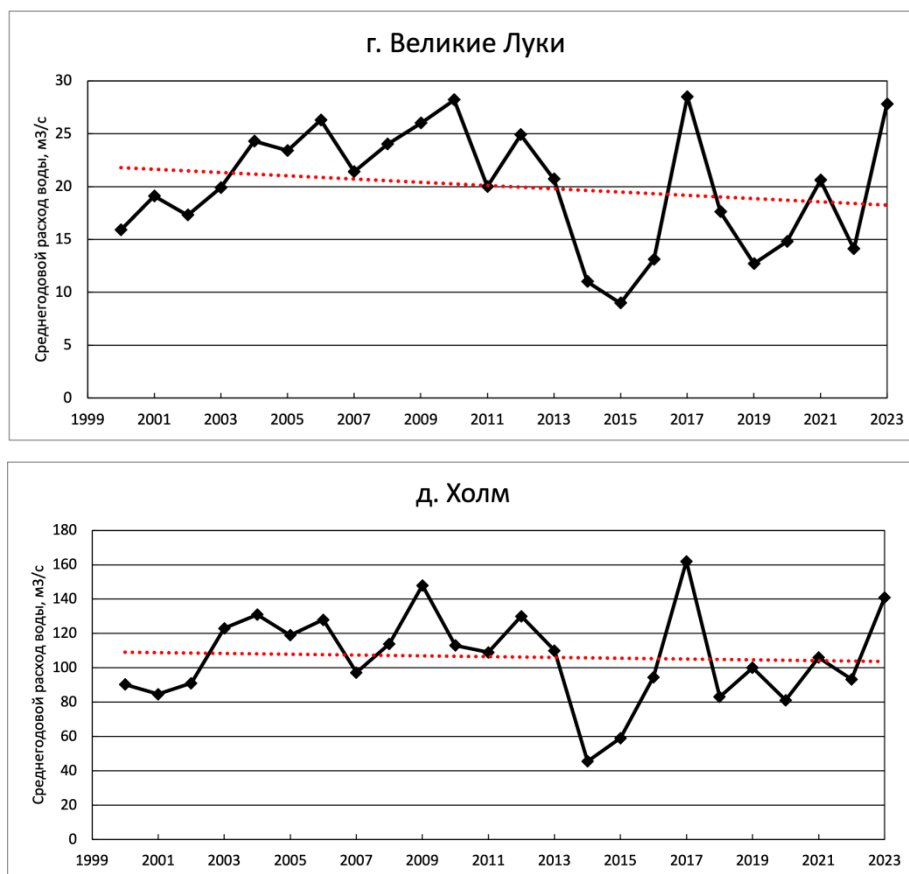


Рисунок 2. Динамика изменения среднегодовых расходов воды на р. Ловать

Figure 2. Dynamics of changes in average annual water flow in the Lovat' River

Из представленного рисунка видно, что динамика значений стока на всех трех пунктах имеет схожие черты, особенно в области минимальных значений. Однако, обращает на себя внимание некоторое отличие значений в пункте д. Узкое, тогда как в пунктах г. Великие Луки и д. Холм отличия менее значимы. Данный результат можно объяснить влиянием водохранилища в г. Великие Луки. Оценка значимости трендов проводилась по коэффициенту корреляции Пирсона.[11] В результате, получилось, что все тренды не значимы, что подтверждает выводы по графикам. Оценка вариативности рядов наблюдений показала, что сток реки Ловать подвержен значительным колебаниям. Коэффициенты вариации рядов среднегодовых значений равны 0,35; 0,28 и 0,25 для пунктов Узкое, Великие Луки и Холм соответственно. Снижение вариативности в г. Великие Луки также связано с влиянием водохранилища. Возможными причинами колебаний водности могут быть климатические изменения и антропогенная нагрузка на водосбор.[12,13]

Река Шелонь берет начало из болота в 2 км северо-западнее д. Новая Слобода, впадает в озеро Ильмень в 12 км северо-западнее г. Шимска тремя рукавами: главным является правобережный - р. Большая Шелонь. Длина реки - 248 км, средний уклон равен 0,33 ‰. Площадь бассейна – 9710 км². Густота речной сети составляет 0,96 км/км². Смешанный лес занимает 33 % от площади водосборного бассейна. Река судоходна в низовьях, от города Сольцы до устья. На реке Шелонь расположено водохранилище Псковской ГРЭС, а также плотина бывшей МГЭС в г. Порхов. На реке Шелонь расположено два действующих гидрологических поста: г. Порхов и д. Заполье. В д. Заполье период наблюдений охватывает период лишь с 2000 по 2009 год. Далее наблюдения в архиве УГМС отсутствуют, в связи с этим данный гидрологический пост в статье не рассматривается [12,13].

На рисунке 3 представлены данные среднегодового стока для реки Шелонь в г. Порхов.

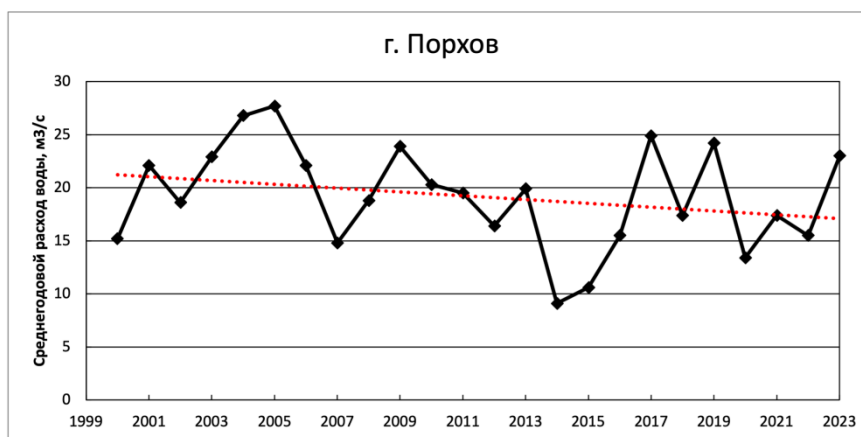


Рисунок 3. Динамика изменения среднегодовых расходов воды на р. Шелонь

Figure 3. Dynamics of changes in average annual water flow in the Shelon River

Из рисунка 3 видно, что значения среднегодового стока подвержены значительным колебаниям. Коэффициент вариации ряда среднегодовых расходов воды равен 0,25. На рисунке видна тенденция снижения значений, однако статистическая проверка значимости тренда по коэффициенту корреляции Пирсона показала, что тренд не значим. Это говорит о том, что в масштабах колебания значений стока тенденция незначительна. [11]

Река Пола имеет площадь водосбора 7120 км² (без учета водосбора оз. Велье, сток с которого перебрасывается в бассейн р. Мсты), длину 268 км, средний уклон 0,87 ‰. Река Пола, в её среднем течении русло делает небольшой изгиб в сторону востока и севера. Исток реки находится на северо-западных склонах Валдайской возвышенности в Андреапольском районе Тверской области. Впадает Пола в оз. Ильмень несколькими рукавами, имеет с р. Ловать общую дельту, однако впадает в Ильмень самостоятельно, восточнее реки Ловать. Участок реки Полы ниже соединительной протоки с рекой Ловатью ещё называют Верготью. Река судоходна в нижнем течении. На реке Пола нет крупных гидротехнических сооружений (МГЭС, водохранилищ итд). На реке Пола расположен один гидрологический пост в д. Налючи.

На рисунке 4 представлена динамика среднегодового стока реки Пола. Из рисунка видно, что среднегодовой сток обладает достаточно высокой изменчивостью. Коэффициент вариации равен 0,25. Линия тренда практически не имеет выраженного наклона. Действительно, тренд для реки Пола оказался, не значим.



Рисунок 4. Динамика изменения среднегодовых расходов воды на р. Пола

Figure 4. Dynamics of changes in average annual water flow in the Pola River

Также был проведен сравнительный анализ гидрологического режима трех исследуемых рек. Для оценки однородности факторов, формирующих сток рек Пола, Ловать и Шелонь, были рассчитаны и проанализированы парные коэффициенты корреляции для рядов среднегодовых расходов воды. В результате получилось, что значения коэффициентов корреляции оказались равны:

Для пары р. Ловать д. Холм – р. Шелонь г. Порхов: 0,76

Для пары р. Ловать д. Холм – р. Пола д. Налючи: 0,70

Для пары р. Шелонь г. Порхов – р. Пола д. Налючи: 0,69

Данные значения показывают наличие заметной и высокой связи [10], все значения коэффициентов корреляции значимы. Данные результаты указывают на то, что в целом гидрологические режимы всех трех рек имеют схожие черты в следствие действия одних и тех же факторов формирования стока.

По результатам оценки обобщенности или различия гидрологических режимов рек Ловать, Шелонь и Пола можно сделать следующие выводы.

Общие черты:

- Гидрологические режимы всех трех рек характеризуются сезонными колебаниями воды, обусловленными климатическими особенностями области (умеренно континентальный климат с четко выраженными сезонами).
- Среднегодовые расходы воды демонстрируют схожие тенденции – повышения и уменьшения расходов в одни и те же года.

Различия:

- Река Пола демонстрирует наиболее выраженные колебания, достигая высоких максимумов и глубоких минимумов. Шелонь менее интенсивна по сравнению с Полой, а Ловать наиболее стабильна.
- Частота и интенсивность паводков наиболее ярко выражены на реке Пола за счет меньшей площади водосбора, по сравнению с Шелонью и Ловатью. Ловать же характеризуется более равномерным режимом.

Анализ загрязненности рек Пола, Ловать и Шелонь по гидрохимическим показателям.

Оценка загрязненности исследуемых рек проводилась на основе использования данных о качестве поверхностных вод за период с 2000 по 2024 годы на гидрохимических постах наблюдения сети Росгидромета. В качестве исходных данных были выбраны среднегодовые значения концентраций растворенного кислорода, хлоридов, сульфатов, азота аммонийного, азота нитритного, азота нитратного, железа общего, меди, свинца, кадмия, марганца, нефтепродуктов, АСПАВ, фенолов и показателей бихроматной окисляемости и БПК₅. Также для комплексного анализа загрязненности и оценки класса качества вод был использован удельный комбинаторный индекс загрязненности вод (УКИЗВ). Данные предоставлены архивом Северо-Западного УГМС. Вместе с данными о качестве вод были проанализированы данные по возможным источникам негативного воздействия на реки Ловать, Пола и Шелонь. [8,9]

Для реки **Ловать** мониторинг загрязненности вод проводится в двух пунктах наблюдения: г. Великие Луки (2 створа) и пгт. Парфино (2 створа). Исходя из сведений, опубликованных в СКИОВО для водного бассейна реки Волхов [8], основные источники загрязнения реки расположены в г. Великие Луки (7 источников), включая МП «Водоканал» г. Великие Луки и МУ «УЖКХ г. Великие Луки». На рисунке 5 представлена динамика изменения значений УКИЗВ для реки Ловать.

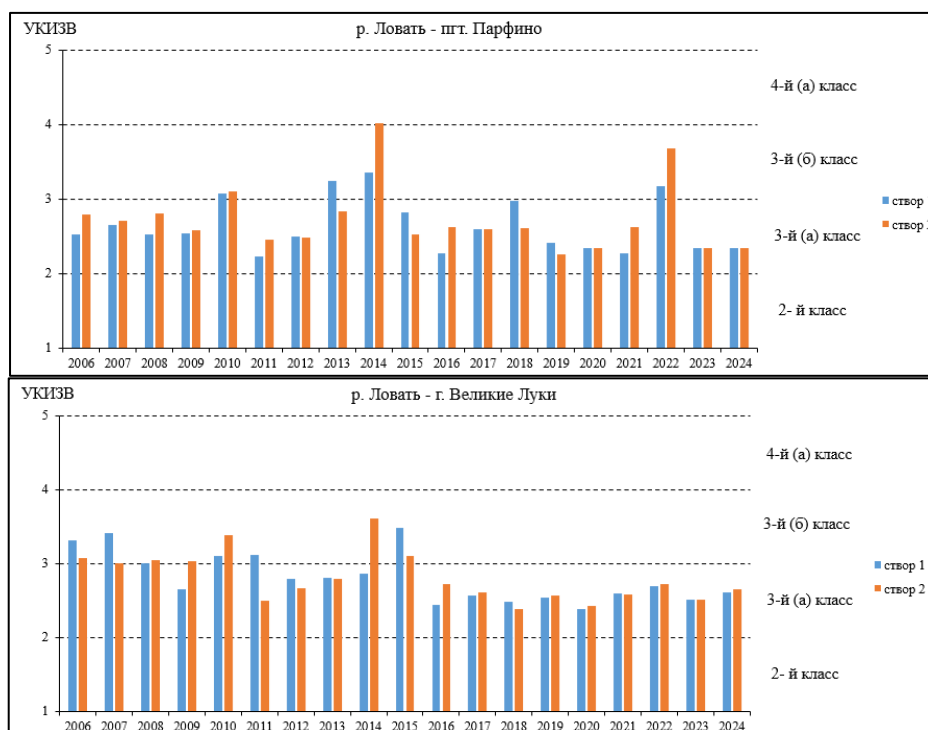


Рисунок 5. Динамика изменения УКИЗВ для реки Ловать
Figure 5. Dynamics of changes in the CIWP for the Lovat River

Из рисунка 5 видно, что воды в г. Великие Луки более загрязнены, чем в пгт. Парфино, что очевидно, связано с большим количеством источников негативного антропогенного воздействия. Максимальные значения УКИЗВ в 2014 и 2015 годах совпадают с минимальными среднегодовыми расходами воды.

Для оценки показателей, которые вносят наибольший вклад в загрязненность реки, была проведена оценка кратности превышения предельно-допустимых концентраций (ПДК) для отдельных значений концентраций [14,15]. В результате были выделены приоритетные загрязняющие вещества, для которых регулярно отмечались превышения значений ПДК и наибольшие кратности превышения ПДК. Так, для реки Ловать к приоритетным загрязняющим веществам можно отнести соединения железа, меди, марганца, органические вещества (по БПК₅ и Петрмангонатной окисляемости), азот аммонийный.

Для реки Шелонь мониторинг загрязненности проводился на одной станции наблюдений в г. Шимск (2 створа). Оценка источников загрязнения показала, что они сосредоточены в городах, к основным источникам можно отнести Муниципальное унитарное предприятие «Жилищно-коммунальное хозяйство Солецкого района», МП "Водоканал" Дедовичского района, Муниципальное производственное водопроводно-канализационное предприятие Муниципального образования «Порховский район». Динамика изменения УКИЗВ для реки Шелонь представлена на рисунке 6.

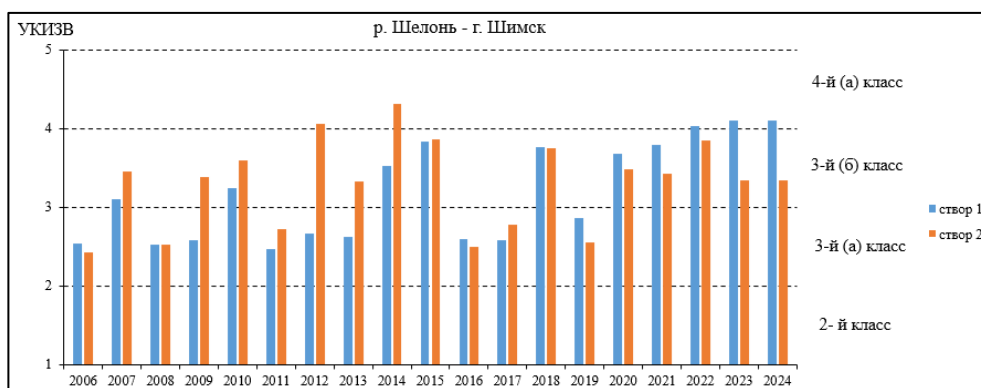


Рисунок 6. Динамика изменения УКИЗВ для реки Шелонь

Figure 6. Dynamics of changes in the CIWP for the Shelon' River

Из рисунка видно, что воды реки Шелонь относятся к 3 классу качества, разряды «а» и «б». Отмечается тенденция увеличения значений с 2016 по 2024 годы. По оценке кратности повышения ПДК к приоритетным загрязняющим веществам можно отнести соединения железа, марганца, органического вещества. В отдельные годы отмечалось превышение ПДК по нефтепродуктам и фенолам.

Для реки Пола наблюдения за загрязненность реки проводятся только в одном створе д. Налючи. Анализ водопользователей для реки Пола показал, что основным потенциальным загрязнителем является ООО «МП Водоканал Парфинского района». Результаты оценки УКИЗВ представлены на рисунке 7.

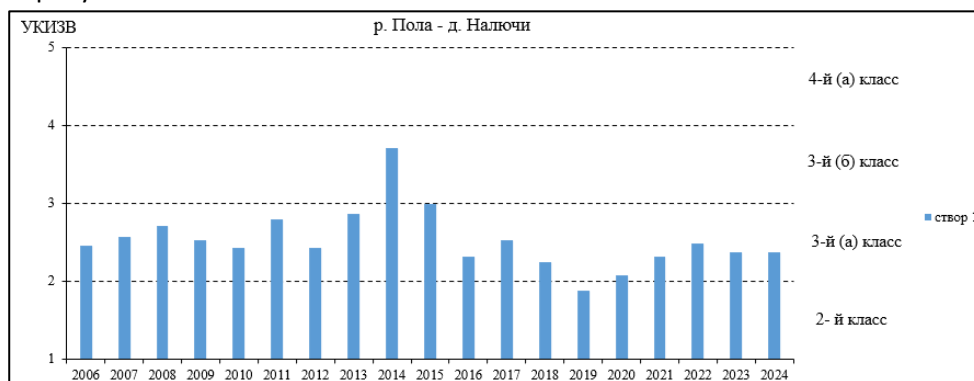


Рисунок 7. Динамика изменения УКИЗВ для реки Пола

Figure 7. Dynamics of changes in the CIWP for the Pola River

Для реки Пола можно отметить, что воды реки относятся к классу загрязненности 3 «а», отмечаются достаточно низкие значения в последние годы. К приоритетным загрязняющим веществам по кратности превышения ПДК можно отнести органические вещества, соединения железа, меди, марганца.

Заключение. Оценка особенностей гидрологического режима исследуемых рек показала, что реки имеют схожие черты во временной динамике среднегодовых расходов воды и в во внутригодовом распределении стока.

В результате оценки загрязненности рек Ловать Пола и Шелонь можно сделать вывод, что наиболее чистой является река Пола, наиболее загрязненной – р. Шелонь и река Ловать в г. Великие Луки. Для реки Ловать можно отметить снижение загрязнения от г. Великие Луки до пгт. Парфино, это может быть связано с процессами самоочищения по длине реки в совокупности с отсутствием источников негативного воздействия и разбавлением за счет бокового притока. Приоритетные загрязняющие вещества для всех исследуемых рек одинаковы, что говорит об общности их

гидрохимического режима. Основными источниками загрязнения, вероятно, являются предприятия Водоканала и ЖКХ городов и поселков городского типа, а также сельскохозяйственные стоки.

Динамика загрязненности и водности имеют обратную зависимость: в период низкой водности отмечается нарастание общего уровня загрязненности и наоборот.

В общем, исследуемые реки Ловать, Пола и Шелонь имеют схожие черты в гидрологическом и гидрохимическом режимах.

Список использованных источников

1. Результаты исследований в области прикладной и системной экологии в РГГМУ / Д. К. Алексеев, В. А. Шелутко, Н. В. Зуева [и др.] // Гидрометеорология и экология. – 2020. – № 60. – С. 306-324. – DOI 10.33933/2074-2762-2020-60-306-324.
2. Дружнова, М. П. Хозяйственное использование крупных рек Новгородской области / М. П. Дружнова, С. Г. Давыдова // Моря и воды суши в традиционном и современном природопользовании : Сборник материалов Межрегиональной молодежной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29 марта 2023 года. – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2023. – С. 46-51.
3. Андреев, В. В. Оценка качества природной воды Новгородской области за 2010-2015 г / В. В. Андреев // Геоэкологические проблемы и устойчивое развитие Балтийского региона : сборник материалов молодежной научно-практической конференции, Великий Новгород, 11–14 октября 2017 года. – Великий Новгород: Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Новгородский филиал, 2017. – С. 7-14.
4. Хмелевская, И. А. Микробиологическая индикация загрязнения водной среды / И. А. Хмелевская // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. – 2013. – № 3. – С. 37-46.
5. Керечанина, Е. Д. Настоящее и будущее реки Ловать / Е. Д. Керечанина // Отходы, причины их образования и перспективы использования : Сборник научных трудов по материалам Международной научной экологической конференции, Краснодар, 26–27 марта 2019 года / Составитель Л.С. Новопольцева. Под редакцией И.С. Белюченко. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2019. – С. 393-396.
6. Игнатьева, Н. В. Оценка загрязненности поверхностных вод на территории водосборного бассейна Ладожского озера по гидрохимическим показателям / Н. В. Игнатьева, Т. Н. Петрова, М. А. Гусева // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17, № 6. – С. 91-96.
7. Невско-Ладожское бассейновое водное управление [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://www.nord-west-water.ru/activities/water_objects/protection_activities/no/ (дата обращения 15.12.2025)
8. Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Волхов. Книга 6. Общая Характеристика Бассейна Реки Волхов. – 87 с.
9. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1980 год. / ред. И.В. Кузнецов – т.1 (Бассейн Балтийского моря). – вып. 0-3 – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 850 с.
10. Загрязнение поверхностных вод суши (2019-2025гг.) Официальный сайт ФГБУ «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=1631> (Дата обращения 15.12.2025)
11. Шелутко, В. А. Практикум по дисциплине "Анализ и методы обработки геоэкологической информации" / В. А. Шелутко, Е. С. Урусова ; Российский государственный

гидрометеорологический университет. – Санкт-Петербург : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2020. – 120 с.

12. Францкевич, О. Д. Внутригодовое распределение стока рек Новгородской области в условиях современного климата / О. Д. Францкевич, И. О. Винокуров // Гидрология и океанология - 2025 : Сборник материалов конференции студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ, Санкт-Петербург, 25 апреля 2025 года. – Казань: ООО "Бук", 2025. – С. 242-246.
13. Тебенькова, А. О. Гидрологическая характеристика рек Новгородской области / А. О. Тебенькова // ЛУЧШАЯ НАУЧНАЯ СТАТЬЯ 2019 : сборник статей XXX Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 30 ноября 2019 года. – Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2019. – С. 177-180.
14. Гидрохимический институт. Ежегодники качества поверхностных вод Российской Федерации. [Электронный ресурс]. / Режим доступа: <https://gidrohim.com/node/44> (Дата обращения 1.06.2025-19.06.2025)
15. РД 52.24.643-2002 «Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям»

Reference

1. Research results in the field of applied and systems ecology at the Russian State Medical University / D. K. Alekseev, V. A. Shelutko, N. V. Zueva [et al.] // Hydrometeorology and ecology. - 2020. - No. 60. - Pp. 306-324. - DOI 10.33933/2074-2762-2020-60-306-324.
2. Druzhnova, M. P. Economic use of large rivers of the Novgorod region / M. P. Druzhnova, S. G. Davydova // Seas and land waters in traditional and modern nature management: Collection of materials of the Interregional youth scientific and practical conference, St. Petersburg, March 29, 2023. – Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2023. – P. 46-51.
3. Andreev, V. V. Assessment of natural water quality in the Novgorod region for 2010-2015 / V. V. Andreev // Geoecological problems and sustainable development of the Baltic region: collection of materials from the youth scientific and practical conference, Veliky Novgorod, October 11-14, 2017. – Veliky Novgorod: Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Novgorod branch, 2017. – P. 7-14.
4. Khmelevskaya, I. A. Microbiological indication of aquatic environment pollution / I. A. Khmelevskaya // Bulletin of Pskov State University. Series: Natural and physical-mathematical sciences. – 2013. – No. 3. – P. 37-46.
5. Kerechanina, E. D. The Present and Future of the Lovat River / E. D. Kerechanina // Waste, the Causes of Its Formation and Prospects for Use: Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Scientific Environmental Conference, Krasnodar, March 26–27, 2019 / Compiled by L. S. Novopoltseva. Edited by I. S. Belyuchenko. – Krasnodar: Kuban State Agrarian University named after I. T. Trubilin, 2019. – Pp. 393–396.
6. Ignatyeva, N. V. Assessment of Surface Water Pollution in the Catchment Basin of Lake Ladoga Based on Hydrochemical Indicators / N. V. Ignatyeva, T. N. Petrova, M. A. Guseva // Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 17, No. 6. – Pp. 91–96.
7. Neva-Ladoga Basin Water Authority [Electronic resource] / Access mode: https://www.nord-west-water.ru/activities/water_objects/protection_activities/no/ (date of access 15.12.2025)
8. Scheme for the integrated use and protection of water bodies (SKIOVO) of the Volkhov River basin. Book 6. General Characteristics of the Volkhov River Basin. – 87 p.
9. State Water Cadastre. Annual data on the regime and resources of surface waters on land. 1980. / ed. I.V. Kuznetsov – v. 1 (Baltic Sea Basin). – issue. 0-3 – L.: Gidrometeoizdat, 1982. – 850 p.

10. Pollution of Surface Waters on Land (2019-2025) Official website of the Federal State Budgetary Institution "North-West Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring" [Electronic resource] / Access mode: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=1631> (Accessed on 12/15/2025)
11. Shelutko, V. A. Workshop on the discipline "Analysis and methods of processing geocological information" / V. A. Shelutko, E. S. Urusova; Russian State Hydrometeorological University. - St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2020. - 120 p.
12. Frantskevich, O. D. Intra-annual distribution of river runoff in the Novgorod region under modern climate conditions / O. D. Frantskevich, I. O. Vinokurov // Hydrology and Oceanology - 2025: Collection of materials from the conference of the student scientific society of the Institute of Hydrology and Oceanology of the Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, April 25, 2025. - Kazan: OOO "Buk", 2025. - P. 242-246.
13. Tebenkova, A. O. Hydrological characteristics of the rivers of the Novgorod region / A. O. Tebenkova // BEST SCIENTIFIC ARTICLE 2019: collection of articles from the XXX International Scientific Research Competition, Penza, November 30, 2019. - Penza: "Science and Education" (IP Gulyaev G.Yu.), 2019. - P. 177-180.
14. Hydrochemical Institute. Yearbooks of Surface Water Quality in the Russian Federation. [Electronic resource]. / Access mode: <https://gidrohim.com/node/44> (Accessed 1.06.2025-19.06.2025)
15. RD 52.24.643-2002 "Method for Comprehensive Assessment of Surface Water Pollution Based on Hydrochemical Indicators"

DYNAMICS OF POLLUTION IN RIVERS OF THE NOVGOROD REGION

Urusova Elena Sergeevna

Associated professor

Ecological Department,

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

Email: e.s.urusova@yandex.ru

Mashina Anastasia Ivanovna

3th year graduate student

Ecological Department,

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg

E-mail: nastrnkakarpovich@gmail.com

© Урусова Е.С., Машина А.И., 2026

УДК 528.92

Леонов Е.Л., Леонов И. Е., Сазанов В.Н., Вагизов М.Р.

**ПЕРВОПРИЧИНЫ ДЕГРАДАЦИИ МАЛЫХ РЕК, НЕ УЧТЁННЫЕ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ
«ВОДНОЙ СТРАТЕГИИ РФ» И ВОЗМОЖНЫЕ СПОСОБЫ ИСПРАВЛЕНИЯ
СИТУАЦИИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМ ЦИФРОВОГО МОНИТОРИНГА**

Леонов Евгений Леонидович

инженер геофизик

Генеральный директор

АНО РППТ «Уникальные ландшафты»

E-mail: leonovell@mail.ru

Леонов Иван Евгеньевич

программист

Начальник отдела моделирования природных процессов

АНО РППТ «Уникальные ландшафты»

E-mail: netlie.ivan.leonov@yandex.ru

Сазанов Виталий Николаевич

биотехнолог биологических очистных сооружений,

Научный руководитель

АНО РППТ «Уникальные ландшафты»

E-mail: sazavit@yandex.ru

Вагизов Марсель Равильевич

Доктор технических наук, доцент

Проректор по информационным технологиям и цифровой трансформации

ФГБОУ ВО Российский государственный гидрометеорологический университет

E-mail: bars-tatarin@yandex.ru

***Аннотация.** Современная система водопользования в России построена на потребительских принципах и нормативных методиках, которые в своё время были эффективны, но сегодня уже не позволяют решать задачи комплексного управления водными ресурсами. Реализация «Водной стратегии РФ до 2020 года» показала: при сохранении прежних подходов малые реки продолжают мелеть, водные источники деградируют, а негативные гидрологические явления усиливаются, несмотря на принимаемые меры.*

В статье раскрывается актуальная необходимость перехода к экосистемному водопользованию, методология которой сейчас только формируется, а соответствующие технологии хоть уже давно известны, но пока применяются только в масштабах сельского хозяйства и дорожной инфраструктуры.

Проведён частичный анализ результатов реализации Водной стратегии РФ до 2020г., построенной на базе СКИОВО, как основного инструментария принятия управленческих решений по достижению устанавливаемых целевых показателей, с целью выявления причины продолжающегося истощения водных ресурсов. Выявлена ключевая причина дефицита водных

ресурсов и деградации малых рек, которая кроется в несостоятельности методики по разработке СКИОВО, требующая её корректировки в этих вопросах.

В статье показано, что ключевым фактором снижения полноводности рек является нарушение растительного каркаса экосистемы водосбора — лесов и почвенных массивов, которые обеспечивают сохранение осадков от выветривания и выплескивания в русла рек, пополнение грунтовых вод и равномерность стока. Эти функции подтверждены отечественной научной школой лесомелиорации.

Ключевые слова: дефицит водных ресурсов, истощение вод, деградация малых рек, экосистемы водосбора, экосистемное водопользование, растительный каркас естественной экосистемы водосбора речной сети, технологии лесомелиорации.

ROOT CAUSES OF SMALL RIVERS DEGRADATION NOT ACCOUNTED IN THE IMPLEMENTATION OF THE "RUSSIAN FEDERATION WATER STRATEGY" AND POSSIBLE WAYS TO CORRECT THE SITUATION BASED ON DIGITAL MONITORING SYSTEMS

Abstract. *The current water management system in Russia is built on consumer principles and regulatory methodologies that were effective in their time but are no longer adequate for addressing integrated water resource management challenges. Implementation of the "Water Strategy of the Russian Federation to 2020" has demonstrated that, while current approaches continue, small rivers continue to dry out, water sources degrade, and adverse hydrological phenomena intensify despite ongoing measures.*

This article highlights the urgent need to transition to ecosystem-based water management, a methodology for which is still being developed, and the corresponding technologies, although long known, are currently only used in agriculture and road infrastructure.

This article provides a partial analysis of the implementation results of the Water Strategy of the Russian Federation to 2020, based on the SKIOVO system as the primary tool for making management decisions to achieve established targets, with the aim of identifying the causes of the continuing depletion of water resources. The key cause of water resource shortages and small river degradation has been identified. It stems from the inadequacy of the SKIOVO development methodology, requiring its revision in these areas.

The article demonstrates that the key factor in declining river flow is the disruption of the vegetation framework of the watershed ecosystem—forests and soils that ensure the preservation of sediment from weathering and spilling into riverbeds, groundwater replenishment, and uniform runoff. These functions are confirmed by the Russian scientific school of forest reclamation.

Keywords: *water resource shortages, water depletion, small river degradation, watershed ecosystems, ecosystem-based water management, vegetation framework of the natural ecosystem of the river network watershed, forest reclamation technologies.*

Введение. Среди возможных причин ухудшения состояния гидрологического режима может являться слабо формализованный методологический аппарат технологического применения существующих способов восстановления речных экосистем, нужно отметить, что существующие методики рассматривают реку как изолированный водный объект, хотя её состояние напрямую

зависит от состояния геоэкосистем на территории водосбора. Требуется принципиально новые подходы для решения задач по предотвращению деградации малых рек, риска наводнений и иного негативного воздействия вод, которые будут сохраняться, и усиливаться в будущем, в связи с учащением опасных гидрологических явлений в изменяющихся климатических условиях и продолжающемся антропогенным освоением территорий. В предыдущей работе были обозначены некоторые вопросы, связанные с необходимостью восстановления гидрологического режима малых рек [15]. В данной работе наиболее детально будут рассмотрены связанные с причинами и задачами, которые необходимо решить при помощи различных инструментов, в том числе с использованием цифровых технологий.

В целях гарантированного обеспечения водными ресурсами, как следует из Водной стратегии РФ до 2020г, необходимо создание методологических и технологических основ экосистемного водопользования.

Предлагаемый авторами переход к экосистемному водопользованию основан на восстановлении именно тех природных процессов, которые обеспечивают устойчивый гидрологический режим. В статье описано:

- какие конкретно функции выполняет растительный каркас водосбора;
- как их деградация приводит к снижению уровня рек и увеличению рисков наводнений;
- почему локальные проекты очистки воды, углубления русел рек или укрепления берегов не дают ощутимого эффекта без восстановления этих процессов;
- какие технологии лесомелиорации и IT-инструменты можно применить для восстановления необходимого водного баланса;
- как геоинформационное моделирование позволит стратегически планировать проекты на десятилетия вперёд и снизить риски ошибок.

В статье дана попытка раскрыть проблемы водных ресурсов с точки зрения экосистемного подхода, и предложено использование лесомелиоративных технологий в масштабах экосистем водосбора речной сети. Особое внимание уделено практическим шагам: корректировке методик СКИОВО, необходимости юридического закрепления необходимых функций экосистемы, а также потребности в цифровом двойнике речной сети для принятия управленческих решений и создания проектов в масштабах территорий водосбора рек.

Статья предлагает управляемый, научно обоснованный и технологически реализуемый механизм повышения водной безопасности регионов — не за счёт усиления контроля над водопользователями, а через восстановление природных процессов, обеспечивающих устойчивость водных ресурсов.

Предложен новый системный подход для решения задач по предотвращению деградации малых рек, риска наводнений и иного негативного воздействия вод. Описана суть растительного каркаса естественной экосистемы водосбора речной сети и его средообразующих функций для поддержания полноводности и равномерности водного потока рек.

Описаны методологические и технологические условия восстановления этих функций и необходимые инструменты для реализации проектов экосистемного водопользования.

Анализ результатов реализации «Водной стратегии РФ до 2020г» с целью выявления причин продолжающегося истощения водных ресурсов.

Методические указания по разработке Схем комплексного использования и охраны водных объектов [1] разработаны в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2006 года N 883 и утверждены Приказом МПР РФ от 4 июля 2007 г. N 169 "Об утверждении Методических указаний по разработке схем комплексного использования и охраны водных объектов" (далее СКИОВО).

Основной задачей разработки СКИОВО являлось формирование инструментария принятия управленческих решений по достижению устанавливаемых Схемами целевых показателей качества воды водных объектов рассматриваемого речного бассейна и уменьшения негативных последствий наводнений и других видов негативного воздействия вод.

На основе этого инструментария разработана «Водная стратегия РФ до 2020 г» [2] и утверждена распоряжением Правительства РФ от 27.08.2009 №1235 для водоресурсного обеспечения «Концепции социально-экономического развития РФ до 2020 г», утверждённой распоряжением Правительства РФ от 17.11.2008 № 1662-р.

Стратегия закрепляет базовые принципы государственной политики в области использования и охраны водных объектов, предусматривает принятие и реализацию управленческих решений по сохранению водных экосистем. Стратегией определён основной круг проблем, на решение которых должны быть направлены основные усилия. В их числе проблема дефицита водных ресурсов в отдельных регионах Российской Федерации;

Среди причин, обуславливающих возникновение дефицита водных ресурсов в Стратегии указано истощение вод, и эта причина ключевая. У больших рек основными источниками водных ресурсов являются их притоки и малые реки среди них наиболее многочисленные (реки, длина которых не превышает 100–150 км, а площадь водосбора – до 2000 кв. км.). На территории России их около трёх миллионов.

Среди задач, которые следует решить в целях повышения качества воды в водных объектах, восстановления водных экосистем и их рекреационного потенциала значится предотвращение деградации малых рек. Предлагается для восстановления и охраны, а также обустройства малых рек в качестве первоочередных мероприятий:

1. сократить антропогенное воздействие рассредоточенного (диффузного) стока;
2. восстановить самоочищающуюся способность рек,
3. реализовать комплекс мероприятий по экологической реабилитации малых рек в городах и сельских поселениях.

Однако, данные меры не позволят в полной мере восстановить полноводность водного режима речной сети, а следовательно, и увеличения объёмов воды, особенно на текущей стадии обмеления малых рек, следовательно все эти вышеперечисленные меры становятся неэффективными.

Непонимание первопричин деградации малых рек происходит, потому что их рассматривают только как водную экосистему и исключительно с потребительской точки зрения. Поэтому для целевых показателей, устанавливаемых СКИОВО, основные усилия направлены на достижение качества воды водных объектов рассматриваемого речного бассейна, а состояние водного режима его экосистемы не указаны вовсе.

Рассматривать состояние речной сети вне контекста экосистемы её водосбора методологически неверно, так как они представляют собой функционально неделимую природную систему. Такой подход требует принципиально новых способов для решения задач по предотвращению деградации малых рек, риска наводнений и иного негативного воздействия вод. По статистическим наблюдениям негативные климатические тенденции будут сохраняться, и усиливаться в будущем, в связи с учащением опасных гидрологических явлений в изменяющихся климатических условиях и продолжающемся антропогенным освоением территорий.

Потребительская ориентация использования водных, земельных и биологических ресурсов водосборных бассейнов, ландшафтов и водных экосистем вызвала негативные экологические последствия. Загрязнение, деградация земель и водных источников, нарастание дефицита воды по количественным и качественным показателям, формирование зон экологического кризиса

определяет необходимость **переориентации водопользования с потребительского аспекта на экосистемный** (3).

Подтверждением такой необходимости является тот факт, что за время реализации Водной стратегии РФ до 2020 года и по сей день, водные объекты продолжают мелеть и деградировать. В последние десятилетия с реками происходят тревожные изменения. Волга и Дон стремительно мелеют [4,5]. Уровень воды падает, судоходство затрудняется, экосистемы деградируют. Появляются высохшие протоки, отмели и заболоченные участки в местах, где ещё недавно проходили теплоходы. Каспийское море стремительно теряет уровень: берег отступает на десятки километров, дно обнажается, некоторые порты становятся непригодными для судоходства. В прибрежной зоне деградируют целые экосистемы, исчезают рыбозаводные участки и прибрежные тростниковые болота, служившие убежищем для птиц и водных животных [6].

Астраханская, Волгоградская и Ростовская области, Калмыкия, Ставрополье, республики Северного Кавказа все чаще сталкиваются с тревожным и почти необратимым явлением - опустыниванием. Сейчас ситуация усугубляется полной утратой системы лесомелиорации [7].

В 1995 году сотрудницей и учёным Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова - С. Я. Бездниной было определено научное направление – «экосистемное водопользование в мелиорации», как ответ на необходимость снизить экологическое «давление» человека на водные экосистемы [8,9]. В ее работах констатируется обязательность синтеза человеческой деятельности, связанной с использованием и охраной водных ресурсов, с жизнью природных экосистем.

Переориентация водопользования с потребительского аспекта на экосистемный отражает функции воды как средства и условия оптимального функционирования экосистемы водосборного бассейна, ландшафта и водной системы. Экосистема водосборного бассейна рассматривается как единое, природное целое, бассейн крупных рек - как единый комплекс экосистем с границами на физико-географической основе.

Как следует из «Водной стратегии РФ до 2020 года», в целях гарантированного обеспечения водными ресурсами необходимо создание методологических и технологических основ экосистемного водопользования, что возможно включить в качестве научно-обоснованных рекомендаций в разрабатываемую новую водную стратегию до 2035 года.

Экосистемное водопользование направлено на восстановление и сохранение функциональной и структурной целостности водосборных бассейнов, ландшафтов и водной системы. Его можно трактовать, как рациональное использование водных ресурсов для всех компонентов экосистемы водосбора речной сети: почвы воды и растений, тесно связанных потоками воды, энергии и вещества.

Экосистемное водопользование рассматривает водосбор речной сети как единую водобалансовую систему с её сложным взаимодействием энерго-массопотоков в воздухе, воде и на суше, поддерживающую устойчивое развитие всех трёх компонентов экосистемы, взаимодополняющих друг друга.

Водная часть экосистемы состоит из поверхностных водоёмов и водотоков, подрусовых и боковых подземных стоков и бассейнов грунтовых и подземных вод, питающих транзитную часть водной системы своими водными ресурсами. Эти водные ресурсы пополняются атмосферными осадками, проникающими в грунт сквозь корневую систему растительного покрова, влагой процесса атмосферной ирригации в почве и влагой конденсации тёплого воздуха внутри пространства растительного покрова. Атмосферные осадки также напрямую выплёскиваются в поверхностные водоёмы и водотоки (Рис.1).



Рисунок 1. Основные компоненты водобалансовой системы.

Figure 1. Main components of the water balance system.

Поверхности водосбора с открытым грунтом прогреваются солнечной радиацией, что приводит к испарению непосредственно грунтовых вод и уменьшению водных ресурсов водной экосистемы водосбора. Испарение влаги многократно ускоряется ветровыми процессами в приземной зоне на открытой местности [10].

В почвенных системах водными ресурсами является сам процесс атмосферной ирригации и обмен влагой с грунтовыми водами и конденсатом влаги в пространстве растительного покрова. Почвенный слой играет роль мембраны для грунтовых и подземных вод. Пока в почве содержится влага, она заграждает грунт от прогрева, тем самым защищает от испарения водные ресурсы водной системы. Если почва высыхает, то начинается процесс нагревания грунта и испарения грунтовых вод.

Растительный покров защищает почву от выветривания влаги, затеняет почвенный слой от солнечной радиации, усиливая в нём процесс атмосферной ирригации, и переводит паводковый и ливневый поверхностный поток воды в грунт сквозь корневую систему. Водными ресурсами растительного покрова экосистемы являются разнообразные источники влаги и водного питания: атмосферные осадки, атмосферная ирригация, грунтовые воды, конденсация влаги воздушных потоков биотического насоса во время процесса транспирации деревьев в лесном массиве [10,11].

Состояние водных ресурсов речной сети зависит от влажности почвенного покрова, которая в свою очередь зависит от достаточности и характера растительного покрова территории водосбора, а состояние растительного покрова определяется в первую очередь состоянием её биоты.

Для определения потенциальных запасов водных ресурсов и водного баланса водосбора речной сети необходимо учитывать процессы взаимодействия между растительной, почвенной и водной компонентами экосистемы. При деградации одной из них нарушается водный баланс в целом. Нарушения взаимодействия или поддержки одной системы другой может сказываться на водном балансе не сразу, но обязательно. Поэтому чтобы восстановить водный потенциал территории водосбора требуется восстановить наибольшее количество всех компонентов экосистемы. Основные компоненты натурального водного баланса с входящим в него водным циклом схематично можно отобразить на схеме (Рис.2).

Натуральный водный баланс (Водный цикл и территориальный водный баланс)

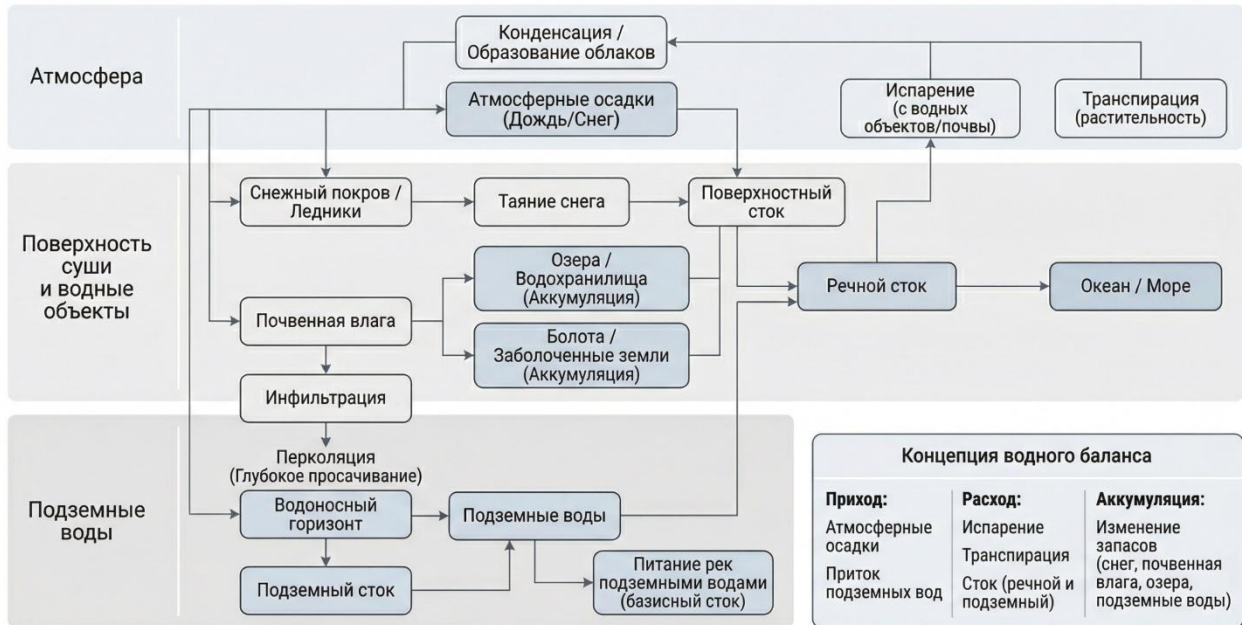


Рисунок 2. Основные компоненты и связи натурального водного баланса.

Figure 2. Main components of the natural water balance system.

Прогноз изменения состояния водосбора как единой водобалансовой системы всех её составляющих возможен методом моделирования вероятной реакции экосистемы при различных сценариях природопользования на территории водосбора. Этому способствуют инструменты геоинформационного моделирования, как одного из новейших способов представления географической информации в динамике на основе технологий, компьютерного, математического и трёхмерного моделирования. Для разработки таких моделей требуется консолидация научного сообщества, поскольку разнообразие речных систем требует привлечения большого количества различных специалистов из разных областей.

В первой статье авторов упоминается о необходимости введения нового понятия - **средообразующие функции растительного каркаса естественной экосистемы речной сети** [12]. Растительный покров экосистемы водосбора имеет ключевые зоны двух типов, распространённых по всей её территории:

- зоны питания речной сети (различные водоразделы и другие зоны, на которых аккумулируются осадки, пополняющие грунтовые и подземные воды, питающие реки);
- береговая зона русел речной сети, которая обеспечивает равномерность водного потока и его защиту от диффузного загрязнения.

Такие зоны требуется отображать в специальных инструментах визуализации крупных территориальных объектов, как правило, в ГИС (Рис.3). Однако, стоит отметить что функционал визуализации сложных динамических процессов в ГИС ограничен функционалом системы. Для наглядной демонстрации и визуализации различных процессов, речных и других экосистем требуются трёхмерные движки, которые на основе ГИС, способны продемонстрировать наиболее полное и комплексное представление о речной системе. При этом, необходимо учитывать что визуализация крупных территориальных объектов, математический аппарат, например гидродинамических моделей будет требовать значительных затрат на аппаратную производительность устройств на которых происходит процесс симуляции.

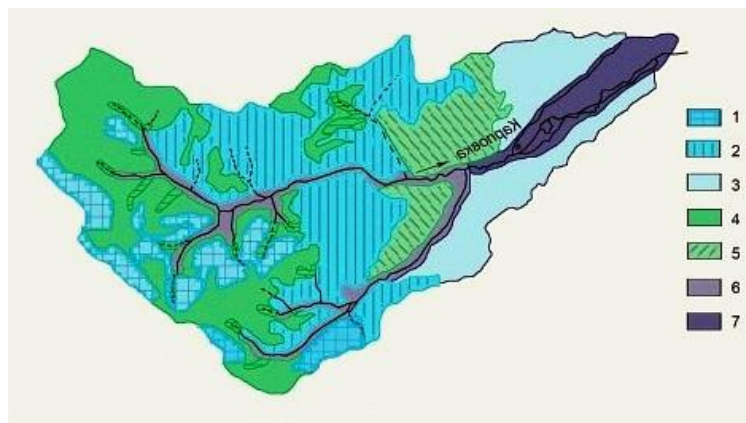


Рисунок 3. Отображение различных зон на примере речной сети.
Figure 3. Display of different zones using the example of a river network.

В этих зонах экосистема водосбора в естественном состоянии (вне антропогенного воздействия) поддерживает необходимые запасы водных ресурсов в грунтовых водах и обеспечивает водный режим речной сети, выполняя следующие средообразующие функции:

- затеняет почву от солнечной радиации, защищая её от перегрева, усиливая тем самым процесс атмосферной ирригации;
- защищает почву и осадки от ветра, ускоряющего испарение влаги;
- оберегает осадки от поверхностного выплёскивания в водные потоки переводя их в грунт;
- обеспечивает механизм биотического насоса, формирующего осадки и конденсацию влаги в глубине лесного массива.

Данные функции реализуются благодаря ненарушенному растительному покрову (прежде всего лесному), а эти зоны являются растительным каркасом речной сети – территорией на которой формируются водные ресурсы и обеспечивается необходимая полноводность и равномерность водных потоков. Геоинформационное моделирование, как инструмент, позволяет создавать точные трёхмерные картографические модели этих зон для формирования границ растительного каркаса и проектов по восстановлению его нарушенных территорий. Динамическая визуализация различных процессов протекающих в речных экосистемах позволяет глубже понять протекающие процессы и установить новые причины и взаимосвязи между рассматриваемыми компонентами.

Для предотвращения истощения вод речной сети необходимо, прежде всего, восстановить средообразующие функции растительного каркаса естественной экосистемы там, где они нарушены. Для этого не обязательно восстанавливать растительный покров в его первоначальном виде. Технологии восстановления этих функций известны с прошлого столетия - это технологии лесомелиорации, основоположником которых был В. В. Докучаев. Его опытная станция «Каменная степь» даёт до сих пор лучшие урожаи в округе. На этих же технологиях был основан и внедрён Сталинский план преобразования природы [13,14]. Применяются они для улучшения климатических условий, прежде всего для сельского хозяйства, а в последнее время и в проектах пермोकультуры.

Для поддержания водных ресурсов **мы предлагаем внести в законодательство** защиту самих механизмов естественной экосистемы формирующих водный баланс рек. Для этого этим функциям естественной экосистемы речной сети необходимо дать юридическое определение, а зонам, особо значимым в формировании водного баланса, придать статус особо ценных природных территорий и закрепить за ними выполнение этих функций, как обременение землепользования.

Поскольку определение границ значимых территорий и необходимых восстановительных работ может быть очень индивидуальным для каждого участка растительного каркаса то возможны поэтапные шаги по реализации этого процесса:

- первым этапом зафиксировать в законодательстве сами определения средообразующих функций растительного каркаса;

- далее разработать механизм определения границ и их юридической фиксации для присвоения территориям растительного каркаса особого статуса;

- и постепенно вводить особый статус на конкретных участках растительного каркаса по мере поступления запросов от местной региональной или федеральной администрации на основании проработки стратегии восстановления средообразующих функций на их территории.

Для обеспечения социально-экономического развития вододефицитных регионов **мы предлагаем дополнить СКИОВО** материалами, для разработки лесомелиоративных проектов восстановления функций растительного каркаса речной сети там, где они нарушены.

Для этого рекомендуем в методические указания по разработке СКИОВО внести:

- в раздел I. Общие положения - целевые показатели полноводности и равномерности водного режима;

- в раздел II. Основные термины и определения - дать определение:

- растительный каркас естественной (вне антропогенного воздействия) экосистемы речного бассейна – территория, на которой формируются водные ресурсы и обеспечивается необходимая полноводность и равномерность водных потоков благодаря растительному покрову, сохраняющему осадки от выветривания и переводящему их в грунт;

- средообразующие функции растительного каркаса – ветрозащита осадков и перевод их в грунт.

- в раздел III. Порядок разработки Схем:

– добавить сбор сведений о возможностях экосистемы речного бассейна поддерживать необходимую полноводность и равномерность водного режима, защиту от диффузного загрязнения речного потока при восстановлении её функций в границах растительного каркаса и о потенциальных запасах водных ресурсов водосбора речной сети;

- определить границы естественного растительного каркаса, зоны его нарушения и функции, которые необходимо восстановить в нарушенных зонах.

Для создания и реализации проектов лесомелиорации по формированию водного баланса на нарушенных участках лесного каркаса в **масштабах территорий водосбора водных объектов мы считаем необходимым** создание инструментов на основе IT технологий для автоматизации процедур проектирования, мониторинга и долгосрочного прогнозирования результатов:

- разработать единую информационную систему учёта и мониторинга состояния речных экосистем на региональном и федеральном уровнях, с картографическим и геопространственным отображением таких зон в целях грамотного и экосистемного управления данными территориями.

- разработать цифровой двойник речной сети для автоматизации процедуры определения границ растительного каркаса естественной экосистемы, выделения его проблемных территорий, определения средообразующих функций, которые необходимо восстановить на нарушенных участках, формирования комплексного экологического мониторинга, контроля и учёта используемой и отводимой воды и создания единой водобалансовой схемы экосистемы;

- разработать симулятор природных процессов для определения потенциальных запасов водных ресурсов водосбора речной сети, прогнозирования изменений водного баланса водосбора и микроклиматических условий в процессе развития проектов лесомелиорации через 5, 10 и более лет и формирования представления о территории речного бассейна как целостной экосистемы;

- инициировать создание интерактивной 3Д геоинформационной модели для визуализации процессов изменений микроклиматических условий состояния экосистем и динамики восстановления и стабилизации необходимой полноводности и равномерности речного потока.

- провести I Международный гидроэкологический форум, для обмена лучшими практиками в области обозначенной тематики, освещения и публикации результатов в данной сфере.

Так как для восстановления водного потенциала территории водосбора необходимо преуспевание всей экосистемы в целом, то цифровой геопространственный двойник речной сети позволит увидеть варианты гармоничного развития территории, раскрывая весь её природный и хозяйственный потенциал, а интерактивное представление в реальном времени сделает процесс согласования проектов с местными интересантами более эффективным и понятным. Более того, для систематизации данных о нарушенных территориях, требующих оперативного вмешательства и проведения цикла работ по восстановлению территорий, требуется государственный реестр зон восстановления, основным инструментом в котором, должна выступать единая информационная система мониторинга территорий требующих восстановления гидрологического режима рек.

Экосистемный подход к природопользованию, позволит достичь процветание экосистемы совместно с хозяйствованием на её территории, что приблизит нас к экосистемному мировоззрению – восприятию себя частью экосистемы биосферы Земли, способной осознанно корректировать рациональное потребление и поддержание ресурсов для совместного развития и благополучия.

Список использованных источников

1. Методические указания по разработке Схем комплексного использования и охраны водных объектов разработаны в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации [от 30 декабря 2006 года N 883](#) и утверждены Приказом МПР РФ от 4 июля 2007 г. N 169 "Об утверждении Методических указаний по разработке схем комплексного использования и охраны водных объектов".
2. «Водная стратегия РФ до 2020 г» утверждена распоряжением Правительства РФ от 27.08.2009 №1235;
3. Безднина С.Я. Принципы и технологии экосистемного водопользования в мелиорации. /автореф. дис. ...доктора техн.наук. ВНИИГиМ. М.,- 1995;
4. Крестин, Е. А. Обмеление реки Волги и пути решения этой проблемы / Е. А. Крестин, Д. П. Скупченко // *Флагман науки*. – 2024. – № 11(22). – С. 385-388. – EDN HORAWL.
5. Сошникова, И. Ю. Заращение и обмеление рек на территории Курской области как опасное гидрологическое явление / И. Ю. Сошникова, Т. М. Масколенко // *Школа Науки*. – 2021. – № 6(43). – С. 95-98. – DOI 10.5281/zenodo.5036820. – EDN SPXZDA.
6. https://dzen.ru/a/aJldHzvz7hB2J7HF?share_to=vk ;
7. <https://rg.ru/2025/09/10/reg-skfo/kak-vetrom-sdulo.html>
8. Шумаков Б.Б., Безднина С.Я. Экосистемное водопользование: исследования и разработки// *Мелиорация и водное хозяйство*. 1995. №1.-С.1-7.;
9. Шумаков Б.Б., Безднина С.Я. Концептуальные принципы экосистемного водопользования /*Мелиорация и водное хозяйство*.1996. №4.-С.20-23.
10. Русин Н.П. Солнце на Земле. — Москва: Сов. Россия, 1971.
11. В. Г. Горшков, А. М. Макарьева Биотический насос атмосферной влаги, его связь с глобальной атмосферной циркуляцией и значение для круговорота воды на суше Гатчина - 2006
12. К вопросу о необходимости создания условий оптимизации водного баланса речной сети путём восстановления гидрологического режима малых рек с помощью технологий лесомелиорации и геоинформационного моделирования / Е. В. Кузнецов, И. Ю. Демин, Е. Л. Леонов [и др.] // *Геоинформационное моделирование*. – 2025. – Т. 2, № 2. – С. 64-71. – EDN MYJIAG.

13. Томилин, В. Н. Сталинский план преобразования природы и некоторые итоги его реализации / В. Н. Томилин // Северо-Запад в аграрной истории России. – 2022. – № 28. – С. 145-154. – EDN UXTQOV.
14. Можаяев, Е. Е. "Сталинский план преобразования природы": опыт продовольственного самообеспечения на основе инноваций / Е. Е. Можаяев, В. Н. Арефьев // Представительная власть - XXI век: законодательство, комментарии, проблемы. – 2018. – № 5-6(164-165). – С. 58-62. – EDN YLTVQL.
15. О необходимости реализации проектов по восстановлению гидрологического режима рек с использованием методов лесовосстановления и технологий геоинформационного моделирования / М. Р. Вагизов, Р. М. Бобровская, И. И. Гайфуллин [и др.] // Лесоводство как искусство гармонии с природой - от профессии к служению экосистеме и будущим поколениям : Сборник научных трудов по материалам Международной научно - практической конференции, посвящённой памяти учёного-лесоведа Бронислава Ильича Гузовского, Казань, 29–30 мая 2025 года. – Казань: Казанский государственный аграрный университет, 2025. – С. 319-327. – EDN AKVXLS.

Reference

1. The Guidelines for Developing Schemes for the Integrated Use and Protection of Water Bodies were developed in accordance with Russian Government Resolution No. 883 of December 30, 2006, and approved by Order No. 169 of the Russian Ministry of Natural Resources of July 4, 2007, "On Approval of the Guidelines for Developing Schemes for the Integrated Use and Protection of Water Bodies."
2. "Water Strategy of the Russian Federation until 2020" was approved by Russian Government Order No. 1235 of August 27, 2009;
3. Bezdina, S. Ya. "Principles and Technologies of Ecosystem-Based Water Use in Land Reclamation." / Abstract of Doctor of Technical Sciences (Eng.) Dissertation. VNIIGiM. Moscow, 1995;
4. Krestin, E. A. Shallowing of the Volga River and Ways to Solve This Problem / E. A. Krestin, D. P. Skupchenko // Flagship of Science. - 2024. - No. 11 (22). - Pp. 385-388. - EDN HORAWL.
5. Soshnikova, I. Yu. Overgrowing and Shallowing of Rivers in the Kursk Region as a Dangerous Hydrological Phenomenon / I. Yu. Soshnikova, T. M. Maskolenko // School of Science. - 2021. - No. 6 (43). - Pp. 95-98. - DOI 10.5281/zenodo.5036820. - EDN SPXZDA.
6. https://dzen.ru/a/aJldHzvz7hB2J7HF?share_to=vk ;
7. <https://rg.ru/2025/09/10/reg-skfo/kak-vetrom-sdulo.html>
8. Shumakov B.B., Bezdina S.Ya. Ecosystem water use: research and development// Land reclamation and water management. 1995. No. 1.-P. 1-7.;
9. Shumakov B.B., Bezdina S.Ya. Conceptual principles of ecosystem water use / Land reclamation and water management. 1996. No. 4.-P. 20-23.
10. Rusin N.P. The Sun on the Earth. - Moscow: Sov. Russia, 1971.
11. V. G. Gorshkov, A. M. Makaryeva Biotic pump of atmospheric moisture, its connection with global atmospheric circulation and significance for the water cycle on land Gatchina - 2006
12. On the issue of the need to create conditions for optimizing the water balance of the river network by restoring the hydrological regime of small rivers using forest reclamation technologies and geoinformation modeling / E. V. Kuznetsov, I. Yu. Demin, E. L. Leonov [et al.] // Geoinformation modeling. - 2025. - Vol. 2, No. 2. - Pp. 64-71. - EDN MYJIAG.
13. Tomilin, V. N. Stalin's plan for the transformation of nature and some results of its implementation / V. N. Tomilin // The North-West in the agrarian history of Russia. – 2022. – No. 28. – P. 145-154. – EDN UXTQOV.

14. Mozhaev, E. E. "Stalin's plan for transforming nature": experience of food self-sufficiency based on innovations / E. E. Mozhaev, V. N. Arefyev // Representative power - the 21st century: legislation, comments, problems. – 2018. – No. 5-6 (164-165). – P. 58-62. – EDN YLTVQL.
15. On the Need to Implement Projects to Restore the Hydrological Regime of Rivers Using Reforestation Methods and Geoinformation Modeling Technologies / M. R. Vagizov, R. M. Bobrovskaya, I. I. Gaifullin [et al.] // Forestry as an Art of Harmony with Nature - from a Profession to Serving the Ecosystem and Future Generations: Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Scientific and Practical Conference Dedicated to the Memory of Forester Bronislav Ilyich Guzovsky, Kazan, May 29–30, 2025. – Kazan: Kazan State Agrarian University, 2025. – pp. 319–327. – EDN AKVXLS.

ROOT CAUSES OF SMALL RIVERS DEGRADATION NOT ACCOUNTED IN THE IMPLEMENTATION OF THE "RUSSIAN FEDERATION WATER STRATEGY" AND POSSIBLE WAYS TO CORRECT THE SITUATION BASED ON DIGITAL MONITORING SYSTEMS

Evgeny Leonidovich Leonov

Geophysicist

CEO of the ANO RPPT "Unique Landscapes"

Email: leonovell@mail.ru

Ivan Evgenievich Leonov

Programmer

Head of the Natural Process Modeling Department of the ANO RPPT "Unique Landscapes"

Email: netlie.ivan.leonov@yandex.ru

Vitaly Nikolaevich Sazanov

Biotechnologist of Biological Treatment Facilities,

Scientific Director of the ANO RPPT "Unique Landscapes"

Email: sazavit@yandex.ru

Marsel Ravilevich Vagizov

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Vice-Rector for Information Technology and Digital Transformation
of the Russian State Hydrometeorological University

Saint Petersburg

Email: bars-tatarin@yandex.ru

© Леонов Е.Л., Леонов И.Е., Сазанов В.Н., Вагизов М.Р. 2026

ISSN 3033-6813

Научно-практический журнал

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Geoinformation modeling

Выпуск 3 (3)

Верстка *И. А. Лысенко*
Редактор *Н. В. Меламед*

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

Подписано в печать: 31.10.2026.