

Сетевой научно-практический журнал

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТРАНСПОРТ



НИИАС

№1 (33)

МАРТ 2025

ISSN 3033-6007



ТРАНСПОРТНЫЕ
И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ, ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОИЗВОДСТВА НА ТРАНСПОРТЕ

УПРАВЛЕНИЕ
ПРОЦЕССАМИ
ПЕРЕВОЗОК

ИСКУССТВЕННЫЙ
ИНТЕЛЛЕКТ
И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ
ТРАНСПОРТНЫЕ
СИСТЕМЫ

Сетевой научно-практический журнал
«Интеллектуальный транспорт»

Издается с 2017 года

Издатель:



АО «НИИАС»

Адрес редакции:

109029, г. Москва, Нижегородская ул., дом
27, строение 1

Email: journal@vniias.ru

Телефон: +7 (916) 433-60-72

Сайт: <http://www.intelligent-transport.ru/>

Свидетельство о регистрации

Сетевой научно-практический журнал
«Интеллектуальный транспорт» публикует
основные научные результаты соискате-
лей учёной степени кандидата и доктора
наук по следующим специальностям и со-
ответствующим им отраслям науки:

**1.2. Компьютерные науки и информа-
тика** (1.2.1. Искусственный интеллект и
машинное обучение (физико-математиче-
ские науки))

2.9. Транспортные системы (2.9.1.
Транспортные и транспортно-технологиче-
ские системы страны, ее регионов и горо-
дов, организация производства на транс-
порте (технические науки); 2.9.4. Управле-
ние процессами перевозок (технические
науки); 2.9.8. Интеллектуальные транс-
портные системы (технические науки))

Журнал включен в базу данных Россий-
ского индекса научного цитирования
(РИНЦ)

Полная или частичная перепечатка, ска-
нирование любого материала текущего
номера возможны только с письменного
разрешения редакции.

Мнение редакции может не совпадать с
точкой зрения авторов. Редакция не несет
ответственности за содержание рекламы.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Суханов Андрей Валерьевич

к.т.н., доцент, заместитель начальника Отде-
ления инновационных и интеллектуальных техно-
логий цифровой станции Ростовского филиала
АО «НИИАС»

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Розенберг Ефим Наумович

д.т.н., профессор, первый заместитель
генерального директора АО «НИИАС»

Соловьева Юлия Геннадьевна

Ответственный секретарь журнала, главный
специалист Департамента корпоративных
коммуникаций АО «НИИАС»

Алиев Вугар Амирович

д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотруд-
ник Института физики Республики Азербайджан

Бородин Андрей Федорович

д.т.н., профессор, начальник отдела
АО «ИЭРТ»

Бочков Константин Афанасьевич

д.т.н., профессор «БелГУТ» (Республика
Беларусь)

Броневиц Андрей Георгиевич

д.ф.-м.н., главный научный сотрудник
АО «НИИАС»

Бутакова Мария Александровна

д.т.н., профессор, главный научный сотрудник
Ростовского филиала АО «НИИАС»

Грибова Валерия Викторовна

чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор, заместитель
директора по научной работе ДВО РАН
(г. Владивосток)

Гришаев Сергей Юрьевич

к.т.н., заместитель Генерального директора –
директор Ростовского филиала АО «НИИАС»

Гуров Юрий Владимирович

к.т.н., начальник Центра разработки
программного обеспечения Ростовского
филиала АО «НИИАС»

Долгий Игорь Давидович

д.т.н., профессор, Научный руководитель
лаборатории РГУПС

Ковалев Сергей Михайлович

д.т.н., профессор, научный руководитель
Ростовского филиала АО «НИИАС»

Коваленко Николай Иванович

д.т.н., профессор РУТ (МИИТ)

Котенко Алексей Геннадьевич

д.т.н., профессор, главный научный сотрудник
АО «ВНИИЖТ»

Ли Инь

к.ф.-м.н., доцент Харбинского
технологического института (КНР)

Матюхин Владимир Георгиевич

д.т.н., председатель Экспертного совета
АО «НИИАС»

Ольгейзер Иван Александрович

к.т.н., доцент, первый заместитель директора
Ростовского филиала АО «НИИАС»

Папич Любиша

д.т.н., профессор, директор
Исследовательского центра DQM
(Республика Сербия)

Попов Павел Александрович

к.т.н., заместитель генерального директора –
директор Санкт-Петербургского филиала
АО «НИИАС»

Сабанов Алексей Геннадьевич

д.т.н., главный эксперт Научно-технического
комплекса технологий информационного
общества АО «НИИАС»

Соколов Сергей Викторович

д.т.н., профессор РГУПС, главный научный
сотрудник АО «НИИАС»

Хабаров Валерий Иванович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
СГУПС (г. Новосибирск)

Хатламаджиян Агоп Ервандович

к.т.н., доцент, заместитель генерального
директора АО «НИИАС»

Чжан Дачжи

Профессор Харбинского технологического
института (КНР)

Шабалин Николай Григорьевич

д.т.н., профессор, руководитель Департамента
научных исследований, аналитики и совершен-
ствования научно-технической деятельности
АО «НИИАС»

Шубинский Игорь Борисович

д.т.н., профессор, главный эксперт
Департамента научных исследований,
аналитики и совершенствования научно-техни-
ческой деятельности АО «НИИАС»

Юдин Дмитрий Александрович

к.т.н., старший научный сотрудник,
заведующий лабораторией МФТИ

Яковлев Константин Сергеевич

к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник
ФИЦ ИУ РАН

ОГЛАВЛЕНИЕ

Бочков А.В. ПЕРСПЕКТИВЫ И РИСКИ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	4
Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Боровлев П.В. ВЫПРАВКА СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ.....	21
Пузеренко А.В., Максимов К.Ю., Боровлев П.В., Суханов А.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ «ОШИБОЧНОГО» КЛАССА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ НОМЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ	30
Юдин Д.А., Мелехин А.А., Линок С.А. ОТКРЫТЫЙ ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ РОБОТОВ НА РАЗРЕЖЕННОЙ 3D-КАРТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ МЕСТА	37
Дулин С.К., Духин С.В. ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗНАНИЙ В ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ	49
Коваленко Н.И., Мочалов Н.А. ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ	66
Никитченко С.П., Игнатьева О.В. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОПРИВОДА.....	75

УДК 629.4.053:004.896

ПЕРСПЕКТИВЫ И РИСКИ ВНЕДРЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

Бочков А.В., д.т.н., АО «НИИАС», Москва, Россия

E-mail: a.bochkov@vniias.ru

Аннотация

В статье приведён критический обзор широкого спектра современных публикаций отечественных и зарубежных авторов в области развития и внедрения интеллектуальных систем управления и интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на железнодорожном транспорте. Отмечено, что перспективы внедрения разумных систем управления на железнодорожном транспорте являются многообещающими, особенно с точки зрения повышения безопасности, надежности и операционной эффективности. Эти системы объединяют искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение и предиктивную аналитику данных для оптимизации операций, управления трафиком и улучшения протоколов обслуживания. Вместе с тем, показано, что существуют риски увлечения «модным» течением цифровизации без системного анализа такой необходимости и возможности в прикладных областях его применения, т.е. без концептуального проектирования среды функционирования ИТС. В статье даны практические рекомендации снижения данных рисков на основе базовых принципов сквозной концептуальной технологии цифровизации.

Ключевые слова: искусственный интеллект, предиктивная аналитика, железнодорожные системы, риск, интеллектуальные транспортные системы, концептуальное проектирование.

PROSPECTS AND RISKS OF IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS IN RAILWAY TRANSPORT

Bochkov A.V., Doctor of Technical Sciences, JSC "NIIAS", Moscow, Russia

E-mail: a.bochkov@vniias.ru

Abstract

The article provides a critical review of a wide range of modern publications by domestic and foreign authors in the field of development and implementation of intelligent control systems and intelligent transportation systems (ITS) in railway transportation. It is noted, that the prospects for the introduction of intelligent control systems in railway transportation are promising, especially in terms of improving safety, reliability, and operational efficiency. These systems combine artificial intelligence (AI), machine learning, and predictive data analysis to optimize operations, manage traffic, and improve service protocols. At the same time, it is shown that there is a risk of being carried away by the "fashionable" trend of digitalization without a systems analysis of its necessity and possibilities in the application areas, i.e. without a conceptual design of the ITS operating environment. The article gives practical recommendations on how to reduce these risks based on the basic principles of end-to-end conceptual technology of digitization.

Keywords: artificial intelligence, predictive analytics, railway systems, risk, intelligent transport systems, conceptual design.

Введение

Железнодорожная отрасль обладает весомым потенциалом развития транспортной доступности регионов стран, для реализации которого необходимо решить сложные технологические и социальные проблемы, а также разработать современные методики, полностью отвечающие специфическим потребностям самых разных типов и условий железнодорожной инфраструктуры. Методы ИИ все чаще и успешнее применяются для решения практических задач в области железнодорожной инфраструктуры. Методы ИИ применяются для оптимизации сложных железнодорожных систем, проактивного обнаружения неисправностей и повреждений инфраструктуры, повышения безопасности городских железнодорожных сетей и улучшения качества обслуживания пассажиров [1]. Ожидают [2], что ИИ в обозримом будущем станет привычным инструментом, используемым во всей железнодорожной отрасли.

Несомненно, ИИ окажет значительное влияние на железнодорожный транспорт, революционизируя такие области, как управление пропускной способностью, техническое обслуживание, прогнозирование пассажиропотока и снижение зависимости от человеческого фактора. Это позволит создать высокоавтоматизированные и самоадаптирующиеся системы. Например, Toshiba разработала ИИ-систему для оптимизации расписания поездов компании Greater Anglia (Великобритания) [3], а французский оператор SNCF внедрил предиктивное обслуживание на основе ИИ для пригородных поездов Transilien в Париже [4].

ОАО «РЖД» по состоянию на сентябрь 2024 года реализованы 28 систем, в которых задействованы технологии ИИ. Одной из ключевых сфер применения таких алгоритмов являются речевые сервисы, которые позволяют обрабатывать около 50% всех обращений клиентов без участия человека [5].

1. Уточнение терминологии

В первую очередь уточним само определение широко применяемого в настоящее время понятия «искусственный интеллект». В английском языке AI (artificial intelligence) слово *intelligence* переводится как «умение рассуждать разумно», а вовсе не «интеллект» (для которого есть соответствующий английский аналог – *intellect*). Следствием неверного перевода термина, впервые предложенного Джоном Маккарти¹ ещё в 1956 году, являются необоснованные страхи и опасения, активно нагнетаемые журналистами и т.н. «нейроучеными» в общественном сознании о близкой отмене «искусственным интеллект» человека как вида вообще. Кроме того, отсутствие чётко формализованного определения используемого понятия вносит хаос в обсуждения как самого явления, получившего название «искусственный интеллект», так и областей его возможного и наиболее эффективного практического применения.

Первичное определение связывает ИИ с любыми машинами, действующими таким образом, который воспринимается сторонним наблюдателем как разумное поведение [6] или демонстрирующими типичные для человеческого мышления характеристики.

¹ Джон Маккарти (англ. *John McCarthy*; 4 сентября 1927, Бостон - 24 октября 2011, Стэнфорд) – в американский информатик, автор термина «искусственный интеллект» (1956), изобретатель языка Лисп (1958), основоположник функционального программирования, лауреат премии Тьюринга (1971) за огромный вклад в область исследований искусственного интеллекта.

Согласно тесту Тьюринга [7] машину можно считать разумной, если в процессе диалога с беспристрастным наблюдателем, последний не сможет отличить её поведение и ответы от человека.

Словари определяют интеллект (от лат. *intellectus* «восприятие»; «разумение», «понимание»; «понятие», «рассудок») или ум как качество психики, состоящее из способности осознать новые ситуации, способности к обучению и запоминанию на основе опыта, пониманию и применению абстрактных концепций, и использованию своих знаний для управления окружающей человека средой. Общая способность к познанию и решению проблем, которая объединяет познавательные способности: ощущение, восприятие, память, представление, мышление, воображение.

То есть, интеллект – это способность субъекта к обучению и адаптации в ответ на возникающие изменения внешней среды. Способность – одно из свойств субъекта. Машина в настоящее время не обладает субъектностью, поскольку она не определяет самостоятельно цель своей деятельности. Она способна функционировать только в рамках заданной человеком цели оптимальным образом выбирая лучший из заданных алгоритмов в условиях всевозможных ограничений, демонстрируя при этом элементы самообучения и совершенствуя алгоритмы выбора для повышения результативности и эффективности деятельности.

Путаница с определением термина привела в настоящее время к хаосу в программах развития ИИ, а также в стандартах. Например, Стратегия развития ИИ определяет [8] ИИ как комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных задач результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Близкое определение дает ГОСТ Р 59277-2020, в котором [9] ИИ – это комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека².

В то же время ГОСТ Р 59276-2020 определяет [10] ИИ как способность технической системы имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека.

ИИ определяется также как компьютеризированная система, способная выполнять физические задачи и имитирующая когнитивные функции, решать различные проблемы или принимать решения без явных инструкций от оператора [11].

К настоящему времени введены более структурированные и подробные определения, например, определения Европейской комиссии, 2018 [12], Европейской комиссии и Объединенного исследовательского центра, 2019 [13] и, наконец, определение Британской энциклопедии [14]. Эти определения, пытаясь охватить широкую природу ИИ и его потенциальную область практического применения, являются слишком абстрактными для некоторых областей применения и, следовательно, с меньшей вероятностью будут широко приняты. В целом же, такие общие

² Примечание — Комплекс технологических решений включает в себя информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных, анализу и синтезу решений.

определения, как правило, снижают понимание, что приводит к отсутствию общего согласия относительно того, что на самом деле представляет собой ИИ.

В качестве рабочего для железнодорожного транспорта можно принять определение ИИ, данное в работе [15]. ИИ определен авторами как дисциплина, позволяющая системе обучаться на основе наблюдений, взаимодействия с окружающей средой и конкуренции или обмена информацией с другими субъектами. Это определение подчеркивает ключевые аспекты ИИ, важные для железнодорожной сферы:

1. Способность обучаться на примерах, а не следовать жестко заданным алгоритмам.
2. Умение работать в среде с другими субъектами, не теряя фокуса на задаче.
3. Выполнение задач, требующих интеллекта в человеческом понимании.
4. Отсутствие тривиальной автоматизации.
5. Универсальность реализации (аппаратная, программная или гибридная).

ИИ включает также такие, несомненно перспективные, направления, как машинное обучение (ML) и глубокое обучение (DL). Оба направления связаны с обучением нейронных сетей на данных без явного программирования. Обсуждение данного направления оставляем за пределами настоящей статьи, однако заметим, что в последние годы уровень технологий позволил инженерам создавать все более сложные нейросетевые модели, способные автоматически извлекать признаки из данных, что обеспечивают глубокое обучение, позволяющее «вычислительным моделям, состоящим из нескольких слоев обработки, изучать представления данных с несколькими уровнями абстракции» [16]. Развитием данного направления заняты и отечественные исследователи. Например, в статье [17] представлен разрабатываемый авторами агент-наставник — система ИИ для обучения профессиональным навыкам с использованием технического оборудования, например тренажеров. Агент моделирует деятельность опытного наставника и использует рассуждения на основе здравого смысла. Его реализация основана на событийном исчислении как расширении логики первого порядка. Рассмотрена архитектура обучающего комплекса с агентом-тьютором, включая его применение для подготовки персонала сортировочного парка железнодорожной станции.

Предложенное выше определение, тем не менее, остается дискуссионным и обсуждается во многих работах современных авторов [16, 18].

2. Области применения интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте

В литературе имеется ряд обзорных статей, посвященных применению ИИ на железных дорогах. В работе [19] проведён обзор применения аналитики больших данных в железнодорожном машиностроении и транспорте. В [20] рассмотрено текущее и потенциальное использование ИИ в железнодорожных активах, а в [21] представлен обзор подходов, основанных на данных, для управления диспетчеризацией поездов, включая статистические методы, графические модели и машинное обучение (МО). Chenariyan Nakhaee et al. (2019) [22] проанализировали применение МО в обслуживании железнодорожных путей, предложив таксономию для классификации литературы, выявив недостатки методов и предложив направления для исследований. Лю и др. (2020) [23] рассмотрели технологии визуального контроля на основе обработки изображений в железнодорожной отрасли. В [24] систематически изучен прогноз городского потока на основе пространственно-временных данных, а также обсуждаются методы МО, их ограничения и перспективы.

Обзор устойчивости железнодорожной системы с упором на количественные подходы был представлен в работе [25]. В этом обзоре также обсуждаются метрики оценки устойчивости, содержащие подходы, основанные на данных и оптимизации.

Корман и Мэн (2015) представили [26] обзор последних подходов к проблемам перепланирования онлайн-железнодорожных перевозок, с учетом как динамических, так и стохастических аспектов. Авторы пришли к выводу, что наиболее распространёнными подходами являются модели, основанные на оптимизации.

Однако в литературе, посвящённой применению ИИ на железных дорогах, отсутствует комплексный обзор, который, желательно, с одной стороны, принимал бы широкую перспективу ИИ, а с другой стороны, рассматривал бы железнодорожную систему в целом, т.е. учитывал взаимосвязи различных областей железнодорожной отрасли.

Чтобы понять текущее положение с применением ИИ на железных дорогах, рассмотрим ключевые подбласти его применения.

2.1. Повышение уровня безопасности и надежности железнодорожного транспорта

Системы непрерывного мониторинга могут интегрироваться с управлением движением поездов для управления надежностью железнодорожной инфраструктуры и обеспечения более безопасных эксплуатаций [27]. Системы непрерывного мониторинга на железнодорожном транспорте необходимы для повышения безопасности, надежности и операционной эффективности. В этих системах используются передовые технологии для постоянной оценки состояния железнодорожной инфраструктуры и параметров поездов, что позволяет своевременно принимать меры и проводить техническое обслуживание.

Системы непрерывного мониторинга могут интегрироваться с системой управления движением поездов для оценки надежности железнодорожной инфраструктуры, что позволяет упреждающе управлять рисками безопасности [28].

Автоматизированные системы могут непрерывно отслеживать шунтирующее воздействие рельсовых цепей, что крайне важно для предотвращения аварий из-за сбоев в системах сигнализации [29].

Инновационные системы, использующие датчики Интернета вещей и периферийные вычисления, обеспечивают мониторинг параметров поездов, таких как скорость и загрузка, в реальном времени, повышая эксплуатационную безопасность без использования ресурсов рельсов [30].

Обнаружение гофрированных рельсов: непрерывный мониторинг рифленности рельсов с помощью измерений ускорения в буксовых коробках помогает выявлять потребности в техническом обслуживании, снижать уровень вибраций и количество жалоб от жителей близлежащих местностей [31].

Новые методологии с использованием стохастических сетей Петри со стохастическим временем P позволяют отслеживать эффективное время пребывания в железнодорожных системах, облегчая обнаружение и диагностику эксплуатационных неисправностей [32].

Статья [33] посвящена оценке функциональной безопасности (ФБ) интеллектуальных систем управления (ИСУ). Традиционные методы недостаточно эффективны для ИСУ из-за их нечёткой архитектуры и динамических связей между элементами. Для обоснования ФБ ИСУ необходимо использовать комплекс методов, рекомендованных ГОСТ 33432-2015, включая организационные меры, аналитиче-

ские, экспериментальные, экспертные и технологические подходы, а также имитационное моделирование. В качестве перспективного предложен эвристический графовый полумарковский метод, который рекомендуется сочетать с технологическим методом, описанным в ГОСТ Р МЭК 61508. Такой комплексный подход позволит не только уверенно оценить ФБ ИСУ, но и разработать рекомендации для достижения приемлемых уровней безопасности.

Технологии ИИ способствуют повышению безопасности, предоставляя возможности анализа данных и прогнозирования в реальном времени, которые помогают выявлять потенциальные опасности до их возрастания. Интеграция ИИ с технологиями Интернета вещей (IoT) и цифровых двойников (Digital Twin) позволяет осуществлять интеллектуальное планирование и управление, что еще больше усиливает меры безопасности [34].

ИИ значительно повышает надежность железнодорожной инфраструктуры за счет использования алгоритмов глубокого обучения для анализа обширных наборов данных (как оперативных, так и архивных). В результате интеграция ИИ не только продлевает срок службы железнодорожных активов, но и повышает безопасность и надежность обслуживания, в конечном итоге сокращая время простоя в эксплуатации и расходы, связанные с непредвиденными отказами [35]. В статье представлена комплексная структура, использующая алгоритмы машинного обучения для анализа больших наборов данных, поступающих с датчиков, архивных записей о техническом обслуживании и эксплуатационных показателей, что позволяет выявлять закономерности и прогнозировать потенциальные сбои до их возникновения. Такой подход оптимизирует графики технического обслуживания и продлевает срок службы железнодорожных активов. Тематические исследования, обобщенные в статье, демонстрируют эффективность методологий, основанных на ИИ, в реальных сценариях. Они свидетельствуют о снижении затрат, усилении мер безопасности и повышении надежности обслуживания, подчеркивая тем самым преобразующий потенциал ИИ и глубокого обучения в управлении железнодорожной инфраструктурой.

В статье [36] рассмотрен опыт применения нейронных сетей для автоматизации движения поездов в части использования технического зрения для обнаружения препятствий и распознавания железнодорожных знаков и сигналов через обучение нейронных сетей.

Работа [37] посвящена анализу механизмов формирования рекомендаций и оценки реакции на них в интерактивном режиме работы пользователя с геоинформационной системой. Рекомендательные системы играют важную роль в поиске и принятии решений в пространственных ситуациях, где часто присутствует неопределенность и неоднозначность. Пользователи сталкиваются с нечетко сформулированными проблемами, что требует выбора направления поиска и последовательности задач с ясными входными и выходными данными. В данной работе исследуется интеллектуальная рекомендательная система, которая использует диалоговое взаимодействие для изучения проблем. Предлагается модель адаптации к ментальному образу проблемы, учитывающая ситуационную осведомленность и когнитивную нагрузку пользователя. Модель включает визуальные картографические объекты как индикаторы ментального состояния. Рекомендации представлены в виде объектов для картографического анализа, что способствует повышению осведомленности. Также предложен критерий удовлетворенности рекомендациями и диаграмма состояний системы, описывающая подбор контекста для решения задач. Контексты рассматриваются как прецеденты опыта, а их последовательности оцениваются по показателям тренда и ритма, что позволяет ускорить адаптацию.

В статье [38] ИИ рассмотрен как система взаимодействия «человек-компьютер». Обозначены ключевые задачи Стратегии цифровой трансформации

ОАО «РЖД», связанные с ИИ. Описаны разработки и применения ИИ в железнодорожной отрасли, включая управление движением, диагностику инфраструктуры, безопасность, обучение персонала и экологию. Также приведён обзор решений в области анализа больших данных, обнаружения объектов, видеоаналитики и поддержки принятия решений.

2.2. Диагностика и мониторинг в режиме реального времени

Системы ИИ, использующие нечеткую логику и нейронные сети, обеспечивают диагностику железнодорожных путей в реальном времени, повышая эксплуатационную надежность и безопасность [39]. В статье представлено инновационное решение, использующее ИИ, в частности нечеткую логику и метаэвристику, для исследования состояния железнодорожных путей в реальном времени, повышая эксплуатационную надежность и безопасность в железнодорожном секторе.

Разработанная технология применима не только для диагностики инфраструктуры традиционных железных дорог, но и для городских железнодорожных систем, таких как трамваи и метро, обеспечивая тем самым высокий уровень безопасности пассажиров и способствуя модернизации и повышению эффективности железнодорожной отрасли. Эти системы применимы к городским железным дорогам, таким как трамваи и метро, и обеспечивают высокий уровень безопасности пассажиров.

Системы мониторинга на базе ИИ объединяют алгоритмы машинного обучения и компьютерное зрение, чтобы революционизировать традиционные методы мониторинга железных дорог [40]. В статье представлена усовершенствованная система мониторинга железных дорог на основе ИИ, которая интегрирует различные алгоритмы машинного обучения, такие как метод опорных векторов, случайный лес и рекуррентные нейронные сети. Эта система решает задачи анализа и профилактического обслуживания в реальном времени для традиционных железнодорожных систем. С применением компьютерного зрения и аналитики данных, она направлена на трансформацию методов мониторинга, что в итоге должно повысить безопасность, надежность эксплуатации и оптимизацию ресурсов транспортной инфраструктуры.

Системы мониторинга на основе ИИ используют алгоритмы машинного обучения для анализа в реальном времени и профилактического обслуживания, что значительно сокращает время простоя [41]. Технологии компьютерного зрения улучшают обнаружение неисправностей и оптимизацию ресурсов, обеспечивая эксплуатационную надежность.

При принятии решений о возможности использования систем ИИ для решения ответственных задач обработки данных и управления обязательным условием является понимание потребителем и другими заинтересованными сторонами функциональных характеристик этих систем в предусмотренных условиях эксплуатации. В [41] предпринята попытка формулировки и интерпретации задачи оценки функциональных характеристик систем ИИ с позиций метрологии. Показано, что в метрологическом контексте задача оценивания функциональных характеристик систем ИИ может быть рассмотрена по аналогии с оценкой соответствия средств измерений. Последние представляют собой в этом случае тестовые наборы данных, от репрезентативности которых зависит погрешность измерений функциональных характеристик. Рассмотрен механизм формирования погрешности измерений. В качестве моделей измерений предложены модели с использованием эталонных наборов данных, оценкой репрезентативности тестовых наборов данных и с использованием эталонных алгоритмов машинного обучения.

В статье [42] представлен инновационный метод формирования показателей работы грузовой сортировочной станции, использующий информацию от считывающих устройств и датчиков, установленных на путях (т.н. «данные от колеса»). Подчеркнуты актуальность и достоверность предлагаемого подхода, который позволяет получать точные данные о работе станции. Метод реализован с использованием системы мониторинга перемещений вагонов и локомотивов в режиме реального времени. Обнаружены расхождения между результатами, полученными с помощью этого метода, и данными, содержащимися в отчетах ОАО «РЖД», предложены гипотезы, объясняющие эти различия.

В статье [43] представлена новая технология интеллектуального мониторинга железнодорожных перевозок на основе динамического метода главных компонент. Метод включает рекурсивный алгоритм для вычисления ключевых признаков и три статистических критерия для принятия решений. Демонстрируется эффективность рекурсивных алгоритмов адаптивного мониторинга слабоформализованных процессов в режиме реального времени. Учитывая медленные изменения в технологических процессах (старение оборудования, дрейфы датчиков, обслуживание и модернизация), предложенная схема мониторинга может широко применяться на железнодорожном транспорте.

В статье [44] рассмотрены методы повышения точности прогнозирования и классификации несбалансированных данных, с акцентом на редкие события. При использовании машинного обучения для прогнозирования редких событий возникает проблема, когда качество моделей не соответствует их реальной способности предсказывать такие события. Исследуются подходы к обучению моделей на несбалансированных данных, в частности, на примере данных об инцидентах и опасных событиях на объектах железнодорожного электроснабжения. Несбалансированность данных выражается в значительном дисбалансе между классами событий. Для улучшения качества моделей классификации и прогнозирования применяются различные методы, такие как FAST³, нечёткие классификаторы, GridSearchCV⁴, а также методы сэмпинга данных, включая NearMiss⁵, который позволяет экспериментировать с пропорциями классов. Проблема дисбаланса классов в анализе инцидентов на железнодорожном транспорте сохраняется с 2015 года. Несмотря на снижение доли опасных событий с 2018 года, их рост возможен. Статистика указывает на отсутствие устойчивого снижения и периодические пики. Проведен анализ методов работы с несбалансированными данными, изучены их сильные и слабые стороны, а также уточнена терминология, связанная с дисбалансом классов. В результате экспериментов с методом NearMiss удалось повысить точность классификации редких опасных событий с 0 до 70-90%.

³ Методика системного анализа функций - Function Analysis System Technique - является одним из наиболее сильных и простых механизмов анализа и классификации функций. FAST позволяет найти взаимозависимости между функциями, на основе которых формируется структура модели, т.е. субъективный подход сведен к минимуму. Цель FAST - раскрытие выраженных в функциональной форме значительных черт и признаков рассматриваемой проблемы, а также расположение их в какой-либо логической последовательности и стимулирование поиска наиболее эффективных способов осуществления функций.

⁴ Алгоритм поиска по сетке – это метод подбора оптимальных гиперпараметров для модели путем перебора всех возможных комбинаций значений гиперпараметров из заданного набора. Гиперпараметры – это параметры модели, которые не оптимизируются во время процесса обучения, а задаются до его начала.

⁵ Метод NearMiss – это метод недостаточной выборки. Он пробует сбалансировать распределение классов путём случайного исключения наблюдений из больших классов. Если экземпляры из двух разных классов очень похожи между собой, метод удаляет наблюдение из мажоритарного класса.

2.3. Системы управления на железнодорожном транспорте

Системы управления играют ключевую роль в обеспечении безопасных расстояний между поездами и предотвращении столкновений, что значительно повышает эксплуатационную безопасность [45]. Для обработки неопределенных данных разрабатываются интеллектуальные транспортные системы, что существенно увеличивает надежность и эксплуатационную эффективность [46]. Технологии ИИ также вносят свой вклад, обеспечивая глобальную оптимальную диспетчеризацию без участия оператора, что дополнительно повышает эффективность эксплуатации [47]. Интегрированные системы, в свою очередь, создают условия для синергетической транспортировки с использованием нескольких видов транспорта, обеспечивая бесперебойную связь и координацию [48]. Кроме того, высокоскоростные системы автоматического управления способствуют повышению пунктуальности и безопасности, устраняя сложности, связанные с современными железнодорожными сетями. В совокупности эти технологии и системы способствуют созданию более безопасной, надежной и эффективной транспортной инфраструктуры.

Интеллектуальные технологии, такие как сигнализация в кабине и системы помощи водителю, решают проблемы безопасности и уменьшают человеческий фактор в высокоскоростных железнодорожных системах. Эти технологии обеспечивают высокий уровень автоматизации, улучшают управление движением и связь в железнодорожной сети. Интеллектуальные технологии трансформируют высокоскоростные железные дороги (HSR), повышая безопасность, эффективность и оперативное управление. Интеграция ИИ и машинного обучения в различные аспекты систем HSR решает такие проблемы, как пробки на дорогах и человеческий фактор, что в конечном итоге приводит к повышению качества обслуживания и удовлетворенности пассажиров. Системы ИИ способствуют оптимальной глобальной диспетчеризации без участия оператора, обеспечивая эффективное планирование движения поездов и распределение ресурсов [49]. Эти системы обеспечивают синергетическую транспортировку несколькими видами транспорта и повышают общую эффективность сети.

Децентрализованные механизмы управления, такие, как системы на основе токенов, предлагают экономичные решения в области безопасности, предотвращая движение нескольких поездов по одному и тому же маршруту [50].

Стратегии устранения перебоев в железнодорожном сообщении позволяют свести к минимуму влияние на пассажиров за счет изменения расписания перевозок на основе исторических моделей использования [51].

Такие технологии, как камеры линейного сканирования и LiDAR, позволяют проводить комплексные проверки, повышать точность обнаружения дефектов и снижать затраты на техническое обслуживание [52]. В статье освещается интеграция передовых технологий, таких как камеры линейного сканирования, LiDAR и датчики Интернета вещей, которые позволяют проводить комплексные 360-градусные проверки железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, значительно повышая точность обнаружения дефектов и снижая затраты на техническое обслуживание. В статье также обсуждается переход от реактивных к упреждающим стратегиям технического обслуживания, чему способствует непрерывный мониторинг и анализ на основе ИИ, что обещает повысить безопасность и эффективность железнодорожного транспорта за счет предотвращения аварий и обеспечения целостности конструкций.

В работе [53] рассматривается анализ системы управления движением поездов и предлагается реализовать адаптивную систему управления с использованием су-

существующих цифровых систем на базе развертывания виртуального вычислительного комплекса на сервере централизации, вопросы безопасности каналов связи с учетом возможных кибератак и использования сетей Петри для моделирования надежности. Приведена диаграмма и результаты расчетов, показывающие, что управление хостом является наиболее эффективной мерой безопасности. Исследована структура управления движением поездов. На базе существующих цифровых систем предложено внедрение адаптивного управления локомотивами, которое оптимизирует режим движения в условиях неопределённости. Для этого требуется развернуть виртуальный вычислительный комплекс на сервере диспетчерской централизации, передав ему расчёт параметров движения.

В статье [54] рассмотрена ситуация регулирования движения отцепов на сортировочной горке, реализована задача контроля отцепов в сортировочном парке, предложен частный алгоритм ее решения, а также проведен расчет времени прохода первым отцепом участка первой тормозной позиции и межпозиционного участка. Описана схема размещения оборудования компьютерного зрения на станции Инская. Приведены результаты контроля занятости сортировочных путей, включая график распределения отцепов и аффинные преобразования кадров видеонаблюдения. Также рассмотрены перспективные направления внедрения систем компьютерного зрения для автоматизации контроля сортировочных процессов на железной дороге.

Одной из важнейших проблем синтеза интеллектуальных динамических систем является проблема идентификации структур стохастических объектов, наблюдаемых в условиях различных возмущающих воздействий. В [55] исследованы методы стохастической идентификации многоструктурных нелинейных динамических объектов, наблюдаемых в условиях негауссовских помех. Для решения задачи структурной идентификации дискретных объектов со случайной сменой структуры разработан принципиально новый подход, основанный на использовании нелинейных вероятностных критериев. Приведен пример идентификации нелинейного объекта с негауссовскими возмущениями.

2.4. Комфорт пассажиров и надежность инфраструктуры

Технологии ИИ находят широкое применение не только для повышения эксплуатационной эффективности, но и для обеспечения максимального комфорта пассажиров и надежности железнодорожной инфраструктуры. Одним из ключевых направлений является использование ИИ для автоматизированного выявления дефектов путей, таких как трещины, износ рельсов или отклонения геометрии пути. С помощью компьютерного зрения и анализа данных, полученных от датчиков и камер, установленных на подвижном составе или вдоль путей, системы на основе ИИ способны оперативно обнаруживать даже незначительные повреждения, которые могут привести к серьезным последствиям. Это позволяет своевременно планировать и проводить ремонтные работы, минимизируя риски аварий и простоев.

Кроме того, ИИ применяется для оптимизации мероприятий по техническому обслуживанию. Анализируя большие объемы данных о состоянии инфраструктуры, погодных условиях, интенсивности движения и других факторах, ИИ помогает прогнозировать износ оборудования и планировать профилактические работы с учетом реальной нагрузки. Это не только снижает затраты на обслуживание, но и повышает общую надежность системы, предотвращая внеплановые остановки и задержки.

Для пассажиров такие технологии означают повышение комфорта и безопасности поездок. Благодаря своевременному устранению дефектов и оптимизации графика технического обслуживания, поезда становятся более пунктуальными, а путешествия — более предсказуемыми. В перспективе интеграция ИИ в управление железнодорожным транспортом может привести к созданию полностью автономных систем, которые будут обеспечивать высочайший уровень безопасности и комфорта при минимальном вмешательстве человека [56].

Такой подход повышает пропускную способность, эффективность и удовлетворенность пассажиров за счет снижения эксплуатационных расходов и задержек в поездках. В рамках упомянутого исследования разработана интегрированная модель выявления дефектов путей и оптимального распределения работ по техническому обслуживанию, направленная на снижение эксплуатационных расходов, управляющих инфраструктурой при одновременном повышении пропускной способности и эффективности городских железнодорожных систем. Применение предложенного подхода к реальной городской железнодорожной линии демонстрирует его эффективность в повышении комфорта пассажиров и сокращении задержек в пути за счет устранения влияния технического обслуживания путей на качество движения и скорость движения поездов.

Своевременную доставку информации о пассажирах и эксплуатационных данных, что крайне важно для безопасности и эффективности обеспечивают усовершенствованные системы связи на основе ИИ, оптимизирующие связь в высокоскоростных средах, сокращая затраты на измерения на 50% при сохранении производительности [57].

Графы знаний на основе ИИ используются для оценки передовых технологий в области HSR, что позволяет получить представление об их полезности и эффективности [58]. Эта система оценки помогает выявлять и приоритизировать технологии, расширяющие эксплуатационные возможности. Стоит отметить, что, хотя интеллектуальные технологии значительно улучшают системы HSR, опасения по поводу чрезмерной зависимости от автоматизации и потенциальных угроз кибербезопасности сохраняются. Баланс между технологическим прогрессом и надежными протоколами безопасности необходим для устойчивого развития высокоскоростных железных дорог [59].

Оптимизация графиков движения поездов и сокращение задержек за счет глобальной диспетчеризации без участия оператора могут быть достигнуты с помощью передовых алгоритмов и моделей. Недавние исследования посвящены различным методологиям, использующим автоматизацию и данные в реальном времени для улучшения работы поездов, в конечном итоге минимизации задержек и повышения эффективности. Так, модель динамического планирования, разработанная Янгом и др., использует алгоритм глубокого детерминированного градиента политики (DDPG) для минимизации общих задержек и потребления энергии в высокоскоростных поездах [60].

Чжоу и др. предлагают комплексный подход к оптимизации, сочетающий выбор скоростной траектории с оптимизацией расписания, что позволяет эффективно сокращать задержки и потребление энергии во время возмущений [61].

Ван и др. внедряют подход к изменению расписания движения поездов, основанный на оптимизации движения нескольких поездов, благодаря чему общая задержка поездов сократилась на 60,60% по сравнению с традиционными методами [62]. Этот метод использует взаимную пространственно-временную информацию для составления расписаний с минимальным временем и тем самым снижает нагрузку на диспетчеров.

Ли и др. представляют глобальный метод оптимизации управления, который предотвращает тупиковые состояния при движении поездов, обеспечивает бесперебойный поток и сокращение задержек в сети [63]. Метод повышает общую эксплуатационную эффективность железнодорожной системы за счет корректировки макрорежима работы поездов.

Похожие исследования активно проводятся в России [64-66]. Это т.н. виртуальная сцепка – технология, которая позволяет управлять несколькими транспортными средствами как единой системой без физического соединения между ними. Это достигается за счет использования современных технологий, таких как GPS, беспроводная связь, системы автоматического управления и датчики. Виртуальная сцепка обеспечивает синхронизацию движения, повышает эффективность транспортировки, снижает затраты на топливо и улучшает безопасность за счет автоматизированного контроля расстояния и скорости между транспортными средствами. В условиях текущих инфраструктурных ограничений и роста грузооборота технологии, способные повысить пропускную и провозную способность, становятся особенно актуальными. Наиболее перспективным решением на сегодняшний день является интервальное регулирование с использованием технологии виртуальной сцепки. Согласно расчётам, это позволяет увеличить пропускную и провозную способность до 20 % по сравнению с традиционной жёсткой сцепкой. Однако до сих пор отсутствуют методики, позволяющие определить оптимальные варианты применения виртуальной сцепки для конкретных участков железной дороги, подкреплённые математическими обоснованиями.

Заключение

Как можно видеть, спектр применения ИИ на железнодорожном транспорте чрезвычайно широк. Однако при внедрении систем, содержащих элементы ИИ, в практику (так называемую «цифровую трансформацию») высокие риски могут возникать вследствие невозможности на сложившихся системах организовать безошибочный ввод-вывод и передачу информации между вычислительными и управляющими подсистемами, что будет приводить к ошибкам и сбоям, которые, в свою очередь, могут стать причиной аварий и снижения общего уровня безопасности. Локальные платформы плодят вторичные проблемы стыковки, унификации данных и десятки других. Любые попытки улучшить функционирование сложившихся систем ведут, как правило, к ликвидации последних рациональных подсистем и элементов в их составе.

Крупные организации, подобные ОАО «РЖД» складывались годами, многократно менялось регулирование их сферы деятельности, менялись оргструктура, расширялся перечень полномочий и/или менялось их распределение по оргструктуре, менялись формы документов, отчетность, персонал, цели и показатели деятельности. Парк эксплуатируемой техники и инфраструктура также, как правило, очень разнородны и, можно даже сказать, находятся на разных этапах технологического развития и зрелости.

То есть необходима сквозная концептуальная технология цифровизации, с применением которой цифровая трансформация может стать целостной, прозрачной и управляемой. Об этом давно и безуспешно говорят специалисты в области концептуального проектирования [67, 68].

Вместе с тем, концептуальная технология с самого начала исходит из следующих базовых принципов:

- цифровизируется непосредственно деятельность, а не её элементы;

- цифровизированная деятельность проектируется на основе системно полных концептуальных моделей, сквозным образом охватывающих целеполагание, управление, учет, показатели, модели данных, документооборот и информационные системы, то есть на базе проектирования единой цифровой платформы;
- проектируется вся система «снизу-вверх», включая постановку системы согласованных между собой и сбалансированных по ресурсам целей, в результате чего создается комплекс моделей, системно, концептуально целостно генерирующий модели данных локальных сервисов и платформ;
- модель стратегического планирования, входящая в указанную сквозную технологию, позволяет решать двуединую задачу: постановки целей в бизнес- или госкомпании и постановке целей цифровой трансформации без потери управляемости, без приостановки или замедления бизнеса.

Кроме того, следует отметить, что несмотря на то, что системы ИИ призваны значительно повысить безопасность и эффективность железнодорожного транспорта, сохраняются проблемы интеграции этих технологий в различные железнодорожные сети и обеспечения точности и надежности данных, а также возникают проблемы конфиденциальности данных, стандартизацией протоколов безопасности на разных железнодорожных предприятиях, совместимости систем и необходимости значительных инвестиций в инфраструктуру, которые во многом определяют перспективы будущего развития ИИ в железнодорожной отрасли.

Конечная цель внедрения интеллектуальных систем управления на железнодорожном транспорте заключается в интеллектуализации системы управления производственными (физическими) активами железнодорожной отрасли в целом, построении рациональной и эффективной системы их технического содержания, приобретения, использования и отчуждения путем взвешенного, на основе оценки рисков, разумного управления имеющимися ресурсами для достижения требуемых уровней функциональной безопасности и надёжности, а также достаточных уровней их производительности и функциональности при обеспечении приемлемой стоимости жизненного цикла объекта.

Список использованной литературы

1. Burroughs D. The future of intelligence is artificial (2019) URL: https://www.railjournal.com/in_depth/future-intelligence-artificial.
2. Gibert X., Patel V.M., Chellappa R. Deep multitask learning for railway track inspection IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., 18 (1) (2017), pp. 153-164, 10.1109/TITS.2016.2568758.
3. Fragnelli V., Sanguineti S. A game theoretic model for re-optimizing a railway timetable Eur. Transp. Res. Rev., 6 (2) (2014), pp. 113-125, 10.1007/s12544-013-0116-y.
4. SNCF Making your rail journey better with predictive maintenance (2020). URL: <https://www.sncf.com/en/network-expertise/rolling-stock-division/how-predictive-maintenance-improves-rail-travel>.
5. Как РЖД используют искусственный интеллект. URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Проект:Искусственный_интеллект_в_РЖД?ysclid=m5tihqo1vk843029763
6. Przegalinska A. State of the art and future of artificial intelligence (2019) URL: <https://policycommons.net/artifacts/1335360/state-of-the-art-and-future-of-artificial-in-telligence/1941822/>.
7. Turing A.M. Computing machinery and intelligence. Parsing the Turing Test, Springer (2009), pp. 23-65.
8. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года, утвержденная Указом Президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490.
9. ГОСТ Р 59277-2020 Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта, пункт 3.18.

10. ГОСТ Р 59276-2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения, пункт 3.6.
11. Kaplan A., Haenlein M. Siri, siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence *Bus. Horiz.*, 62 (1) (2019), pp. 15-25, 10.1016/j.bushor.2018.08.004.
12. European Commission O.F., European Commission Communication from the commission to the European parliament, the European council, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions Artificial Intelligence for Europe. Brussels (2018) URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a3b87099-4968-11e8-be1d-01aa75ed71a1/language-en>.
13. European Commission and Joint Research Centre Artificial Intelligence: A European Perspective Publications Office (2019), 10.2760/936974.
14. Copeland B. Artificial Intelligence Encyclopaedia Britannica, Inc. (2019) URL: <https://www.britannica.com/technology/artificial-intelligence>
15. Bešinović N., De Donato L., Flammini F., Goverde R.M.P., Lin Z., Liu R., Marrone S., Nardone R., Tang T., Vittorini V. Artificial intelligence in railway transport: Taxonomy, regulations and applications *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* (2021), pp. 1-14, 10.1109/TITS.2021.3131637.
16. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning *Nature*, 521 (7553) (2015), pp. 436-444, 10.1038/nature14539.
17. Khabarov V.I., Speshilov K.V. Model' intellektual'nogo obuchayushchego agenta s ispol'zovaniem rassuzhdenii na osnove zdravogo smysla. Primenenie v trenazhernykh tekhnologiyakh [A model of an intellectual tutoring agent based on commonsense reasoning. Its application in simulator complexes]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 4 (41), pp.110-119. doi: 10.17212/1727-2769-2018-4-110-119.
18. Ruifan Tang, Lorenzo De Donato, Nikola Bešinović, Francesco Flammini, Rob M.P. Goverde, Zhiyuan Lin, Ronghui Liu, Tianli Tang, Valeria Vittorini, Ziyulong Wang, A literature review of Artificial Intelligence applications in railway systems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Volume 140, 2022, 103679, ISSN 0968-090X, <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103679>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X22001206>).
19. Ghofrani F., He Q., Goverde R.M.P., Liu X. Recent applications of big data analytics in railway transportation systems: A survey *Transp. Res. C*, 90 (2018), pp. 226-246, 10.1016/j.trc.2018.03.010.
20. Jain Y., Yogesh J. A survey on railway assets: A potential domain for big data 2019 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT), Vol. 1 (2019), pp. 1-6, 10.1109/ICICT46931.2019.8977714.
21. Wen C., Huang P., Li Z., Lessan J., Fu L., Jiang C., Xu X. Train dispatching management with data-driven approaches: A comprehensive review and appraisal *IEEE Access*, 7 (2019), pp. 114547-114571, 10.1109/ACCESS.2019.2935106.
22. Chenariyan Nakhaee M., Hiemstra D., Stoelinga M., van Noort M. The recent applications of machine learning in rail track maintenance: A survey International Conference on Reliability, Safety, and Security of Railway Systems, Springer International Publishing, Cham (2019), pp. 91-105.
23. Liu S., Wang Q., Luo Y. A review of applications of visual inspection technology based on image processing in the railway industry *Transp. Saf. Environ.*, 1 (3) (2020), pp. 185-204, 10.1093/tse/tdz007.
24. Xie P., Li T., Liu J., Du S., Yang X., Zhang J. Urban flow prediction from spatiotemporal data using machine learning: A survey *Inf. Fusion*, 59 (2020), pp. 1-12, 10.1016/j.inffus.2020.01.002.
25. Bešinović N. Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda *Transp. Rev.*, 40 (4) (2020), pp. 457-478, 10.1080/01441647.2020.1728419.
26. Corman F., Meng L. A review of online dynamic models and algorithms for railway traffic management *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 16 (3) (2015), pp. 1274-1284, 10.1109/TITS.2014.2358392.

27. Dmitrii, V., Efanov., E., M., Mikhailiyuta. (2023). 1. Reliability and Safety Management of the Transportation Process Using Systems for Continuous Monitoring of Railway Infrastructure Facilities. Мир транспорта, doi: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-10.
28. Dmitrii, V., Efanov., E., M., Mikhailiyuta. (2023). 1. Reliability and Safety Management of the Transportation Process Using Systems for Continuous Monitoring of Railway Infrastructure Facilities. Мир транспорта, doi: 10.30932/1992-3252-2023-21-2-10.
29. Dmitriy, Viktorovich, Shvalov. (2023). 3. Methods of Monitoring the Fulfillment of the Shunt Effect of Track Circuits. doi: 10.20295/2412-9186-2023-9-03-229-238.
30. Yuliang, Zhao., Xiaodong, Yu., Meng, Chen., Ming, Zhang., Ye, Chen., Niu, Xuanyu., Xiaopeng, Sha., Zhikun, Zhan., Wen, J., Li. (2021). 4. Continuous Monitoring of Train Parameters Using IoT Sensor and Edge Computing. IEEE Sensors Journal, doi: 10.1109/JSEN.2020.3026643.
31. L., Faccini., Jihad, Karaki., Egidio, Di, Gialleonardo., Claudio, Somaschini., Marco, Francesco, Boccione., Andrea, Collina. (2023). 2. A Methodology for Continuous Monitoring of Rail Corrugation on Subway Lines Based on Axlebox Acceleration Measurements. Applied Sciences, doi: 10.3390/app13063773.
32. Anis, Mhalla. (2022). 5. Monitoring of a Railway Transport Networks Based on the Study of Effective Sojourn Time. doi: 10.1109/IC_ASET53395.2022.9765834.
33. Шубинский, И. Б. Общие положения обоснования функциональной безопасности интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг // Надежность. – 2023. – Т. 23, № 3. – С. 38-45. – DOI 10.21683/1729-2646-2023-23-3-38-45. – EDN HGNXNT.
34. Vasil, Vatakov., Evelina, Pencheva., Emilia, Dimitrova. (2022). Recent Advances in Artificial Intelligence for Improving Railway Operations. Telecom, 1-4. doi: 10.1109/TELECOM56127.2022.10017265.
35. Rama, Chandra, Rao, Nampalli. (2024). Leveraging AI and Deep Learning for Predictive Rail Infrastructure Maintenance: Enhancing Safety and Reducing Downtime. International Journal of Engineering and Computer Science, 12(12):26014-26027. doi: 10.18535/ijecs/v12i12.4805
36. Попов, П. А. Применение технологий искусственного интеллекта для железнодорожного транспорта / П. А. Попов // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2024. – № 1(65). – С. 38-41. – EDN ZYYQSL.
37. Интеллектуальная рекомендательная система для пространственного анализа / С. Л. Беляков, А. В. Боженюк, Н. А. Голова [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2022. – № 3(227). – С. 14-26. – DOI 10.18522/2311-3103-2022-3-14-26. – EDN FDCQQW.
38. Охотников, А. Л. Искусственный интеллект для железной дороги / А. Л. Охотников, А. В. Зажигалкин // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 5. – С. 30-34. – DOI 10.34649/AT.2021.5.5.004. – EDN IFAYJK.
39. Dobrivoje, Dubljanin., Filip, Marković., Gabriela, Dimić., Dragan, Vučković., Martina, Petković., Lazar, Mosurović. (2024). Educational Application of Artificial Intelligence for Diagnosing the State of Railway Tracks. International Journal of Cognitive Research in Science, Engineering and Education, 12(2):467-476. doi: 10.23947/2334-8496-2024-12-2-467-476.
40. Dommaraju, Nema, Sai. (2024). Revolutionizing Railways: An AI-Powered Approach for Enhanced Monitoring and Optimization. doi: 10.55041/isjem01382.
41. Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Иерусалимов В.С. Формирование объективных показателей работы сортировочной станции на основе данных «от колеса» // Автоматика на транспорте. 2024. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-obektivnyh-pokazateley-raboty-sortirovochnoy-stantsii-na-osnove-dannyh-ot-kolesa> (дата обращения: 21.01.2025).
42. Гарбук, С. В. Метрологическая модель процесса оценивания функциональных характеристик систем искусственного интеллекта / С. В. Гарбук, Е. О. Шамина, А. В. Яшин // Законодательная и прикладная метрология. – 2024. – № 6(192). – С. 23-32. – DOI 10.32446/2782-5418.2024-6-23-32. – EDN NSKAJC.
43. Долгий, А. И. Интеллектуальный мониторинг перевозочных процессов на основе динамического метода главных компонент / А. И. Долгий, С. М. Ковалев, А. Н. Гуда //

- Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 2(90). – С. 240-251. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_2_240. – EDN YGLWRU.
44. Проневич, О. Б. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте / О. Б. Проневич, М. В. Зайцев // Надежность. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 54-65. – DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-3-54-65. – EDN CNENAL.
 45. Marek, Pawlik. (2015). 3. Control command systems impact on the railway operational safety. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, doi: 10.15802/STP2015/42160.
 46. Sergii, Kliuiev., Ievgen, Medvediev., Serhiy, Soroka., Vasyi, Dubuk. (2020). 5. Development of the intelligent rail vehicle control system. doi: 10.1109/CSIT49958.2020.9321866.
 47. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). 2. Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.006.
 48. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). 3. Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for controlling and scheduling in integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.002.
 49. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.006.
 50. Manfred, Wernicke. (2015). 4. Control of Rail Vehicles.
 51. Francisco, A., Ortega., Juan, A., Mesa., Miguel, A., Pozo., Justo, Puerto. (2018). 2. Railway traffic disturbance management by means of control strategies applied to operations in the transit system. doi: 10.2495/TDI-V2-N4-362-372.
 52. Sujith, Kumar, Kupunarapu. (2024). Machine Vision AI in Railroad Safety: Advanced Inspection Techniques. International Journal For Multidisciplinary Research, doi: 10.36948/ijfmr.2024.v06i06.29575.
 53. Корнев, Д. А. Моделирование сетей передачи данных в интеллектуальной системе управления движением поездов / Д. А. Корнев // Известия Транссиба. – 2023. – № 3(55). – С. 141-154. – EDN QICJOC.
 54. Компьютерное зрение как способ интеллектуализации систем горочной автоматизации / И. А. Ольгейзер, А. В. Суханов, А. М. Лященко, Д. В. Глазунов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 1. – С. 46-53. – DOI 10.52261/02346206_2022_1_46. – EDN LOQVJH.
 55. Структурная идентификация стохастических объектов в интеллектуальных динамических системах / П. А. Кучеренко, Л. Н. Стажарова, А. В. Костюков [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3(87). – С. 126-135. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_3_126. – EDN BFLNPU.
 56. Elise, Amiel., Markos, Anastasopoulos., Guillaume, Chevaleyre., Alice, Consilvio. (2023). On applying artificial intelligence techniques to maximise passengers comfort and infrastructure reliability in urban railway systems. 1-6. doi: 10.1109/mt-its56129.2023.10241648.
 57. Jun, Liu., Gehui, Liu., Yu, Wang., Wanqiu, Zhang. (2024). Artificial-intelligent-powered safety and efficiency improvement for controlling and scheduling in integrated railway systems. High-speed railway, doi: 10.1016/j.hspr.2024.06.002.
 58. Chenchen, Liu., Hongwei, Wang., Lin, Wang. (2024). Intelligent Technology Assessment of High-Speed Railway Based on Knowledge Graphs. Advances in Engineering Technology Research, doi: 10.56028/aetr.9.1.396.2024.
 59. Nisha, Prasad., Shailendra, Jain. (2024). Intelligent Technologies in High-Speed Rail Transit Systems. Energy, Environment, and Sustainability, 217-249. doi: 10.1007/978-981-97-0515-3_10.
 60. Xue, Yang., Huan, Wang., Lijuan, Li. (2023). Train operation scheduling optimization based on deep reinforcement learning. 2558 doi: 10.1088/1742-6596/2558/1/012042.
 61. Min, Zhou., Xuan, Liu., Zhuopu, Hou., Jingfan, Shang., Yixiang, Yue., Haifeng, Song. (2020). Integrated Optimization of Dispatching Decision and Speed Trajectory for High-Speed Railway Under Disturbances *. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327211.

62. Rongsheng, Wang., Zhiming, Yuan., Shuxin, Ding. (2023). A train timetable rescheduling approach based on multi-train tracking optimization of high-speed railways. *Railway Sciences*, doi: 10.1108/rs-05-2023-0022.
63. Feng, Li., Gao, Ziyou., Chen, Xiaojing., Wu, Jianjun., Jia, Bin. (2019). Method for avoiding deadlock state of train operation and global optimization control method of train operation.
64. Сравнительная оценка параметров движения поездов для различных вариантов виртуальной сцепки / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров, В. И. Кузнецов, С. С. Тихонов // *Мир транспорта*. – 2023. – Т. 21, № 4(107). – С. 30-39. – DOI 10.30932/1992-3252-2023-21-4-4. – EDN NSJDAX.
65. «Виртуальная сцепка» на Восточном полигоне: достигнутые эффекты и направления развития / А. И. Долгий, А. Г. Сахаров, М. А. Дежков [и др.] // *Транспорт Российской Федерации*. – 2023. – № 5-6(108-109). – С. 15-19. – EDN CMARKE.
66. Охотников, А. Л. Виртуальная сцепка как элемент интервального регулирования движения поездов / А. Л. Охотников // *Наука и технологии железных дорог*. – 2024. – Т. 8, № 2(30). – С. 42-47. – EDN FWAUVY.
67. Никаноров С. П., Никитина Н. К., Теслинов А. Г. Введение в концептуальное проектирование АСУ: анализ и синтез структур. – М.: РВСН, 1995. – 234 с. Электронный ресурс. URL: <https://www.teslinov.ru/wp-content/uploads/2020/01/Conceptualnoe-proektirovanie.pdf> (дата обращения: 16.01.2025).
68. Кучкаров З.А. Методы концептуального анализа и синтеза в теоретическом исследовании и проектировании социально-экономических систем – М.: Концепт, 2006. ч.1 (276 с), ч. 2 (268 с).

УДК 656.212.5

ВЫПРАВКА СОРТИРОВОЧНЫХ ПУТЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Хатламаджиян А.Е., к.т.н., доцент, заместитель генерального директора, АО «НИИАС», Москва, Россия, E-mail: a.hatlamadzhian@vniias.ru

Ольгейзер И.А., к.т.н., доцент, первый заместитель директора Ростовского филиала, АО «НИИАС», Москва, Россия, E-mail: i.olgezer@vniias.ru

Суханов А.В., к.т.н., доцент, заместитель начальника отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: a.suhanov@vniias.ru

Боровлев П.В., ведущий инженер-программист отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: p.borovlev@vniias.ru

Аннотация

В работе предложена концепция использования данных Комплекса компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей (КЗСП) при выправке и диагностике продольного профиля пути. Показаны принципы расчета продольного профиля сортировочных путей на основе данных, полученных в результате работы КЗСП. Представлены результаты на реальном объекте внедрения (ст. Кинель Куйбышевской железной дороги), а также анализ профиля с учетом текущей выправки. В заключении представлено описание эффективности КЗСП при оптимизации трудозатрат при автоматизации сортировочных процессах и текущем ремонте путей сортировочного парка.

Ключевые слова: Контроль сортировочных путей, измерение продольного профиля, комплекс компьютерного зрения, автоматизация сортировочных процессов, цифровая железнодорожная станция

REPAIR OF MARSHALLING TRACKS BASED ON COMPUTER VISION DATA ANALYSIS

Khatlamadzhian A.E., Ph.D., Associate Professor, Deputy General Director, JSC "NIIAS", Moscow, Russia, E-mail: a.hatlamadzhian@vniias.ru

Olgeizer I.A., Ph.D., Associate Professor, First Deputy Director of the Rostov Branch, JSC "NIIAS", Moscow, Russia, E-mail: i.olgezer@vniias.ru

Sukhanov A.V., Ph.D., Associate Professor, Deputy Head of the Department of IITCS, JSC "NIIAS", Rostov-on-Don, Russia, E-mail: a.suhanov@vniias.ru

Borovlev P.V., Leading software engineer of the IITCS department, JSC "NIIAS", Rostov-on-Don, Russia, E-mail: p.borovlev@vniias.ru

Abstract

The paper proposes the concept of using Computer Vision data to monitor the occupancy of sorting tracks (KZSP) when straightening and diagnosing the longitudinal profile of the track. The principles of calculating the longitudinal profile of sorting tracks based on the data obtained as a result of the work of the KZSP are shown. The results are presented at a real implementation facility (Kinel station of the Kuibyshev Railway), as well as an analysis of the profile, taking into account the current alignment. In conclusion, a description of the effectiveness of the KZSP in optimizing labor costs in the automation of sorting processes and the ongoing repair of the sorting fleet tracks is presented.

Keywords: Railway Station Control, longitudinal profile estimation, hump yard automation, digital freight sorting station

Введение

С 2018 года⁶ на инфраструктуре холдинга ОАО «РЖД» осуществляется переход от автоматизированного к автоматическому управлению и контролю технологическими процессами на сортировочной станции с использованием технологий искусственного интеллекта [1]. Этот переход принято называть цифровизацией, а оснащаемые объекты – цифровыми железнодорожными станциями (ЦЖС). Одним из наиболее сложных процессов при переходе к ЦЖС является процесс расформирования-формирования поездов в сортировочном парке. С целью цифровизации контроля сортировочного парка специалистами АО «НИИАС» разработан Комплекс компьютерного зрения для контроля занятости сортировочных путей КЗСП [2]. В 2023 году комплекс КЗСП введен в эксплуатацию на станции Кинель. Основным отличием комплекса КЗСП от существующей ранее системы импульсного зондирования (КЗП-ИЗД) является то, что он позволяет контролировать разрывы между группами вагонов (отцепами), а также анализировать динамику движения отцепов. Использование результатов анализа динамики позволило начать разработку еще одной функции, не заявленной в первоначальном техническом задании на КЗСП – анализ продольного профиля [3]. В настоящей работе представлен алгоритм расчета продольного профиля сортировочных путей на основе КЗСП, скорректированный в процессе подготовки к приемочным испытаниям, показаны результаты внедрения функции расчета продольного профиля в постоянную эксплуатацию в 2024 году, а также проиллюстрированы полученные данные и их изменение после выправки продольного профиля.

1. Состояние проблемы

На крупных сортировочных узлах функционирование сортировочного парка осуществляется круглые сутки в связи с необходимостью обработки большого количества вагонов. С учетом необходимости закрытия и освобождения путей сортировочного парка обслуживание сортировочных путей является трудоемкой и времязатратной задачей. В настоящее время обслуживание путей является плановым, т.е. не учитывает актуальность выполнения мероприятий по выправке пути. На практике внедрения систем автоматизации управления сортировочным процессом известно множество небезопасных случаев превышения скорости соударения с повышенной скоростью [4], либо неэффективных случаев остановки отцепов с появлением окон [5]. Большинство таких случаев напрямую связаны с неэффективным планом выправки сортировочного парка. В качестве решения напрашивается работа «от объекта», т.е. исходя из анализа движения отцепов в сортировочном парке. В настоящее время для исходных данных при анализе движения могут быть использованы данные КЗП-ИЗД или КЗСП (рис. 1). Однако КЗСП-ИЗД позволяет «видеть» движение хвоста только последнего зашедшего на путь вагона. Функционал КЗСП включает контроль разрывов между отцепами на всем протяжении сортировочного парка (рис. 2). Далее приведено описание расчета продольного профиля средствами КЗСП с выдачей рекомендаций по его выправке.

⁶ Концепция «Цифровая железнодорожная станция»: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 07.11.2018 № 1049 (в ред. от 05.06.2020 № 1217/р).



Рисунок 1. Фото камер, используемых в КЗСП

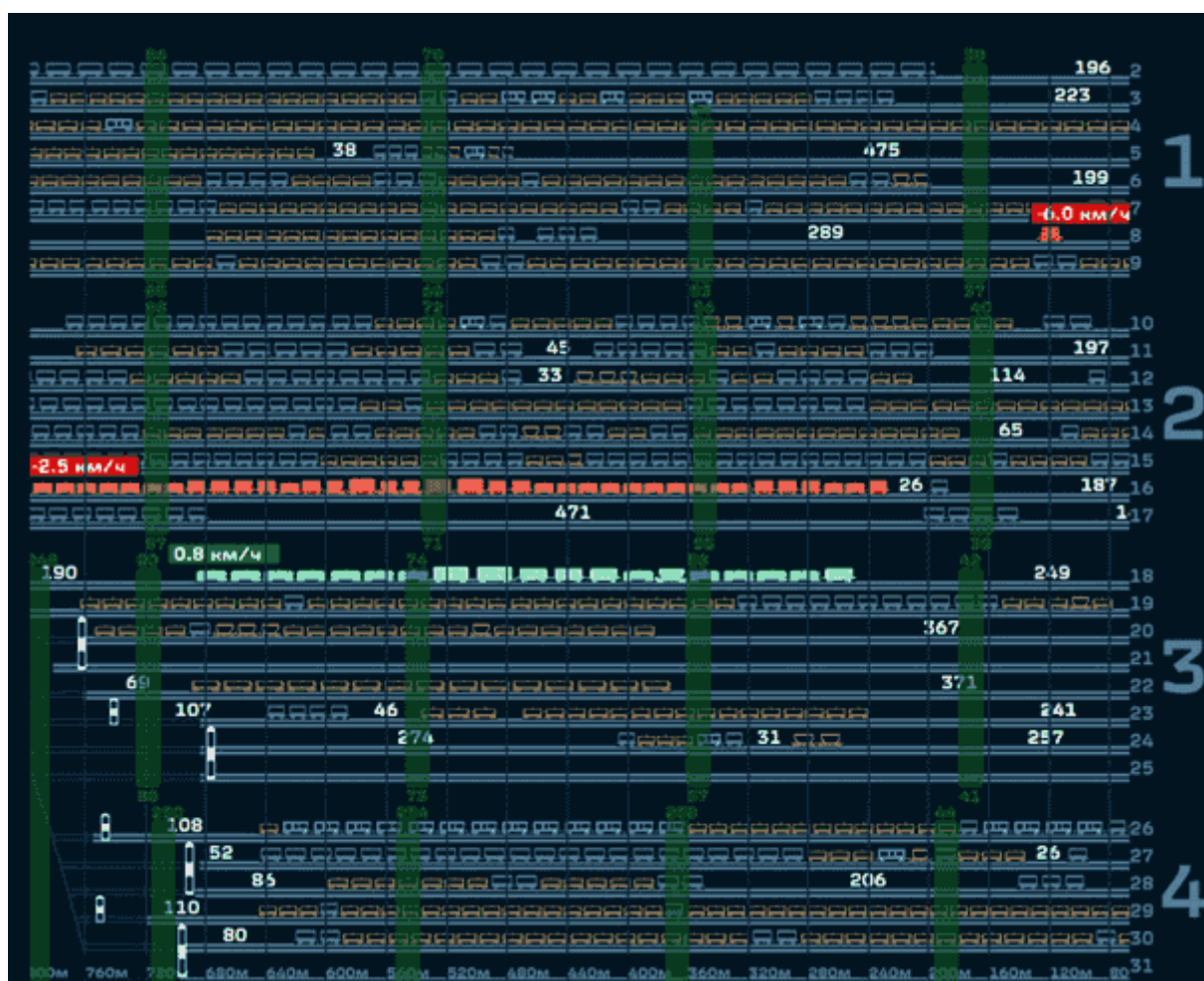


Рисунок 2. Интерфейс КЗСП

2. Реализация диагностики профиля на основе данных о динамике движения отцепов

Процесс диагностики продольного профиля сортировочного пути осуществляется путем «подсветки» уклонов, являющихся небезопасными (больше 0,7 ‰) или неэффективными (отрицательные).

Расчет профиля осуществляется путем корректировки (адаптации) значений известных отметок продольного профиля после проезда каждого отцепа по измеряемому пути. В качестве известных значений используются идеальные отметки профиля, заданные при проектировании (0,6 ‰), либо доступная измеренная инструментальная съемка пути.

В качестве адаптирующих значений взяты координаты отцепов, полученных непосредственно на выходе модели глубокого обучения, используемой в алгоритме обработки данных КЗСП.

Принцип адаптации на основе данных о скорости движения отцепов в сортировочном парке, полученных из выходных данных КЗСП о местоположении подвижных единиц, представлен далее.

2.1. Адаптация инструментального профиля по рассчитанным скоростям на участке

При корректировке профиля каждый путь разбивается на участки, которые исходя из точности КЗСП и влияния на ходовые свойства вагонов принято считать равными 50 м. Для каждого участка рассчитываются аналитическая скорость отцепа (v_n) и скорость отцепа согласно данным КЗСП (v_{pn}) при выходе из участка.

Условие корректировки высоты профиля следующие:

$$|v_{pn} - v_n| \geq \delta \cdot v_{pn}, \quad (1)$$

где $\delta = 0.05$ (5%); $n \in [1, N]$ – номер участка, N – количество участков; v_{pn} – скорость отцепа по данным КЗСП при выходе из участка, м/с; v_n – аналитическая скорость при выходе из участка, м/с.

В зависимости от разницы скоростей происходит корректировка высот профиля (H_n) на ΔH на каждом участке пути⁷.

$$H_n = H_n + \Delta H, \quad (2)$$

где $\Delta H = -\eta \frac{\partial \Delta v}{\partial v}$; H_n – высота профиля, м.

2.2. Расчет аналитической скорости

За основу расчета аналитической скорости движения отцепа в зависимости от уклона используется формула [6]:

$$v_n = \sqrt{v_{n-1}^2 + 2 \cdot g \cdot l \cdot (u_n - W) \cdot 10^{-3}}, \quad (3)$$

⁷ На малых выборках (<100 отцепов) ΔH считается равным $\pm 0,01$ с целью исключения колебаний

где v_n – скорость отцепа при выходе с участка n ($n \in N, N$ – общее количество участков на пути), м/с; v_{n-1} – скорость движения отцепа при входе на участок n , м/с; g' – ускорение свободного падения с учетом инерции вращающихся масс (принято равным 9,66), м/с²; l – длина оцениваемого участка пути n , м; u_n – уклон участка n , по которому движется данный отцеп, ‰; W – суммарное удельное сопротивление движению отцепа, Н/кН.

Расчет аналитической скорости движения отцепа для корректировки высоты профиля опирается на значения условных высот для каждого участка, полученные по формуле [7]:

$$H_n = H_{n-1} - \frac{u_n \cdot l}{1000}, \quad (4)$$

где H_n – условная высота при выходе с участка n , м; H_{n-1} – условная высота при входе на участок n , м; u_n – уклон участка n , по которому движется расчетный отцеп, ‰; l – длина оцениваемого участка пути n , м.

В качестве H_n используются данные известные отметки профиля. Начальная высота H_1 принимается равной 1 (стартовая точка).

Зная значения условных высот из формулы (4), выразим значение уклона на участке n [8]:

$$u_n = (H_{n-1} - H_n) \cdot \frac{1000}{l}. \quad (5)$$

Далее, преобразуем формулу (3), подставив формулу (5) вместо u_n :

$$v_n = \sqrt{v_{n-1}^2 + 2 \cdot g' \cdot ((H_{n-1} - H_n) \cdot 1000 - W \cdot l) \cdot 10^{-3}}. \quad (6)$$

Таким образом, будет получена конечная скорость на участке аналитическим способом, которая применяется в условии (1).

2.3. Расчет скорости согласно данным КЗСП

Расчет скорости КЗСП производится по координатам одновагонных тяжелых отцепов⁸ на каждом участке, полученным на выходе модели глубокого обучения (например, YOLOv5 [9]), для $n > 1$. При $n = 1$ (первый участок) скорость берется равной скорости выхода из третьей тормозной позиции (ЗТП) по данным радиолокационного измерителя скорости (РИС-ВЗМ).

При расчете не учитываются следующие случаи:

- Длинные (> 50 метров) отцепы. На такие отцепы оказывают влияние соседние участки.
- Отцепы, остановившиеся до 100 метров, - «Больные» вагоны [10].
- Движение в обратную сторону. В обратную сторону движутся либо локомотивы, либо остановившиеся ранее отцепы.
- С началом движения после ЗТП – маневровые работы.

⁸ Согласно практике реализации КСАУ СП, при массе более 80 тонн внешние воздействия кроме силы трения практически отсутствуют

Из отобранных данных для каждого отцепа формируются два массива: координаты хвоста отцепа (S) и время (T), за которое хвост отцепа достиг соответствующей координаты из массива S .

Так как уклон на участке считается неизменным, то расчет делается с условием равномерности движения по участку. Однако выходные данные нейронной сети могут давать погрешность и выбросы, поэтому для определения скорости движения на участки используются все точки, полученные на каждом измеряемом участке. В результате формируется аппроксимирующая прямая для системы уравнений:

$$\begin{cases} k_1 \cdot t_1 + m_1 = s_1 \\ \dots \\ k_j \cdot t_j + m_j = s_j \end{cases} \quad (7)$$

где t_j – элемент массива T (j – количество точек, полученных по данным распознавания КЗСП на рассматриваемом участке); s_j – элемент массива S ; k – угловой коэффициент; m – точка пересечения с осью абсцисс.

Запишем систему уравнений в матричном виде:

$$T^* X = S, \quad (8)$$

где T^* – вектор данных о времени, расширенный на единичный вектор (матрица вида $j \times 2$); X – результирующий вектор (матрица размером 2×1); S – строка координат хвоста отцепа (матрица $1 \times j$).

Для решения системы линейных уравнений в матричном виде (8) воспользуемся методом наименьших квадратов (МНК)⁹. Умножаем обе части уравнения на транспонированную матрицу системы T^{*T} :

$$T^{*T} T^* X = T^{*T} S. \quad (9)$$

Выразим X , умножая обе части уравнения на обратную матрицу $(T^{*T} T^*)^{-1}$:

$$X = (T^{*T} T^*)^{-1} T^{*T} S. \quad (10)$$

Полученный вектор $X = [k, m]$ используем для нахождения аппроксимированной средней скорости для S_n .

Далее, из полученного массива S^* выбираем s_1 и s_n , вычисляем аппроксимированное расстояние на участке по формуле:

$$\Delta v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{l}{\frac{s_n - m}{k} - \frac{s_{n-1} - m}{k}} = \frac{kl}{s_n - s_{n-1}}. \quad (11)$$

Из средней определяется конечная скорость на участке по модели КЗСП, используемая в условии (1):

$$v_{pn} = 2 * \Delta v - v_{нач}. \quad (12)$$

⁹ Решение систем линейных уравнений методом наименьших квадратов. Электронный ресурс URL: <https://piter-melnikov.narod.ru/part2/1.10.htm> (дата обращения 10.01.2024).

Поверка измерений, полученных с помощью КЗСП осуществляется путем сравнения с данными от метрологически поверенных инструментов. В качестве объекта сравнения используется локомотив, выходящий в зону действия КЗСП через поверенный радиолокационный измеритель скорости РИС-ВЗМ [2] с постоянной скоростью. Полученная разница между точками на выходе модели глубокого обучения и прямой скорости локомотива будет являться корректирующей при проезде последующих отцепов (рис. 4).

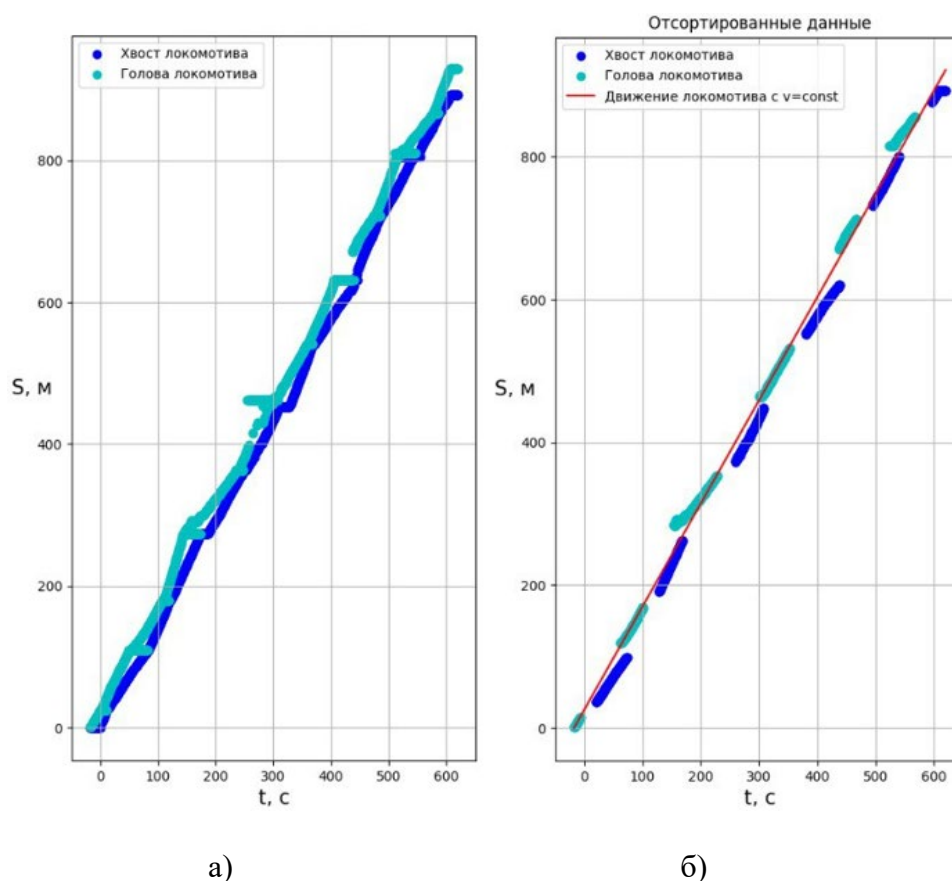


Рисунок 4. Иллюстрация корректировки данных модели глубокого обучения на основе РИС-ВЗМ и локомотива (а – «сырые» данные, б – данные, отфильтрованные от выбросов и реальное движение локомотива)

3. Результаты использования КЗСП при текущей выправке сортировочных путей

На рис. 5 и 6 представлены кривые продольного профиля до и после выправки. До выправки наблюдалось превышение скорости соударения на участке 200-300 метров. Графики были переданы в службу пути для анализа и последующей выправки. После выправки соударения стали с допустимой скоростью. На графиках красно-оранжевой линией обозначен профиль, рассчитанный по данным КЗСП (красные участки – небезопасные, оранжевые – неэффективные), синей – доступный измеренный профиль 2022 года, зеленые линии обозначают коридор идеального профиля.

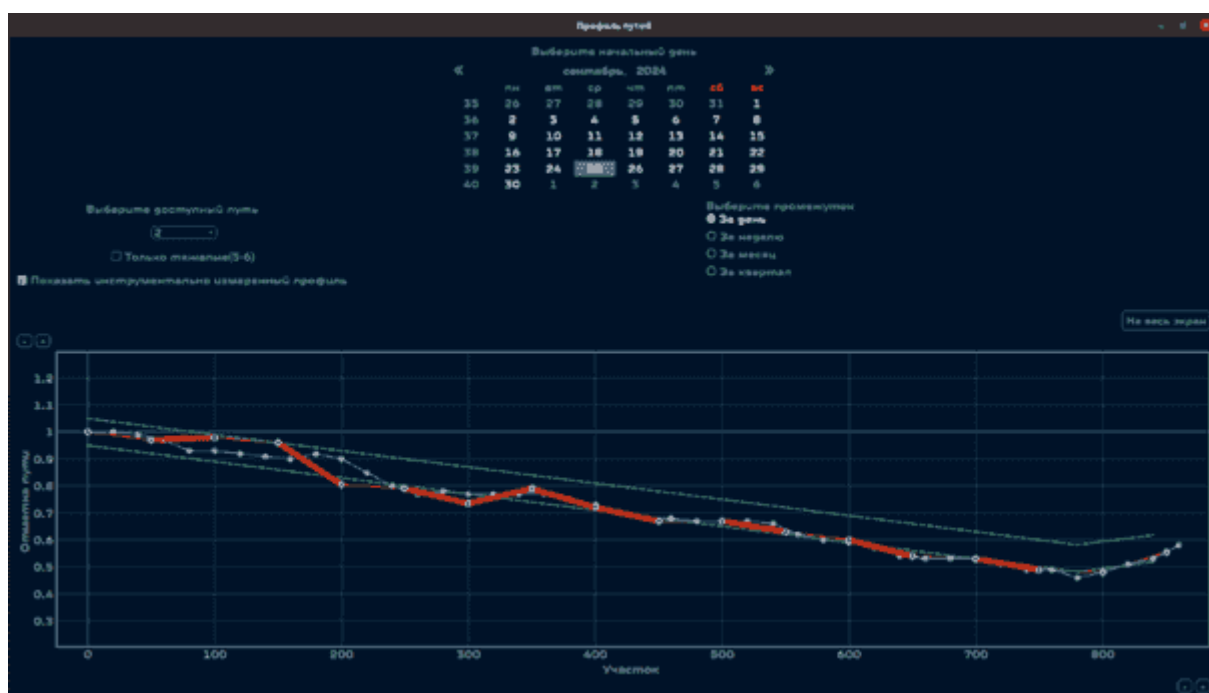


Рисунок 5. Профиль второго сортировочного пути нечетной системы ст. Кинель до выправки (25 сентября 2024 года)

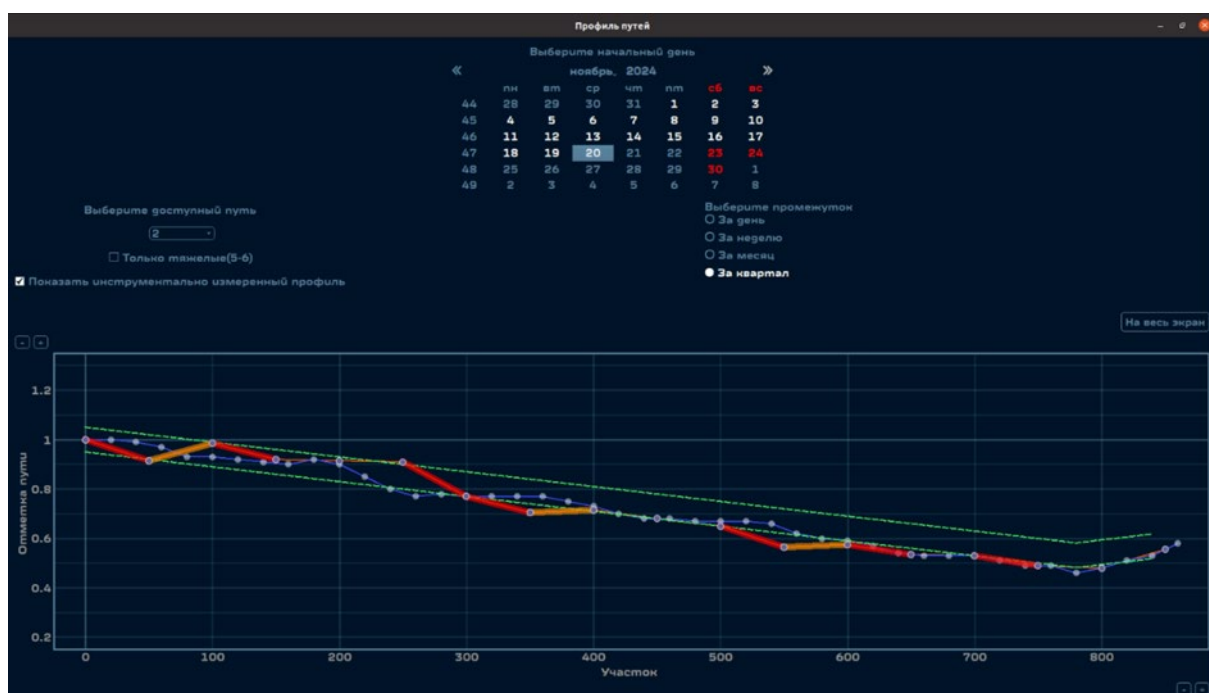


Рисунок 6. Профиль второго сортировочного пути нечетной системы ст. Кинель после выправки (20 ноября 2024 года)

Графика на рис. 6 иллюстрирует актуальность выправки сортировочных путей на основе данных КЗСП, так как график стал выше, а небезопасные соударения исчезли на проблемном участке после адресной выправки.

Заключение

Результаты исследования доказывают, что комплекс КЗСП может быть использован в целях перехода от планового обслуживания сортировочных путей к обслуживанию по состоянию. Обслуживание по состоянию освободит временные и материальные ресурсы на избыточную съемку пути, а также обеспечит эффективность процесса выправки сортировочных путей. В результате будет увеличена скорость расформирования в автоматизированных системах управления сортировочным процессом с сохранением безопасности движения за счет сокращения небезопасных соударений и неэффективных остановок в сортировочном парке. В 2025 г. Комплекс КЗСП планируется к запуску на обеих системах станции Челябинск-Главный, где пройдет последующая эксплуатация функции диагностики продольного профиля. В дальнейшем также планируется реализация отчетности согласно Методическим указаниям по составлению продольных профилей станционных путей и перегонов (ЦПТ-54/26) для легитимности выходных данных диагностики.

Список использованной литературы

1. Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Борисов В.В. Компьютерное зрение для контроля сортировочных процессов/ А.Е. Хатламаджиян [и др.] //Автоматика, связь, информатика. – 2021. – №. 3. – С. 8-11.
2. Рыбалкин В.И. Структура построения устройства управления прицельным торможением / В.И. Рыбалкин //Современные технологии обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте. – 2022. – С. 173-176.
3. Андреев В.Е., Долгий А.И., Кудюкин В.В., Хатламаджиян А.Е., Гришаев С.Ю., Ольгейзер И.А. Цифровая железнодорожная станция – от концепции к реальному внедрению. / В.Е. Андреев [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2023. – № 9. – С. 2-6.
4. Ольгейзер И. А. Безопасность роспуска составов на сортировочных горках. Граничные условия функционирования при эксплуатации горочных систем автоматизации. – 2019.
5. Дагладиян Г. Д., Швалов Д. В., Давыдов Ю. В. Исследование причин возникновения "окон" на путях сортировочного парка //Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – №. 1. – С. 53-60.
6. Долгий А.И., Хатламаджиян А.Е., Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Корниенко К.И. Инновационные алгоритмы машинного зрения для диагностики продольного профиля сортировочных путей/ А.И. Долгий [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2022. – № 8. – С. 7–9. DOI: 10.34649/AT.2022.8.8.002.
7. Корниенко К.И. Совершенствование метода расчета продольного профиля сортировочных путей железнодорожных станций: диссертация ... кандидата технических наук: 05.22.08 / Корниенко Константин Ильич; [Место защиты: Новосибирск федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения»] – Новосибирск, 2019. – С. 170.
8. Методика ОАО «РЖД» от 15.12.2017 №1339 (ред. от 20.02.2018) «Методика аттестации железнодорожных станций с автоматизированными горками с позиции обеспечения безопасности при роспуске вагонов-цистерн для перевозки опасных грузов 2 класса с классификационным шифром 2112 и номерами ООН 1011, 1965, 1969, 1978 опасности (пропанобутановые смеси)» – С. 12.
9. Zhang Y. et al. Real-time vehicle detection based on improved yolo v5 //Sustainability. – 2022. – Т. 14. – №. 19. – С. 12274.
10. Меншутина Е. Р., Жебанов А. В. Предиктивная аналитика при ремонте колёсных пар. – 2022.

УДК 004.932

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ «ОШИБОЧНОГО» КЛАССА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАСПОЗНАВАНИЯ НОМЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОДВИЖНЫХ ЕДИНИЦ

Пузеренко А.В., инженер 1 категории отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: a.puzerenko@vniias.ru
Максимов К.Ю., начальник сектора отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: k.maksimov@vniias.ru

Боровлев П.В., ведущий инженер-программист отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: p.borovlev@vniias.ru

Суханов А.В., к.т.н., доцент, заместитель начальника отделения ИИТЦС, АО «НИИАС», Ростов-на-Дону, Россия, E-mail: a.suhanov@vniias.ru

Аннотация

В работе представлено описание концепции «ошибочного» класса в задаче распознавания номеров железнодорожных подвижных единиц – вагонов и локомотивов. Показаны проблемы существующих алгоритмов распознавания на примере системы контроля и подготовки информации о перемещениях вагонов и локомотивов на станции в реальном времени (СКПИ ПВЛ РВ). Выявлена основная проблема распознавания вагонов и локомотивов, связанная с множественными надписями и визуальными дефектами, не относящимися к инвентарным номерам подвижного состава. Представлено решение данной проблемы путем применения модели YOLOv8s.

Ключевые слова: распознавание объектов, ошибочный класс, ложноположительные срабатывания, YOLO, железнодорожные вагоны, локомотивы, инвентарные номера, машинное обучение, компьютерное зрение.

USING THE CONCEPT OF AN "ERRONEOUS" CLASS TO IMPROVE THE QUALITY OF RECOGNITION OF RAILWAY ROLLING STOCK NUMBERS

Puzerenko A.V., engineer of the 1st category of the IITTS department, JSC NIIAS, Rostov-on-Don, Russia, E-mail: a.puzerenko@vniias.ru

Maximov K.Y., Head of the Sector of the IITC Department, JSC NIIAS, Rostov-on-Don, Russia, E-mail: k.maksimov@vniias.ru

Borovlev P.V., Senior Software Engineer at the IITC Department, JSC NIIAS, Rostov-on-Don, Russia, E-mail: p.borovlev@vniias.ru

Sukhanov A.V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the IITC Department, JSC NIIAS, Rostov-on-Don, Russia, E-mail: a.suhanov@vniias.ru

Abstract

The paper describes the concept of an «erroneous» class in the task of recognizing the numbers of railway moving units – wagons and locomotives. The problems of existing recognition algorithms are shown using the example of a system for monitoring and preparing information about the movements of wagons and locomotives at a station in real time (SKPI PVL RV). The main problem of recognizing wagons and locomotives has been identified, related to multiple inscriptions and visual defects not related to the inventory numbers of rolling stock. A solution to this problem is presented by applying the YOLOv8s model.

Keywords: object recognition, erroneous class, false positives, YOLO, railway wagons, locomotives, inventory numbers, machine learning, computer vision.

Введение

Методы распознавания объектов на изображениях (object recognition) [1] получили широкое распространение в области распознавания железнодорожных подвижных единиц уже более 10 лет назад [2, 3, 4]. В будущем, предложенные алгоритмы легли в основу крупных комплексных систем диагностики и контроля подвижного состава, в настоящее время тиражируемых на сети ОАО «РЖД». Одна из систем, названная интегрированным постом приема и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях (ППСС) [5], реализует коммерческий осмотр и диагностику подвижного состава и является единственной в мире системой автоматизированного дистанционного контроля технического состояния подвижного состава и коммерческого осмотра грузовых вагонов, осуществляющей метрологически значимые измерения на основе технического зрения и лазерного сканирования. Другая система – система контроля и подготовки информации о перемещениях вагонов и локомотивов на станции в реальном времени (СКПИ ПВЛ РВ) [6] – позволяет осуществить ведение вагонной и локомотивной модели станции «от колеса», т.е. на основе объективных показаний от всевозможных датчиков – камер видеонаблюдения, индуктивных устройств фиксации прохода оси и устройств сигнализации, централизации и блокировки. Использование СКПИ ПВЛ РВ позволяет оптимизировать ручной ввод информации о технологических операциях, осуществляемых на станции (прием, отправление, выставка, ограждение, угловая передача и пр.), а также автоматизировать расчет объективных показателей работы станции. Как и у любой системы, связанной с распознаванием объектов на изображениях, СКПИ ПВЛ РВ и ППСС подвержены влиянию двух типов ошибок – отсутствие распознавания целевых объектов (ошибки первого рода) и появление ложно положительных распознаваний (ошибки второго рода). В настоящей работе представлено описание и решение проблемы появления ошибок второго типа при распознавании области номера вагона на примере данных камер видеонаблюдения в составе СКПИ ПВЛ РВ. Следующий раздел описывает состояние проблемы в данной области.

1. Состояние проблемы

Несмотря на стремительное развитие методов распознавания объектов, одной из основных проблем, до конца не решенных в данной области, является появление ошибок второго рода. Крайне важным данный аспект становится в железнодорожной области, особенно при необходимости доказательства функциональной безопасности [7]. Ошибки второго рода связаны с недостаточным «знанием» обученных моделей глубокого обучения [8] о всевозможных объектах предметной области. Пример такой ошибки в области распознавания номеров вагонов представлен на рисунке 1.

При распознавании инвентарных номеров вагонов важным этапом является распознавание области с предполагаемым восьмизначным номером. Этот этап, в отличие от распознавания цифр на области, является наиболее уязвимым для ошибок второго рода, так как предполагает распознавание ключевых объектов в пространстве близких по градиенту объектов, в том числе ложных объектов. Как можно заметить, область с номером может быть подобна любой надписи на подвижном составе, что может стать причиной ложного распознавания.



Рисунок 1. Ложноположительные объекты при распознавании номеров вагонов

В настоящее время такие проблемы, возникающие при распознавании, решаются путем комплексирования [9] – использования данных от смежных систем и систем верхнего уровня на станции (в частности АСОУП¹⁰ [10]).

Представленные выше рассуждения и привели авторов настоящего исследования к разметке явного «ошибочного» класса, который включает области, схожие с положительными классами, но размеченные экспертами, как ошибки.

2. Реализация концепции «ошибочного» класса при обучении модели распознавания областей с инвентарными номерами вагонов.

2.1. Описание данных

Существующие области инвентарных номеров вагонов можно разделить на 4 класса:

Стандартный набор данных включает следующие 4 класса:

- класс 0 – грузовые вагоны с последовательностью из восьми цифр,
- класс 1 – пассажирские вагоны с расположенными в два ряда цифр (3 сверху, 5 снизу),
- класс 2 – электровозы, обозначаемые как «ТЭМ7» или «ЧМЭЗ» с 4мя цифрами,
- класс 3 – тепловозы с маркировкой «ВЛ10» и 4 цифры,

С целью реализации «ошибочного» класса предлагается размечать еще один класс, содержащий:

Нерелевантные символы: изображение содержит буквы, специальные знаки или случайные графические элементы, не связанные с номерами вагонов. Пример таких символов показан на рисунке 2.

¹⁰ Автоматизированная система оперативного управления перевозками



Рисунок 2. Нерелевантные символы

Случайные числовые узоры: на изображении присутствуют числовые комбинации, которые не соответствуют формату номеров вагонов (например, неправильное количество цифр). Такой числовой узор изображен на рисунке 3.



Рисунок 3. Случайные числовые узоры

Аномалии в изображениях: проблемы с качеством изображения (плохое освещение, загрязнения, повреждения), мешающие корректной классификации. Пример аномалии показан на рисунке 4.

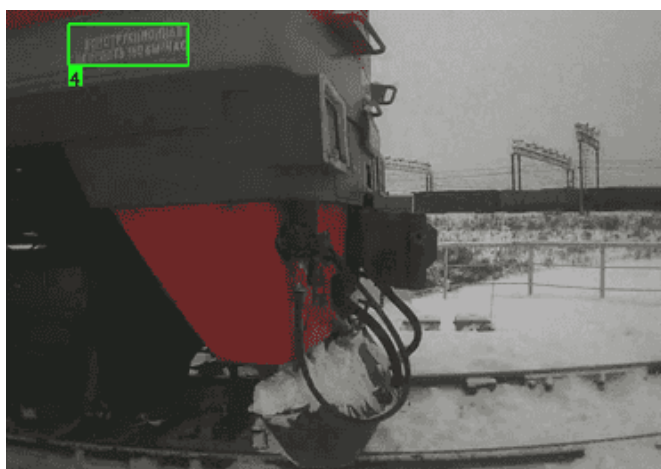


Рисунок 4. Аномалии в изображениях

Неожиданные объекты: присутствие элементов, не относящихся к вагонам (например, элементы инфраструктуры). Случайные элементы инфраструктуры изображены на рисунке 5.



Рисунок 5. Неожиданные объекты

2.2. Описание модели

Для реализации предлагаемого подхода выбрана модель YOLOv8s как одна из наиболее успешных в области распознавания объектов на изображениях [8]. Скорость обучения подобрана динамически, а для предотвращения переобучения применен метод ранней остановки. Начальные веса модели загружаются из предобученной версии YOLOv8s, что помогает ускорить процесс обучения [11].

3. Экспериментальные исследования

Для проверки предлагаемых положений была использована выборка из 15 023 изображений, разделенная на обучающую (80%) и тестовую (20%). При этом было соблюдено условие непересечения – тестовая выборка не содержала области из обучающей. Данная выборка была использована для обучения и тестирования модели YOLOv8s с разделением на 4 класса (классический подход, M_1) и 5 классов (с использованием «ошибочного» класса M_2). В качестве количественной характеристики качества обучения использована точность обучения, которая явно учитывает отношение распознавания к количеству ложноположительных объектов:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (1)$$

где TP – истинно положительные; FP – ложно положительные.

Для M_1 Precision составил 95%, для M_2 – 96%. Пример улучшения качества распознавания представлен на рисунке 6.



Рисунок 6. Пример распознавания «ошибочного» класса (слева) и ложного срабатывания при отсутствии разметки ложного класса (справа)

Результаты экспериментов демонстрируют применимость предлагаемого подхода с целью увеличения качества распознавания при считывании инвентарных номеров вагонов.

Заключение

Внедрение данной концепции в системы диагностики и контроля подвижного состава на сортировочных станциях позволит устранить проблему ложноположительных срабатываний. Выделение ложных объектов в отдельный класс обеспечивает модели возможность различать истинные инвентарные номера от схожих, но ошибочных областей. Экспериментальные результаты демонстрируют, что применение разметки с «ошибочным» классом приводит к значительному повышению количественных метрик распознавания (точности, полноты и F1-score), что свидетельствует о повышении качества работы системы за счёт оптимизации ложных срабатываний. В дальнейшем авторский коллектив планирует расширить концепцию разметки ложного класса для распознавания объектов железнодорожной инфраструктуры с целью обоснования функциональной безопасности сложных технических систем, основанных на методах машинного обучения.

Список использованной литературы

1. Sukanya C. M., Gokul R., Paul V. A survey on object recognition methods // International Journal of Science, Engineering and Computer Technology. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 48.
2. Суханов А. В. и др. Метод оптической идентификации железнодорожных подвижных единиц на основе интегральных устойчивых признаков/ А.В. Суханов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 27. – №. 4 (27). – С. 118.
3. Веснин Е., Царев В., Михайлов А. Распознавание номеров вагонов: принципы решения и приложение в промышленности / Е. Веснин [и др.] // Control Engineering. – 2014. – №. 1. – С. 60-66.
4. Хатламаджиян А. Е. Метод блочного оптического распознавания инвентарных номеров вагонов на основе комитета нейроиммунных моделей / А.Е. Хатламаджиян //

- Труды Международной научно-практической конференции "Транспорт-2014". – 2014. – С. 124-126.
5. Хатламаджиян А. Е., Лебедев А. И. Интегрированный пост автоматизированного приёма и диагностики подвижного состава на сортировочных станциях/ А.Е. Хатламаджиян, А.И. Лебедев // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2019. – №. 2. – С. 9-13.
 6. Хатламаджиян Агоп Ервандович, Ольгейзер Иван Александрович, Суханов Андрей Валерьевич, Иерусалимов Владислав Сергеевич Формирование объективных показателей работы сортировочной станции на основе данных «от колеса»/ А.Е. Хатламаджиян [и др.] // Автоматика на транспорте. – 2024. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/formirovanie-obektivnyh-pokazateley-raboty-sortirovochnoy-stantsii-na-osnove-dannyh-ot-kolesa> (дата обращения: 16.02.2025).
 7. Бочков К. А., Харлап С. Н. Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов / К. А. Бочков, С. Н. Харлап // Проблемы оценки показателей функциональной безопасности систем технического зрения. – 2023. – С. 200-203.
 8. Ge, Z.; Liu, S.; Wang, F.; Li, Z.; Sun, J. YOLOX: Exceeding yolo series in 2021. arXiv 2021, arXiv:2107.08430.
 9. Meng T. [et al.]. A survey on machine learning for data fusion / T. Meng [et al.] // Information Fusion. 2020. Т. 57. Р. 115–129.
 10. Макарова А.А. Автоматизированная система оперативного управления перевозками / А.А. Макарова // Экосистема цифровой экономики: проблемы, реалии и перспективы. Орел: ОрелГУЭТ, 2018. С.114–118.
 11. Thatikonda M. [et al.]. Dynamic Confidence Threshold Estimation / M. Thatikonda [et al.] // IEEE NAECON. 2024. DOI: 10.1109/NAECON61878.2024.10670627.
-

УДК 004.89

ОТКРЫТЫЙ ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ РОБОТОВ НА РАЗРЕЖЕННОЙ 3D-КАРТЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ МЕСТА

Юдин Д.А., к.т.н., зав. лабораторией, МФТИ, AIRI, Москва, Россия

E-mail: yudin.da@mipt.ru

Мелехин А.А., инженер, МФТИ, Москва, Россия

E-mail: melekhin.aa@mipt.ru

Линок С.А., мл.научный сотрудник, МФТИ, Москва, Россия

E-mail: linok.sa@phystech.edu

Аннотация

В интеллектуальном транспорте при построении 3D-карт часто возникает необходимость повышения качества глобальной локализации на построенной заранее карте, например, для первоначальной локализации при включении робота без дополнительной помощи в виде ручной установки его положения. Для решения этой проблемы в настоящей статье предлагается оригинальная архитектура подхода иерархической локализации, отличающаяся мультимодальной моделью распознавания места по данным видеокамер и лидара и быстродействующим нейросетевым алгоритмом регистрации облаков точек. Разработана и размещена в открытый доступ программная реализация предложенной архитектуры, которая включена в открытую библиотеку OpenPlaceRecognition. Проведены эксперименты с открытыми наборами данных реальных мобильных роботов NCLT и ITLP-Campus, которые продемонстрировали время работы менее 100 мс и достаточный уровень качества на встраиваемом устройстве Nvidia Jetson AGX Xavier. Показана перспективность подхода для практического применения.

Ключевые слова: интеллектуальное транспортное средство, иерархическая локализация, 3D-карта, распознавание места, нейронная сеть, мультимодальность

OPEN SOFTWARE FOR HIERARCHICAL LOCALIZATION OF ROBOTS ON A SPARSED 3D MAP USING MULTIMODAL PLACE RECOGNITION

Yudin D.A., Ph.D., Head of the laboratory, MIPT, AIRI, Moscow, Russia

E-mail: yudin.da@mipt.ru

Melekhin A.A., engineer, MIPT, Moscow, Russia

E-mail: melekhin.aa@mipt.ru

Linok S.A., Junior Researcher, MIPT, Moscow, Russia

E-mail: linok.sa@phystech.edu

Abstract

In intelligent transport, when constructing 3D maps, there is often a need to improve the quality of global localization on a pre-built map, for example, for initial localization when turning on a robot without additional assistance in the form of manual setting of its position. To solve this problem, this paper proposes an original architecture of the hierarchical localization approach, characterized by a multimodal model of place recognition based on video camera and LiDAR data and a high-speed neural network algorithm for point cloud registration. A software implementation of the proposed architecture has been developed and open sources as a part of OpenPlaceRecognition library. Experiments have been conducted with open datasets of real mobile robots NCLT and ITLP-Campus, which demonstrated an operating time of less than 100 ms and a sufficient level of quality on an embedded Nvidia Jetson AGX Xavier device. The prospects of the approach for practical application are shown.

Keywords: intelligent vehicle, hierarchical localization, 3D map, place recognition, neural network, multimodality

Введение

В мобильной робототехнике и интеллектуальном транспорте при построении 3D-карт часто возникает необходимость глобальной коррекции с помощью поиска петель (loop detection) - глобальной локализации на построенной заранее карте. Кроме того, без глобальной корректировки возможно дублирование объектов на построенных роботами картах, что может стать проблемой как для навигации, так и решения задач манипулирования. Еще одной практической проблемой часто является первоначальная локализация при включении робота без дополнительной помощи в виде ручной установки его положения.

Все эти проблемы может помочь преодолеть иерархическая локализация [1], которая на первом этапе использует нейросетевой подход распознавания места, позволяющий выучивать уникальные векторные представления (эмбединги), отличающие одно место на карте от другого, а на втором этапе позволяет уточнить найденную позу робота с помощью алгоритма регистрации облаков точек. Такой подход также позволяет экономить вычислительные ресурсы за счет построения разреженных 3D-карт, в которые сохраняется информация только от ключевых кадров, при этом сохраняя высокое качество локализации. Это дает им преимущество перед алгоритмами создания плотных карт местности [4], которые сложно масштабировать на большие пространства. В частности, этот факт подтверждают работы PRISM-ТороМар [11] и HPointLoc [5], демонстрирующие возможности локализации интеллектуального агента в помещениях.

В то же время, остаются ограничения, связанные с быстродействием методов иерархической локализации при использовании нескольких источников данных разной модальности. Они, как правило, имеют существенные сложности с запуском на встраиваемых бортовых устройствах роботов. В настоящей статье уделяется особое внимание преодолению этого ограничения и созданию программной реализации подхода нейросетевой иерархической локализации на основе мультимодальной модели распознавания места (см. Рис. 1).



Рисунок 1. Задача мультимодального распознавания места по разреженной 3D-карте

Основным вкладом настоящей статьи является:

- Предлагается оригинальная архитектура подхода иерархической локализации, отличающаяся мультимодальной моделью распознавания места по данным видеокамер и лидара и быстродействующим нейросетевым алгоритмом регистрации облаков точек.

- Разработана и размещена в открытый доступ программная реализация предложенной архитектуры, которая включена в открытую библиотеку OpenPlaceRecognition¹¹.
- Проведены эксперименты с открытыми наборами данных реальных мобильных роботов NCLT [21] и ITLP-Campus [22], которые продемонстрировали время работы менее 100 мс и достаточный уровень качества на встраиваемом устройстве Nvidia Jetson AGX Xavier.

1. Анализ предметной области

1.1. Анализ методов мультимодального распознавания места

Одновременное использование данных разных модальностей является отдельным направлением в задаче распознавания места. Метод MinkLoc++ [7] является развитием более раннего MinkLoc3D, в котором авторы добавили нейросеть на базе ResNet18 с GeM-пулингом для извлечения дескрипторов изображений с камеры. Дескриптор для облаков точек лидара извлекается с помощью уже описанной ранее сети MinkLoc3D, после чего два дескриптора объединяются в один с помощью конкатенации.

Отличительной чертой метода AdaFusion [8] является использование блоков с механизмом внимания в промежуточных слоях сверточных сетей, по-отдельности извлекающих признаки для изображений и облаков точек. Полученные карты внимания затем с помощью Global Average пулинга превращаются в вектора и с помощью полносвязных слоев кодируются в два числовых значения, имеющих смысл весов для дескрипторов изображения и лидара, соответственно.

Авторы метода MMDF [9] осуществляют более глубокое объединение признаков путем проецирования облаков точек на изображение и слияние промежуточных признаков внутри двух веток нейросети.

Существует также мультисенсорный мультимодальный подход MSSPlace [10], который осуществляет позднее комплексирование признаков, формируемых энкодеров различных модальностей, в том числе явно содержащих семантическую информацию. Его модульная архитектура позволяет расширять количество используемых сенсоров без дополнительного дообучения нейросетевой модели. Его вариант реализации на основе данных лидара и камеры хорошо себя зарекомендовал для задачи топологической одновременной локализации и построения карты, о чем свидетельствуют результаты в работе PRISM-ToroMap [11].

1.2. Анализ методов регистрации облаков точек

Классическим подходом к решению задачи регистрации облаков точек (оптимизации положения и ориентации) является нахождение соответствий между ключевыми точками и решение PnP-задачи оптимизации с помощью таких методов как RANSAC [12], ICP [13], графовый G2O [14], а также современный и устойчивый к выбросам TEASER [15]. Однако в случае, когда облака точек, между которыми нужно найти преобразование систем координат, слабо пересекаются, имеют шумы (в условиях присутствия динамических объектов на сцене), аналитические оптимизационные методы могут иметь существенные ошибки. Разработка и исследование обучаемых методов было призвано преодолеть такие ограничения.

¹¹ <https://github.com/OPR-Project/OpenPlaceRecognition/blob/main/src/opr/pipelines/localization/base.py>

Среди современных нейросетевых методов регистрации облаков точек можно выделить HRegNet [17], GeoTransformer [16] и DMS [18]. В Таб. 1 приведены метрики качества методов на датасете KITTI Odometry [19], указанные в оригинальных статьях. Данный датасет содержит последовательности лидарных данных, записанные с помощью автомобиля на улицах города. Датасет содержит несколько траекторий, часть из которых повторяется, благодаря чему его часто используют для обучения и валидации методов SLAM, визуальной одометрии, оптимизации позы и распознавания места. Модели GeoTransformer [16] и DMS [18] показывают более высокую точность, однако работают значительно медленнее и более требовательны к вычислительным ресурсам, что затрудняет их использование в режиме реального времени, когда скорость обработки одной пары облаков точек должна быть не более 100 мс.

Таблица 1. Сравнение современных нейросетевых методов регистрации облаков точек на датасете KITTI Odometry. Метрики из оригинальных статей.

Метод	Registration Recall ↑, %	RRE ↓, °	RTE ↓, м	Время итерации ↓, мс
HRegNet [17]	99,7	0,29	0,0120	~89
GeoTransformer [16]	99,8	0,24	0,0068	~234
DMS [18]	99,8	0,27	0,0067	~396

2. Предлагаемый подход иерархической локализации интеллектуального транспортного средства на разреженной 3D-карте

2.1. Общая постановка задачи и подход к ее решению

На Рис. 2 показана предлагаемая оригинальная архитектура подхода иерархической локализации, отличающаяся мультимодальной моделью распознавания места по данным видеокамер и лидара и быстродействующим нейросетевым алгоритмом регистрации облаков точек. Она отличается оригинальным нейросетевым алгоритмом мультимодального места и доработанной быстрой нейросетевой моделью вычисления трансформации для сопоставленных ключевых точек

В двух последующих подразделах приведены детали реализации архитектуры. Важными требованиями, которые предъявлялись к архитектуре являлись:

- использование на обоих этапах иерархической локализации обучаемых алгоритмов на основе нейросетевых моделей, что является в настоящее время одной из характерных тенденций;
- обеспечение обработки входных фреймов данных в реальном времени, причем рассматривается один из наиболее распространенных случаев в мобильной робототехнике, когда данные поступают с периодичностью в 100 мс. Частоты обработки входных данных в 10Гц обычно хватает, чтобы решать задачи навигации и реагирования на возникающие препятствия для медленно-движущихся наземных роботов (до 10 км/ч).

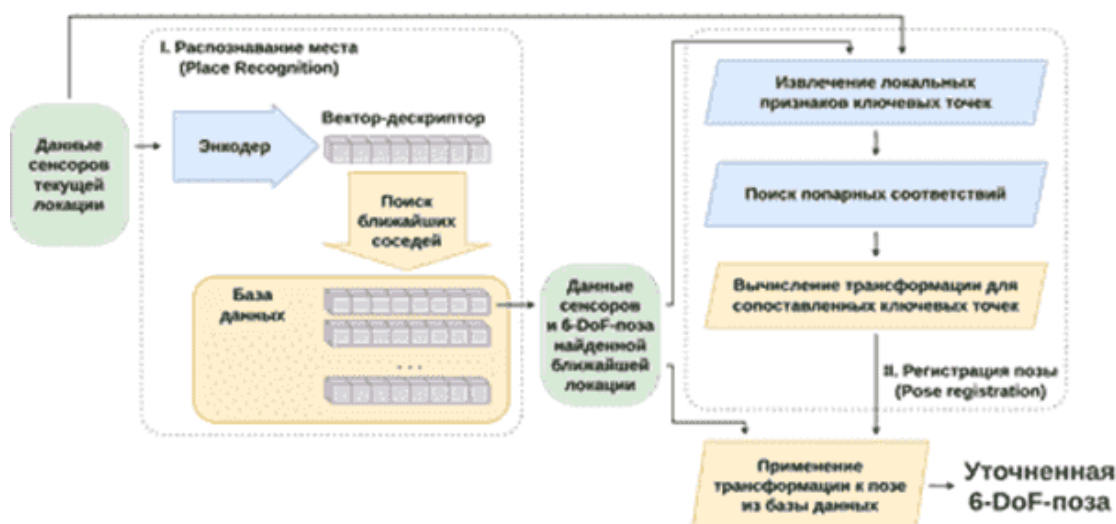


Рисунок 2. Укрупненная схема предлагаемого подхода иерархической локализации интеллектуального транспортного средства на разреженной 3D-карте

2.2. Модуль мультимодального распознавания места

На Рис. 3 изображен один из вариантов разработанной нейросетевой архитектуры метода формирования векторного представления текущего места с использованием изображений с нескольких камер, результатов их семантической сегментации, текстовых описаний и облака точек лидара. В настоящей статье использовалась модификация архитектуры модели MSSPlace [10], которая использует изображения двух камер и облака точек лидара.

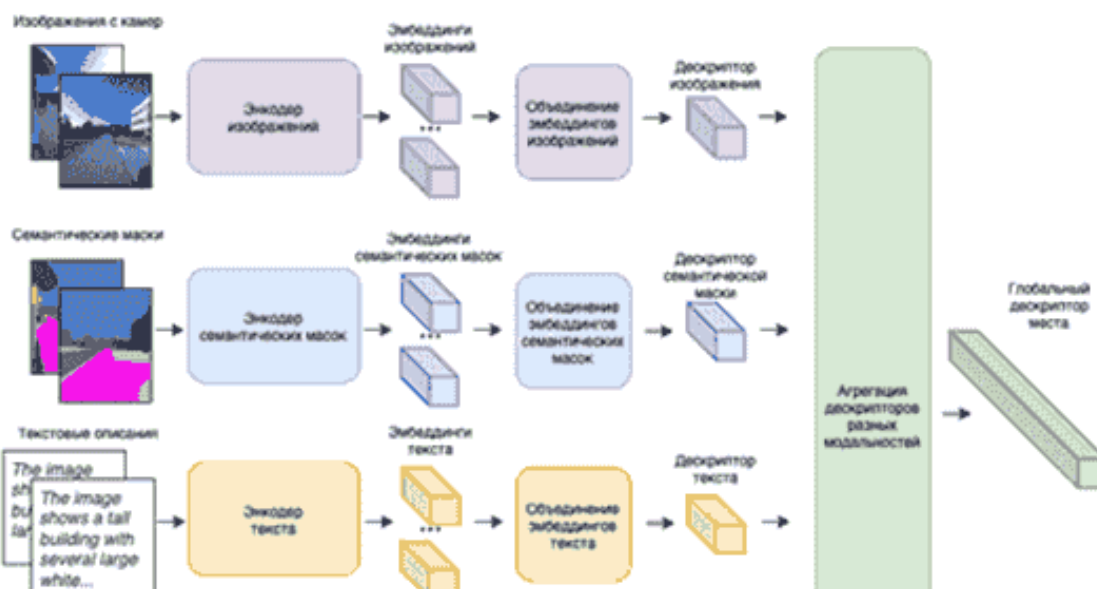


Рисунок 3. Архитектура применяемой модели мультимодального распознавания места MSSPlace, осуществляющего поиск в базе данных наиболее похожих записей по изображениям с нескольких камер, результатам их семантической сегментации, текстовым описаниям и облаку точек лидара

2.3 Нейросетевой модуль регистрации облаков точек в реальном времени

Для решения поставленной задачи модель HRegNet [17] была модифицирована путем замены модели оптимизации позы на более быструю архитектуру HRegNet Light. Данный метод использует иерархический подход локализации, при котором признаковые описания для облаков точек извлекаются на нескольких уровнях, и выполняется три шага: грубая (coarse) оптимизация с использованием высокоуровневых признаков и два шага уточненной (fine) оптимизации с использованием низкоуровневых признаков.

2.4. Программная реализация подхода в библиотеке OpenPlaceRecognition

В составе библиотеки OpenPlaceRecognition [20] разработан класс Localization-Pipeline, реализующий алгоритмы иерархической локализации в удобном для использования монолитном (end-to-end) интерфейсе. Он объединяет программную реализацию алгоритма мультимодального распознавания места (PlaceRecognitionPipeline) и алгоритм регистрации облаков точек (RegistrationPipeline) (см. Рис. 4).

2.5. Количественная оценка качества предлагаемого подхода

В настоящей статье оценка качества разработанного подхода осуществлялась на основе количественных метрик, которые вычислялись по двум комбинациям треков (где один из треков - query, а второй - database) и усреднялись. Метрика R@1 (25м) показывает процент правильно определенных мест с порогом попадания 25 метров, если в качестве места в базе брать top1 из найденных по запросу (чем больше метрика, тем лучше). Аббревиатуры RRE и RTE расшифровываются как Relative Rotation Error и Relative Translation Error (чем меньше метрики, тем лучше). Важно отметить, что медианные значения метрик RRE и RTE в данной задаче являются более репрезентативными, так как более устойчивы к выбросам.

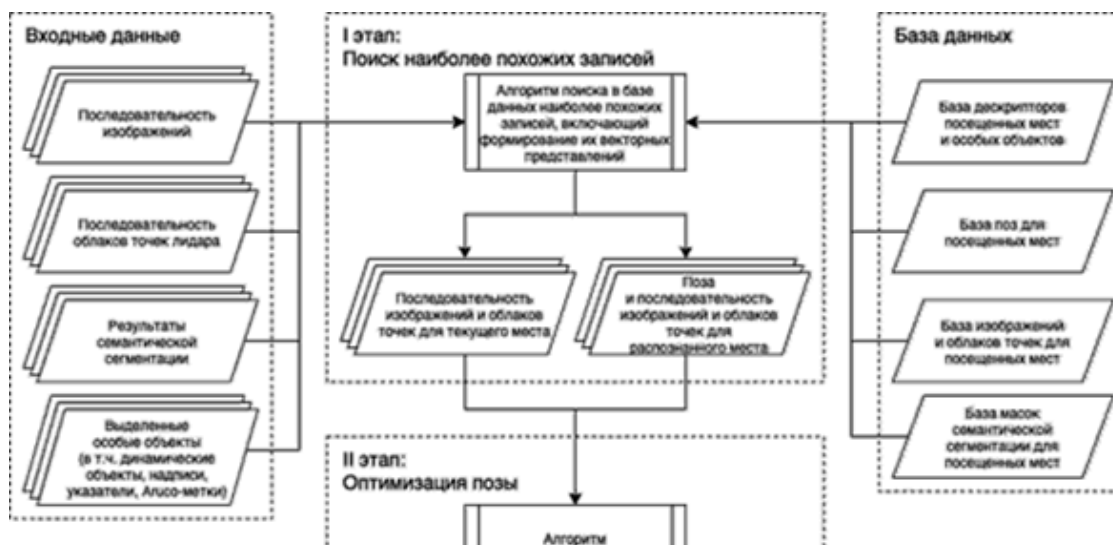


Рисунок 4. Схема алгоритма иерархической локализации, реализованная в библиотеке OpenPlaceRecognition

3. Результаты экспериментов

Эксперименты с предложенным подходом иерархической локализации транспортного средства осуществлялись на публичном наборе данных NCLT [21] (см. Таб. 2). Для тестирования были отобраны два трека – '2012-01-08' и '2012-01-22', использовался участок траектории, который отсутствовал в обучающей выборке, в качестве данных рассматривались изображения 2 камер (передней и задней), и облака точек лидара.

Таблица 2. Результаты иерархической локализации предлагаемым подходом на наборе данных NCLT

Метод	AR@1 ↑, %	Avg Median RRE ↓, °	Avg Median RTE ↓, m	Mean Time ↓, ms
Multimodal Place Recognition (Baseline)	92,80	6,65	4,47	25,85
Baseline + GeoTrans- former	92,51	2,36	0,23	234,73
Baseline + HRegNet- Light Coarse + outlier filtering	<u>92,78</u>	5,13	2,91	77,26

В составе подхода предложенная модель HRegNet-Light Coarse показывает менее высокие метрики в сравнении с ранее использованной GeoTransformer, однако качество остается в пределах допустимого (Recall@1 не менее 90%, ошибка позиционирования RTE не более 5 м, ошибка ориентации RRE не более 20°), при этом достигнута требуемая скорость работы (не более 100 мс на итерацию). Быстродействие указано для вычислителя с CPU AMD Ryzen 5 3500 6-Core, GPU NVIDIA RTX 3060 12 GB, а также для встраиваемой платформы Jetson AGX Xavier.

На Рис. 5 – 6 показаны характерные примеры успешной работы предложенного подхода иерархической локализации как в помещениях, так и на улице. Также на

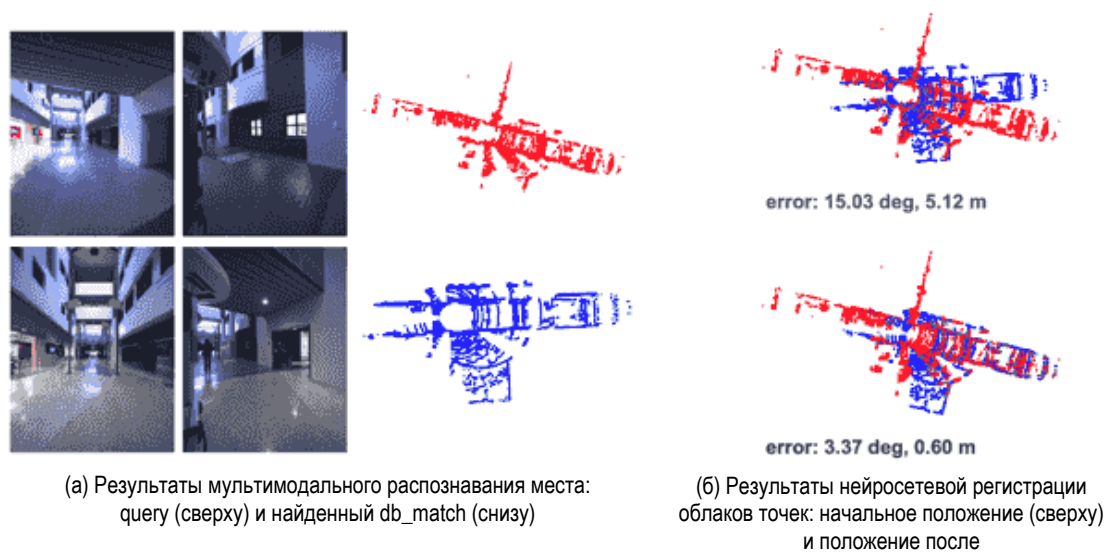


Рисунок 5. Результаты визуализации предлагаемого подхода иерархической локализации в помещениях

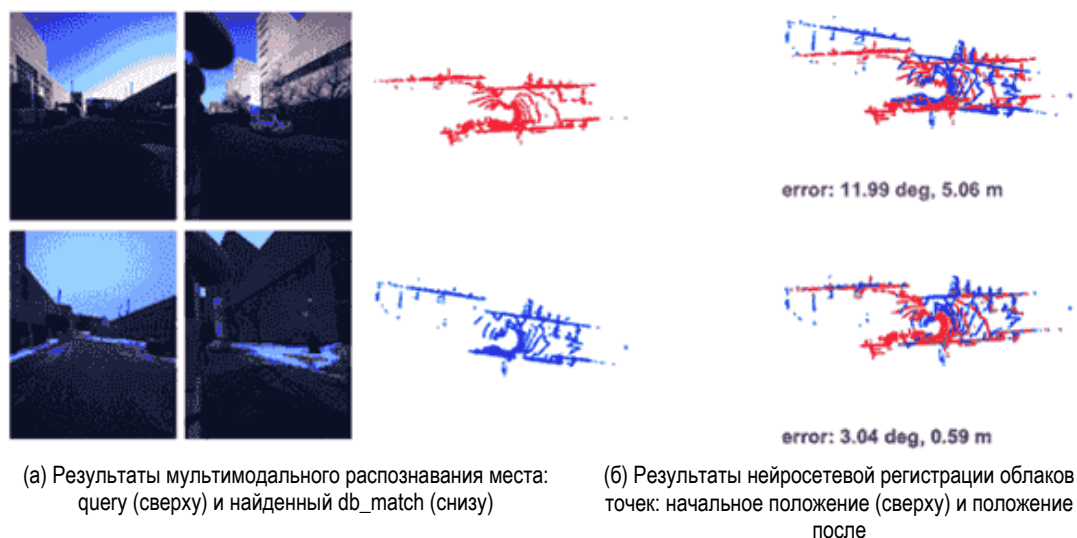


Рисунок 6. Результаты визуализации предлагаемого подхода иерархической локализации на уличной сцене

Рис. 7 показан один из примеров неудачной локализации в помещениях в длинных коридорах, который является ограничением предложенного подхода и может быть преодолен на основе использования последовательностей данных, текстовых надписей, графов сцены и иных нейро-символьных представлений сцен [6]. Это является объектом будущих исследований как продолжение настоящей работы.

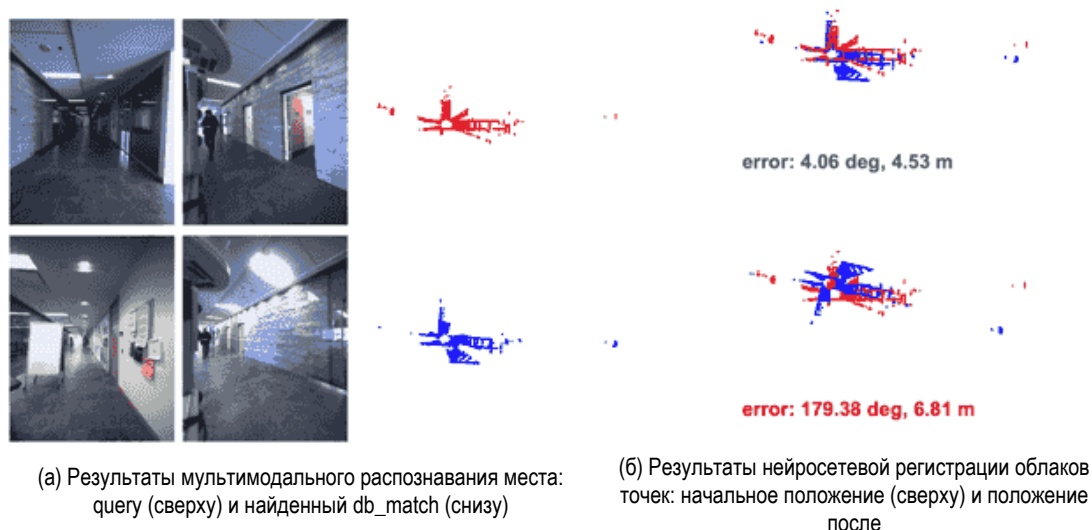


Рисунок 7. Пример ошибочной иерархической локализации в помещениях

Проведены эксперименты с четырьмя разработанными конфигурациями нейросетевой модели HRegNet, код реализации которых находится в репозитории OpenPlaceRecognition: Original¹², Light Coarse¹³, NoSim¹⁴, Light Fine¹⁵. Дополнительно реализован алгоритм фильтрации выбросов. Результаты этих экспериментов показаны в Таб.3. Каждая следующая конфигурация улучшает быстродействие метода ценой падения качества. Благодаря этому имеется возможность выбирать наиболее подходящую конфигурацию в зависимости от технических требований.

Таблица 3. Результаты экспериментов по повышению быстродействия нейросетевой модели регистрации облаков точек на основе архитектуры HRegNet с использованием базового метода мультимодального распознавания места на наборе данных NCLT

Нейросетевая модель регистрации облаков точек	Алгоритм фильтрации выбросов	AR@1↑, %	Avg Median RRE↓, °	Avg Median RTE ↓, m	Mean Time ↓, ms (Jetson AGX Xavier)	Mean Time ↓, ms (RTX 3060)
HRegNet-Original	×	88,77	3,83	1,87	114,61	89,0
HRegNet-NoSim	×	90,74	5,02	3,44	92,02	83,0
HRegNet-NoSim	✓	<u>92,63</u>	<u>4,50</u>	<u>2,59</u>	92,02	83,0
HRegNet-Light Fine	×	90,99	4,86	3,56	<u>82,67</u>	<u>59,0</u>
HRegNet-Light Fine	✓	92,78	5,30	3,26	<u>82,67</u>	<u>59,0</u>
HRegNet-Light Coarse	×	91,63	7,44	4,20	77,26	50,0
HRegNet-Light Coarse	✓	92,78	5,13	2,91	77,26	50,0

Также было произведено тестирование разработанного подхода в условиях натурных экспериментов, которое осуществлялось с помощью робота Clearpath Husky и узла LocalizationNode в составе ROS-2 реализации разработанной библиотеки OpenPlaceRecognition-ROS2 [23]. Для тестирования модуля был проведен эксперимент с проездом по территории кампуса МФТИ, который в том числе представлен в датасете ITLP-Campus [22]. В качестве базы данных во время эксперимента использовались данные из трека “05_2023-08-15” датасета ITLP-Campus-Outdoor.

Для визуализации работы узла использовался узел VisualizerNode. ROS2-сообщения с визуализациями просматривались с помощью утилиты RViz2. На представленных визуализациях изображения слева – данные эксперимента, изображения справа – найденные совпадения в базе данных. Примеры визуализаций приведены на Рис. 7.

¹² configs/model/registration/hregnet.yaml

¹³ configs/model/registration/hregnet_coarse.yaml

¹⁴ configs/model/registration/hregnet_nosim.yaml

¹⁵ configs/model/registration/hregnet_light_feats.yaml

Быстродействие нейросетевого модуля иерархической локализации, входящего в состав узла LocalizationNode, составило 91.16 ± 4.87 мс, что говорит о перспективах его практического применения.

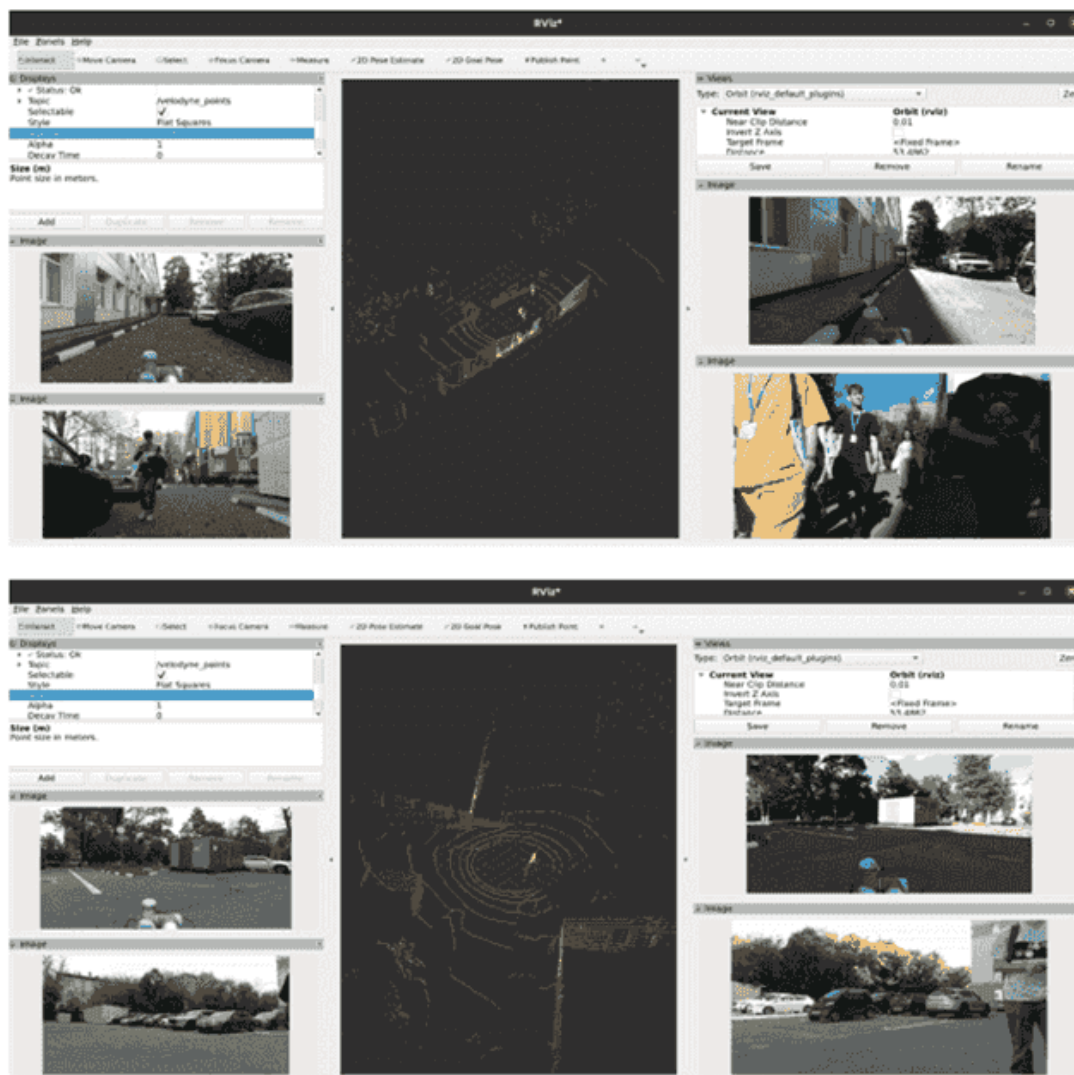


Рисунок 8. – Примеры корректной работы модуля иерархической локализации в составе узла LocalizationNode

Заключение

В настоящей статье рассмотрен нейросетевой вариант решения задачи иерархической локализации в реальном времени, в котором начальная оценка положения находится с помощью мультимодального нейросетевого метода распознавания места, а потом уточняется с помощью обучаемого алгоритма регистрации облаков точек. Разработанный подход демонстрирует время выполнения менее 100 мс на встраиваемых устройствах, что говорит о высоком потенциале применения подхода.

Разработана и успешно протестирована программная реализация иерархической локализации в составе библиотеки OpenPlaceRecognition, которая обеспечила удобный унифицированный интерфейс для использования различных открытых и оригинальных методов распознавания места и регистрации облаков точек, в том числе с использованием операционной системой роботов ROS2.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям для реализации проекта “Открытая программная библиотека мультимодальной нейросетевой глобальной локализации транспортного средства” Договор 34ГУКодИИС12-D7/81485 от 07.12.2022.

Список использованной литературы

1. Sarlin P. E. et al. From coarse to fine: Robust hierarchical localization at large scale //Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition. – 2019. – С. 12716-12725.
2. Garg S., Fischer T., Milford M. Where Is Your Place, Visual Place Recognition? //Proceedings of the Thirtieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-21). – International Joint Conferences on Artificial Intelligence, 2021. – С. 4416-4425.
3. Zhang Y. X. et al. A comprehensive survey and taxonomy on point cloud registration based on deep learning //Proceedings of the Thirty-Third International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 2024. – С. 8344-8353.
4. Belkin, I. V., Abramenko, A. A., Bezuglyi, V. D., Yudin, D. A. Localization of mobile robot in prior 3D LiDAR maps using stereo image sequence. Компьютерная оптика. – 2024. – № 48(3) – 406-417.
5. Yudin D. et al. Hpointloc: Point-based indoor place recognition using synthetic rgb-d images //International Conference on Neural Information Processing. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – С. 471-484.
6. Kirilenko D. et al. Vector symbolic scene representation for semantic place recognition //2022 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). – IEEE, 2022. – С. 1-8.
7. J. Komorowski, M. Wysoczańska, and T. Trzcinski, MinkLoc++: Lidar and Monocular Image Fusion for Place Recognition, in 2021 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Jul. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/IJCNN52387.2021.9533373.
8. H. Lai, P. Yin, and S. Scherer, AdaFusion: Visual-LiDAR Fusion With Adaptive Weights for Place Recognition, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 4, pp. 12038–12045, Oct. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3210880.
9. X. Yu, B. Zhou, Z. Chang, K. Qian, and F. Fang, MMDF: Multi-Modal Deep Feature Based Place Recognition of Mobile Robots With Applications on Cross-Scene Navigation, IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 7, no. 3, pp. 6742–6749, Jul. 2022, doi: 10.1109/LRA.2022.3176731.
10. Melekhin, A., Yudin, D., Petryashin, I., Bezuglyj, V. Mssplace: multi-sensor place recognition with visual and text semantics // arXiv preprint arXiv:2407.15663, 2024
11. Muravyev, K., Melekhin, A., Yudin, D., Yakovlev, K. PRISM-TopoMap: online topological mapping with place recognition and scan matching // IEEE Robotics and Automation Letters. 2025.
12. M. A. Fischler and R. C. Bolles, Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, Commun. ACM, vol. 24, no. 6, pp. 381–395, Jun. 1981, doi: 10.1145/358669.358692.
13. Z. Zhang, Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, Int J Comput Vision, vol. 13, no. 2, pp. 119–152, Oct. 1994, doi: 10.1007/BF01427149.
14. R. Kümmerle, G. Grisetti, H. Strasdat, K. Konolige, and W. Burgard, G2o: A general framework for graph optimization, in 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2011, pp. 3607–3613. doi: 10.1109/ICRA.2011.5979949.
15. H. Yang, J. Shi, and L. Carlone, TEASER: Fast and Certifiable Point Cloud Registration, IEEE Transactions on Robotics, vol. 37, no. 2, pp. 314–333, Apr. 2021, doi: 10.1109/TRO.2020.3033695.

16. Qin Z. et al. Geotransformer: Fast and robust point cloud registration with geometric transformer //IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2023. – Т. 45. – №. 8. – С. 9806-9821.
 17. Lu F. et al. Hregnet: A hierarchical network for large-scale outdoor lidar point cloud registration //Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. – 2021. – С. 16014-16023.
 18. Cao H., Wang Y., Li D. Dms: Low-overlap registration of 3d point clouds with double-layer multi-scale star-graph //IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2024.
 19. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? the kitti vision benchmark suite //2012 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. – IEEE, 2012. – С. 3354-3361.
 20. OpenPlaceRecognition. URL: <https://github.com/OPR-Project/OpenPlaceRecognition>
 21. Carlevaris-Bianco N., Ushani A. K., Eustice R. M. University of Michigan North Campus long-term vision and lidar dataset //The International Journal of Robotics Research. – 2016. – Т. 35. – №. 9. – С. 1023-1035.
 22. Melekhin, A., Bezuglyj, V., Petryashin, I., Muravyev, K., Linok, S., Yudin, D., Panov, A. ITLP-Campus: A Dataset for Multimodal Semantic Place Recognition. In International Conference on Intelligent Information Technologies for Industry. – 2024. – pp. 185-195.
 23. ROS-2 реализация разработанной библиотеки OpenPlaceRecognition. <https://github.com/OPR-Project/OpenPlaceRecognition-ROS2>.
-

УДК 004.052.2

ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗНАНИЙ В ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Дулин С.К., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, АО «НИИАС»;

ИПИ ФИЦ ИУ РАН, Москва, Россия, E-mail: skdulin@mail.ru

Духин С.В., к.т.н., начальник Научно-технического комплекса, АО «НИИАС»,

Москва, Россия, E-mail: s.duhin@vniias.ru

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме интеграции знаний о транспортной инфраструктуре в геоинформационной системе. Авторы обосновывают необходимость более глубокого понимания и формализации геопространственных знаний, их структуры и взаимосвязей, для автоматизации анализа и оценки размещения транспортной инфраструктуры. В статье обсуждается организация геопространственных знаний при решении задач, в которых необходим анализ специфики местности. Логико-семантический анализ позволяет описать особенности геопространственных знаний. Научно-прикладное значение геопространственных знаний в этом контексте заключается в возможности оптимизации различных процессов, связанных с транспортной инфраструктурой. Предложенный авторами подход к моделированию геопространственных знаний и их компьютерной реализации включает не только формальные методы представления знаний, но и методы обработки реальных геопространственных данных. Авторы обращают внимание на вопросы визуализации результатов анализа, чтобы обеспечить простоту использования разработанных систем для специалистов разного уровня подготовки.

Ключевые слова: геопространственные знания, геопространственные данные, геопространственная информация

FORMATION OF GEOSPATIAL KNOWLEDGE IN THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE

Dulin S.K., Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, JSC NIAS;

IPI FIC IA RAS, Moscow, Russia, E-mail: skdulin@mail.ru

Dukhin S.V., Ph.D., Head of the Scientific and Technical Complex, JSC NIAS, Moscow, Russia,

E-mail: s.duhin@vniias.ru

Abstract

The article is devoted to the actual problem of integrating knowledge about transport infrastructure in a geographic information system. The authors substantiate the need for a deeper understanding and formalization of geospatial knowledge, their structure and interrelations to automate the analysis and assessment of the location of transport infrastructure. The article discusses the organization of geospatial knowledge in solving problems in which it is necessary to analyze the specifics of the terrain. Logical-semantic analysis allows you to describe the features of geospatial knowledge. The scientific and applied value of geospatial knowledge in this context lies in the possibility of optimizing various processes related to transport infrastructure. The approach proposed by the authors to the modeling of geospatial knowledge and its computer implementation includes not only formal methods of knowledge representation, but also methods of processing real geospatial data. The authors pay attention to the issues of visualization of the analysis results in order to ensure the ease of use of the developed systems for specialists of different levels of training.

Keywords: geospatial knowledge, geospatial data, geospatial information

Введение

Стремительное развитие компьютерных технологий и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) породило лавинообразный рост объемов геопространственных данных и, как следствие, резко увеличило требования к системам их обработки и управления. При этом глубокое понимание сути геопространственных данных и их тщательный анализ при размещении транспортной инфраструктуры на местности является определяющим фактором эффективной реализации. Современные ГИС кардинально отличаются от своих предшественников. Они интегрированы, масштабируемы, распределенные, облачные и, что особенно важно, интеллектуальны, обладая способностью к самообучению и адаптации. Ключевая задача настоящего момента – максимально упростить взаимодействие пользователя с данными, минимизируя рутинные операции по предварительной обработке и подготовке к анализу. Идеальная ГИС будущего должна предоставлять пользователю готовые, легко интерпретируемые результаты через веб-интерфейс, независимо от местонахождения и формата исходных данных. Эта цель достижима лишь при решении целого ряда сложных задач:

Во-первых, необходимо разработать эффективные механизмы управления огромными, распределенными и разнородными массивами геоданных. Речь идет о петабайтах и экзбайтах данных, получаемых из различных источников: спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешения (с учетом различных спектральных диапазонов, включая гиперспектральные и мультиспектральные данные), данных LiDAR, аэрофотосъемки, сенсоров Интернета вещей (IoT) и разнообразных наземных измерений. Все эти данные хранятся в различных форматах, и задача их унификации и интеграции представляет собой значительный вызов. Разработка эффективных систем хранения и доступа к таким объемам данных часто опирается на облачные технологии, распределенные файловые системы (например, Hadoop Distributed File System – HDFS) и базы данных NoSQL, специально разработанные для работы с большими данными.

Во-вторых, необходимо реализовать интеллектуальные механизмы извлечения релевантного знания. Пользователь не должен разбираться в тонкостях работы с данными; система должна самостоятельно интерпретировать запрос и предоставлять ему именно ту информацию, которая ему необходима. Здесь на помощь приходят методы искусственного интеллекта (ИИ), включая машинное обучение (ML) и глубокое обучение (DL). Например, нейронные сети могут быть использованы для автоматической классификации объектов на спутниковых снимках, обнаружения изменений, прогнозирования и других задач пространственного анализа. Кроме того, важную роль играют технологии обработки естественного языка (NLP) для понимания пользовательских запросов, сформулированных на естественном языке.

В-третьих, необходимо обеспечить быстрый и эффективный пространственно-временной поиск. Объектно-ориентированный подход к моделированию геоданных позволяет создавать более гибкие и эффективные системы поиска. Для ускорения поиска используются пространственные индексы (например, R-tree, quadtree), а также различные оптимизационные алгоритмы.

Интеграция ГИС и методов пространственного анализа сформировала междисциплинарную область – географическую информатику, которая синтезирует точную геометрию, характерную для ГИС, с глубоким анализом пространственных паттернов, корреляций и трендов, которые являются объектом исследования пространственного анализа. Географическая информация, в отличие от просто про-

пространственных данных, несет в себе семантическую нагрузку, контекст и специфические атрибуты, существенно ограничивающие пространство возможных интерпретаций. Превращение данных в знания требует сложного процесса интерпретации и моделирования, что подчеркивает важность интеграции ИИ в современные ГИС. Взаимодействие с такими системами будет осуществляться через интуитивно понятные интерфейсы, возможно, с использованием виртуальной и дополненной реальности, для более эффективного восприятия и анализа пространственной информации. Таким образом, будущее ГИС – это интеллектуальные, масштабируемые и ориентированные на пользователя системы, тесно интегрированные с методами ИИ и обеспечивающие быстрый доступ к релевантной информации в любое время и в любом месте.

Термин "географическая информация" не синоним "пространственной информации", а её более узкое, специализированное подмножество. В то время как "пространственная информация" описывает расположение объектов в абстрактном пространстве, "географическая информация" сосредоточена на земной поверхности и её характеристиках, включая не только положение объектов, но и их взаимосвязи, исторические изменения, природные и антропогенные факторы, влияющие на их существование и взаимодействие. Эта специализация вносит существенные коррективы в методы анализа и обработки данных. Теория географической информации, будучи частью более общей теории пространственной информации, расширяет её, вводя новые понятия и алгоритмы, учитывающие специфику географических данных. Например, в географической информации критическую роль играет геоид, земная эллипсоидальная модель и система координат, которые не являются столь важными в общей пространственной теории. Более того, географические данные часто характеризуются неполнотой, неоднородностью и неточностью, что требует применения специфических методов обработки и анализа, отличных от тех, что используются для работы с "чистыми" пространственными данными. Различные системы координат (географические, проекции Гаусса-Крюгера, UTM и др.), системы высот (балтийская, нормальная) и способы их преобразования составляют существенную часть теории географической информации.

Понятие "знание" в контексте географической существенно большее, чем просто данные. Знание включает в себя не только сами данные, но и их интерпретацию, контекст, связи между различными фрагментами информации, а также метаданные, описывающие точность, происхождение и достоверность данных. В геоинформатике знание представляет собой совокупность фактов, моделей и правил, позволяющих интерпретировать географические данные и извлекать из них полезную информацию. Знания обладают следующими свойствами, которые часто используются в качестве их определения:

- внутренняя интерпретируемость;
- структурированность;
- связность;
- семантическая метрика;
- активность.

Для представления знаний в системах геоинформатики используются различные методы, включая семантические сети, онтологии, правила производства и нейронные сети. Выбор метода зависит от конкретной задачи и характера используемых данных.

1. Логико-семантический анализ понятия «геопространственные знания»

Понятие геопространственных знаний (ГПЗ) в геоинформатике – это уже не новая, но стремительно развивающаяся область исследования, тесно связанная с обработкой и анализом геопространственных данных. Часто возникает путаница в терминах: «данные о местности», «информация о местности» и «знания о местности». Хотя все три понятия имеют пересекающиеся области, их ключевые отличия становятся очевидны при рассмотрении конкретных задач геопространственного анализа. Разъяснение этих различий и определение роли ГПЗ в геоинформатике является критическим шагом для развития данной области.

Для ясного понимания, необходимо проанализировать смысловое содержание и сферу применения геопространственных данных (ГПД), геопространственной информации (ГПИ) и ГПЗ [1]. ГПД – это сырые, необработанные факты, представленные в цифровом или аналоговом виде. ГПД сами по себе не несут смысловой нагрузки, требуя интерпретации и обработки.

ГПИ, в свою очередь, представляет собой результат обработки и интерпретации ГПД. Это уже структурированная и осмысленная информация, представляющая собой описание реальных объектов или явлений в географическом пространстве. ГПИ может быть представлена в различных форматах: карты, таблицы, базы данных, 3D-модели и т.д. Она может быть статической (например, историческая карта) или динамической (например, данные о движении транспорта в реальном времени).

ГПЗ же находятся на более высоком уровне абстракции. Это не просто данные или информация, а обобщенное понимание, интерпретация и оценка географических явлений и процессов. ГПЗ включают в себя не только фактические данные, но и модели, теории, экспертные оценки, практический опыт и интуитивное понимание [2]. ГПЗ позволяют принимать информированные решения, предсказывать будущие события и разрабатывать эффективные стратегии.

Современные ГИС способны обрабатывать большие объемы ГПД и создавать различные виды ГПИ. Однако, автоматический вывод ГПЗ из ГПИ является одной из самых сложных задач современной геоинформатики. Разработка алгоритмов и моделей для извлечения знаний из геопространственных данных требует междисциплинарного подхода, объединяющего знания в области информатики, географии, экологии и других наук.

Важно отметить, что ГПИ, как и любая информация, может быть представлена в трёх состояниях: проявленная, непроявленная и отображенная [1-6]. Непроявленная ГПИ – это скрытая информация, которая может быть получена только с помощью специальных методов анализа. Это может быть информация о подземных водах, геологических структурах, или о распространении загрязнения. Отображенная ГПИ – это представление ГПИ в доступной для восприятия форме, например, на карте, в таблице или в виртуальной реальности.

Более того, для полного понимания геопространственных знаний необходимо рассмотреть концепцию онтологии и семантики. Онтология в этом контексте определяет структуру и свойства геопространственных объектов и их взаимосвязей. Семантика же занимается смысловым содержанием этих объектов и взаимодействий. Интеграция онтологии и семантических технологий в ГИС позволяет создавать более интеллектуальные системы, способные к автоматическому извлечению знаний из геопространственных данных и их использованию для решения сложных задач. Развитие ГПЗ и использование онтологий и семантики являются ключом к созданию более умных и эффективных геоинформационных систем будущего. Это позволит не только анализировать данные, но и извлекать из них глубокие познания о нашей планете и принимать более взвешенные решения в различных областях применения.

На рис. 1 показано отличие проявленной, не проявленной и отображенной ГПИ.

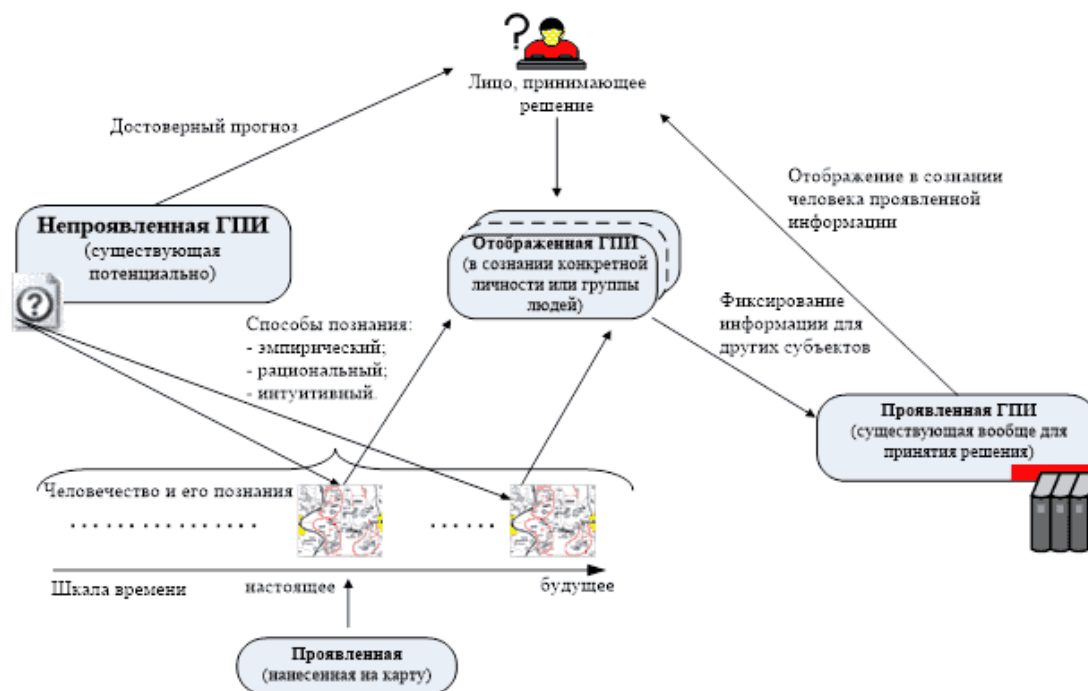


Рисунок 1. Схема приращения геопространственной информации

При оценке пространственно-временных характеристик местности с использованием карт, лицо, принимающее решение (ЛПР), сталкивается с определенными ограничениями. В частности, оно не может заранее предугадать все возможные сценарии, которые могут возникнуть в данной местности, поскольку эта информация остается скрытой. Однако по мере того как время проходит и ситуация развивается, ЛПР начинает осознавать и воспринимать эту скрытую информацию. В этом контексте проявленная ГПИ выступает как первичная информация о местности, представленная на карте. Это базовые данные, которые доступны для анализа и интерпретации.

Отображенной ГПИ является та часть информации, которая была осмыслена и понята ЛПР. Это значит, что ЛПР не просто видит данные на карте, но и интерпретирует их, принимая во внимание контекст ситуации и свои цели. Непроявленная ГПИ, напротив, включает в себя ту информацию о местности, которая остается скрытой до определенного момента. Этот аспект подчеркивает динамическую природу геоинформации, поскольку по мере изменения условий и обстоятельств, ранее скрытая информация может стать доступной для анализа и принятия решений.

Динамика ГПИ также подчеркивается тем, что она постоянно обновляется и прирастает. Например, в картографии информация определяется как составная часть ГПИ [5]. Она включает в себя сведения и данные об элементах местности, которые изображаются на топографических и специальных картах. Это может быть информация о рельефе, водоемах, инфраструктуре и других важных элементах, которые могут оказывать влияние на принятие решений.

Некоторые ученые-картографы утверждают, что информация – это осмысленные данные. В этом контексте информация становится полезной только тогда, когда она была интерпретирована и осмыслена.

Таким образом, процесс работы с ГПИ представляет собой сложную и многогранную задачу. ЛПР должен учитывать не только доступные данные, но и то, как

эти данные могут изменяться со временем, а также как они могут быть интерпретированы другими участниками процесса [6]. Важно также отметить, что в современном мире с развитием технологий, таких как ГИС, доступ к геопространственной информации стал более широким. Это позволяет более эффективно анализировать и визуализировать данные, что, в свою очередь, способствует более обоснованным и информированным решениям.

Окружающий мир сам по себе не является данными. Данные – это результат выделения определенных аспектов реальности человеческим сознанием, процесс, требующий предварительного знания о том, какие именно аспекты следует выделять. Без субъекта познания, без человека, данные существовать не могут. Они являются продуктом когнитивной деятельности.

Разнообразие правил формализации ГПД определяет разнообразие абстрактных форм их представления. Картографическая информация, являющаяся подмножеством ГПД, является примером формализованных данных, основанных на строго определенных правилах и стандартах, таких как проекции, системы координат, легенды и символика.

Следует подчеркнуть еще раз различие между ГПИ и ГПД. ГПД – это всего лишь одна из форм существования ГПИ. ГПИ – более широкое понятие. Один из важных аспектов ГПИ – её непроявленная, потенциальная форма существования, независимая от человеческого знания и восприятия (Рис. 2). Это информация, которая существует объективно, но не осознана нами. Наличие этой непроявленной составляющей делает понятие ГПИ более емким, чем ГПД. Можно утверждать, что ГПД – это тот фрагмент, который удалось формализовать и сделать доступным для обработки.

В схеме познания первичной является потенциальная, непроявленная информация – вся совокупность объективных данных о пространстве, существующая независимо от наблюдателя. Человеческое сознание способно "выделить" лишь часть этой информации – проявленную, актуальную часть, которую мы можем воспринимать и обрабатывать. Именно эта проявленная информация преобразуется в данные, благодаря процессу формализации.

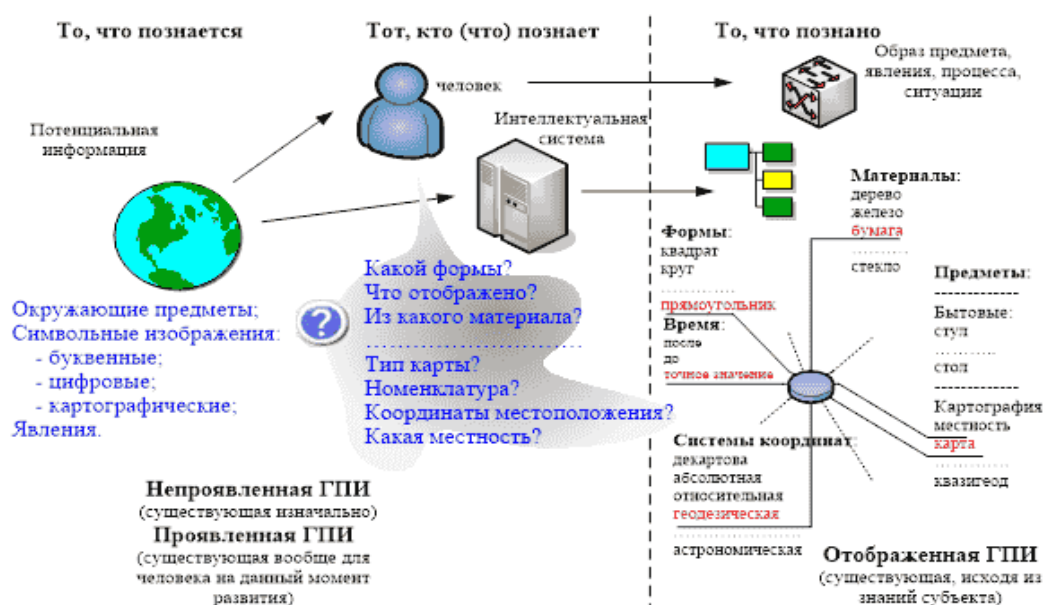


Рисунок 2. Схема познания географического пространства

Признак неполноты формализации свидетельствует о том, что ГПД всегда представляет собой только часть ГПИ.

Важно отметить роль метаданных. Метаданные – это данные о данных. Они описывают структуру, содержание и происхождение ГПД, обеспечивая их интерпретацию и использование. Без качественных метаданных данные теряют свою ценность, становясь неинтерпретируемыми. Метаданные являются неотъемлемой частью процесса формализации и обеспечивают надежность и воспроизводимость результатов обработки ГПД. Они также помогают обеспечить совместимость данных, полученных из различных источников, и позволяют эффективно управлять большими объемами ГПИ.

Отображение информации, будь то географическая местность или любой другой объект, подразумевает ее осмысление и последующую формализацию. Этот процесс, в основе которого лежат определённые правила и инструментарий, сводится к выделению ключевых характеристик предмета или явления и созданию устойчивых материальных конструкций – данных. В контексте геоинформатики, ГПД представляют собой формализованные составляющие проявленной или отображенной ГПИ. Эта формализация обеспечивает хранение, обработку и передачу информации. Важно отметить фундаментальный аспект: отображается исключительно та информация, о которой у субъекта (человека или системы) уже имеются знания. В отношении местности или географического пространства, это отображенное знание мы обозначаем как ГПЗ.

Можно заметить, что существующие базы геоданных могут быть весьма полезны для формирования ГПЗ, так как они - формальные документы, которые были разработаны, чтобы зафиксировать взгляд специалиста на некоторую предметную область реального мира. Существующие базы геоданных могут, поэтому, использоваться, чтобы создать приблизительные ГПЗ, в то время как существующие ГПЗ могут использоваться, чтобы генерировать схемы баз геоданных (рис. 3).

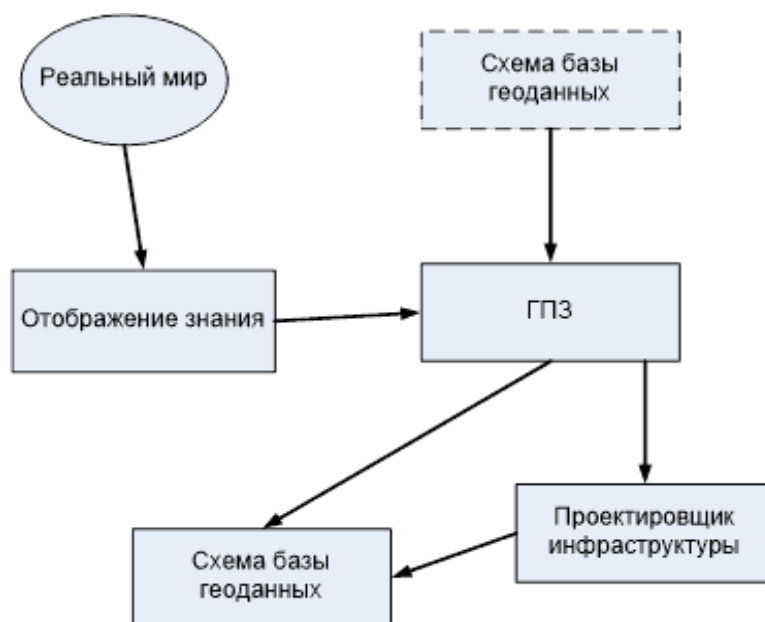


Рисунок 3. Отображение знания географического пространства

Имеются три различных уровня абстракций, на которых находятся как ГПЗ, так и схемы базы геоданных (рис. 4).

	ГПЗ	Концептуальные модели геоданных
Формальный уровень	Абстракция формальных особенностей научных предметов: геометрия, география, время, пространство	Понятия концептуального моделирования: объекты(цели), области(поля), отношения
Уровень логических типов геоданных прикладной области	ГПД и ГПЗ географических видов: представление, местоположение, топология, географическая информатика	Концептуальная модель и нотация: классы, пространственные отношения, пространственные ограничения целостности
Прикладной уровень	ГПД и ГПЗ инфраструктуры объектов ОАО «РЖД» Станции, перегоны и др.	Концептуальная схема БГД атрибутивное описание сущностей ОАО «РЖД»

Рисунок 4. Уровни абстракций ГПД и ГПЗ

Первый уровень - формальный, на котором в конструкции ГПЗ, ГПД и концептуальных схем включены абстрактные концепции.

Когда мы сопоставляем содержание формального уровня с географическими приложениями, мы получаем второй уровень абстракции, или уровень типов геоданных.

На прикладном уровне, ГПД и ГПЗ более конкретны, являясь уточнением специализаций уровня типов геоданных, и формируются в соответствии с концепциями поля знания, заданного приложением. На этом уровне онтология – это способ осмысления набора концепций, позволяющего совместно и согласованно использовать его группой пользователей.

Термин "знание" в геоинформатике, как и в системах ИИ, возник в ответ на усложнение задач, решаемых средствами автоматизации. Ранние цифровые картографические системы, включая программные и технические средства, ориентировались преимущественно на хранение информации о местности в заданном формате, ее отображение и выполнение картометрических расчётов. Структура данных была относительно простой, не требующей сложных алгоритмов обработки и анализа. Однако, появление задач, связанных с поддержкой принятия решений в режиме реального времени (например, мониторинг чрезвычайных ситуаций, управление транспортом, планирование городской инфраструктуры), радикально изменило ситуацию.

Современные ГИС должны выполнять функции, частично дублирующие человеческий интеллект, включая анализ пространственных данных, оценку различных ситуаций и прогнозирование. Это потребовало переосмысления архитектуры ГИС и принципов работы с данными. Простая запись координат и атрибутов объектов на карте оказалась недостаточной. Возникла необходимость в представлении знаний о пространстве в более сложной и комплексной форме. Это привело к развитию таких концепций, как онтологии, семантические сети и базы знаний, позволяющих хранить и обрабатывать не просто данные, а знания о данных.

Например, вместо простого описания реки как линии на карте с определенными атрибутами (название, длина, ширина), современная ГИС может хранить информацию о ее гидрологическом режиме, экологическом состоянии, истории развития, прилегающей инфраструктуре и т.д. Эти знания, представленные в формализованном виде, позволяют системе не только отображать реку на карте, но и анализировать ее состояние, прогнозировать возможные изменения, оценивать риски и принимать обоснованные решения.

Более того, современные ГИС всё чаще интегрируются с другими системами,

например, системами мониторинга окружающей среды, системами управления транспортом, системами безопасности. Это требует создания стандартов обмена данными, разработки специальных языков описания знаний и интеграционных платформ. В рамках такого расширенного контекста ГПД перестают быть просто набором координат и атрибутов, превращаясь в знания о пространстве, используемые для поддержки принятия решений на различных уровнях.

Значительное влияние на развитие ГИС оказало развитие технологий ИИ, включая машинное обучение и глубокое обучение. ИИ-алгоритмы способны анализировать огромные объемы ГПД, выявлять закономерности, строить прогнозные модели и автоматизировать многие рутинные операции. Например, использование глубокого обучения позволяет создавать высокоточные цифровые модели местности на основе спутниковых снимков и аэрофотосъемки. Машинное обучение помогает автоматизировать классификацию объектов на изображениях, определять типы растительности, выявлять изменения в ландшафте и т.д.

Дальнейшее развитие ГИС будет во многом определяться успехами в области ИИ, развитием новых методов анализа данных и созданием эффективных инструментов для работы с пространственными знаниями.

2. Представление геопространственных знаний

В программировании и, в особенности, в геоинформатике, представление знаний тесно связано с организацией данных [7]. Можно сказать, что знания – это хорошо структурированные данные, или, используя более формальный термин, метаданные, описывающие не только сами данные, но и их взаимосвязи, контекст и смысл [5]. Это концептуальное сходство между данными и знаниями является основой многих подходов к разработке интеллектуальных систем. В цифровой картографии, например, эволюция от простых данных к сложным знаниям проявляется в постепенном наращивании структурной сложности. Начальный этап – это сбор сырых данных: координаты, атрибуты объектов, изображения. Следующий шаг – их структуризация в базы данных, например, базы геоданных, включающие в себя пространственные и атрибутивные данные, связанные между собой с помощью различных топологических отношений. Дальнейшее развитие приводит к созданию геоинформационных моделей, которые отражают не только сами объекты, но и их взаимосвязи, динамику изменений во времени, и даже вероятностные характеристики. Таким образом, простой набор координат превращается в сложную модель, описывающую территорию с учётом её различных аспектов.

Развитие ИИ внесло значительный вклад в области представления знаний. Были разработаны специализированные структуры данных, позволяющие эффективно кодировать и обрабатывать сложные знания. К ним относятся фреймы, семантические сети, продукционные системы (сценарии), и ситуационные модели. Фреймы представляют собой иерархические структуры, описывающие объекты и их свойства. Семантические сети представляют знания в виде графов, где узлы соответствуют объектам или понятиям, а рёбра – отношениям между ними. Продукционные системы оперируют правилами "если-то", позволяющими выводить новые знания из существующих. Ситуационные модели описывают состояния системы и переходы между ними. Все эти структуры находят широкое применение в интеллектуальной геоинформатике, позволяя создавать более сложные и "интеллектуальные" ГИС.

В контексте углубления автоматизации в изучении и оценке местности, ключевым аспектом является исследование логических закономерностей, присущих

данной предметной области. Это включает в себя анализ пространственных отношений, временных зависимостей, каузальных связей между различными географическими объектами и явлениями.

ГПД представляют собой структурные компоненты отображаемой ГПИ. Однако, ГПИ включает в себя не только сами данные, но и их интерпретацию, контекст и значение для пользователя. Человеческое сознание обрабатывает информацию на многих уровнях, используя интуицию, опыт и знания, полученные из различных источников. Это делает перевод человеческого понимания в машинное представление сложной задачей, требующей развития новых методов и алгоритмов. В будущем развитие ИИ может привести к созданию ГИС, способных более полно и адекватно отражать сложность геопространственной информации и ее многоаспектное понимание человеком. Важно также учитывать онтологии и другие подходы к семантической веб-технологии, которые позволяют более точно определять и представлять знания в машинном формате. Включение нечеткой логики позволит учитывать неопределенность и неточность данных, что характерно для многих географических явлений. В итоге, целью развития ГИС является создание инструментов, которые не только хранят и обрабатывают геопространственные данные, но и позволяют пользователям получать знания из этих данных и принимать информированные решения.

ГПД также являются структурными частями проявленной ГПИ в той части ее, где происходит «материализация» – переход в статическое. Данные о местности как части проявленной ГПИ могут храниться в файлах в различных форматах (sxf, shp, dbf и т.д.) [9]. На рис. 5 показана схема, в которой ГПД переходят в отображенную в компьютере графическую информацию.

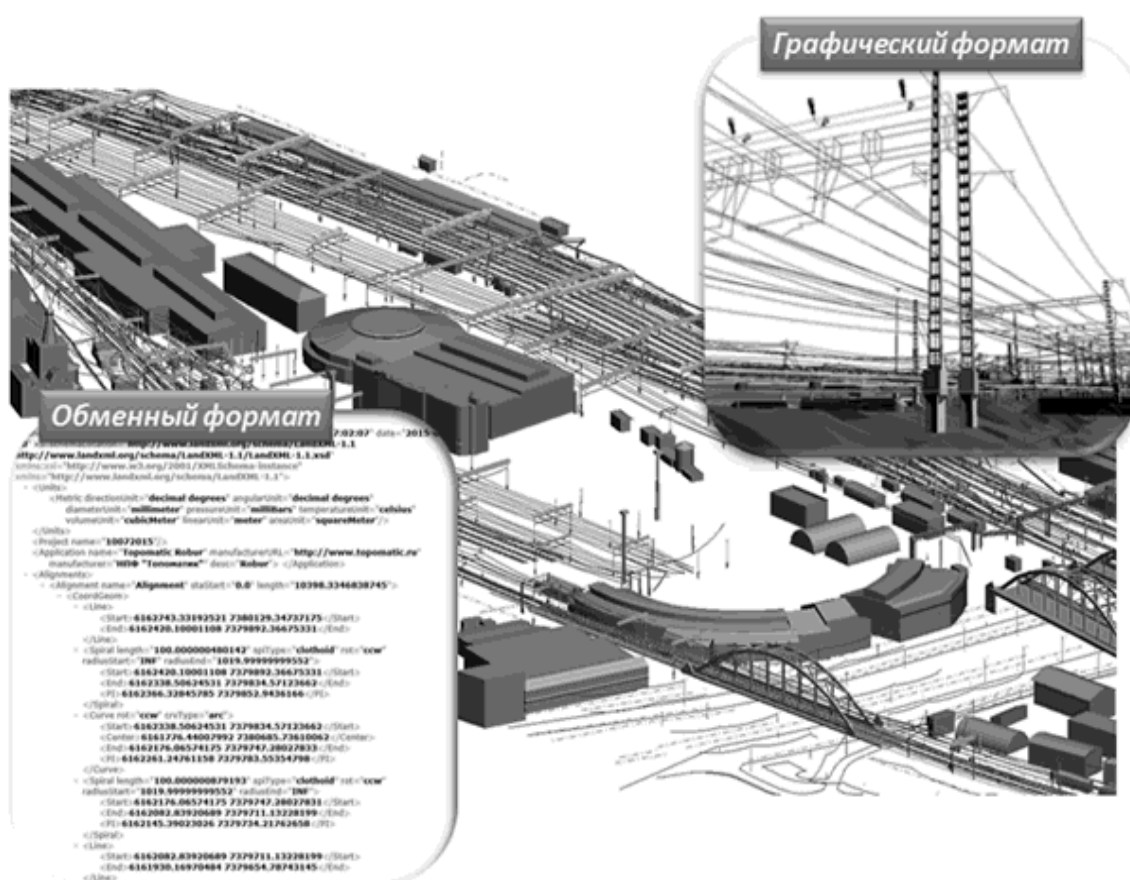


Рисунок 5. Схема приращения данных в цифровой графический формат

Трансформация ГПД на рис.3 позволяет выделить следующие этапы:

1. Выделение человеком ГПД как результат измерений и наблюдений (отображение информации в сознании человека);
2. Фиксирование ГПД на материальные носители (проявление информации в формате sxf);
3. Интерпретация ГПД в компьютере на языке описания данных (отображение в компьютере согласно модели БД).

В процессе рассуждений о понятии географической пространственной структуры можно показать, что она является важной частью отображенной ГПИ. Это приводит к выводу, что ГПЗ, как концепция более высокого уровня действительно представляет собой отображенную ГПИ [6]. Однако в этом определении существует определенное противоречие. С одной стороны, для того чтобы отобразить информацию, необходимы знания, а с другой — знания сами по себе являются отображенной информацией.

Знания можно определить как проверенные практикой результаты познания действительности, которые корректно отражены в сознании человека. Таким образом, знание о каком-либо объекте местности, как и информация о нем, представляет собой целостное представление, своего рода «абстрактная картина», которая включает в себя модель представления и значение данных в этой модели. При этом необходимо учитывать индивидуальные способности человека или средства искусственного интеллекта, которые участвуют в познании данного объекта.

Последовательность преобразования ГПД в ГПЗ была подробно рассмотрена в ряде исследований. Однако стоит подчеркнуть, что если данные отображаются в компьютере согласно определенной модели базы данных, то знания должны включать как отображенные данные, так и саму модель базы данных. Это важно, поскольку именно модель базы данных определяет, как структурируются и хранятся данные, а также как с ними взаимодействуют.

В учебниках по ИИ знания традиционно делятся на два типа: процедурные и декларативные [5, 6]. Процедурные знания управляют данными, определяя, как с ними работать. Для изменения таких знаний необходимо изменять сами программы, что может быть трудоемким процессом.

С развитием технологий и ИИ акцент постепенно смещается в сторону декларативных знаний. Декларативные знания становятся более значительными, поскольку они позволяют более гибко управлять данными и их обработкой. Это изменение в подходе к знаниям отражает общую тенденцию в области ИИ, где акцент делается на создание более универсальных и адаптивных систем, способных обрабатывать и анализировать большие объемы данных.

Таким образом, анализ показывает, что понимание и использование знаний в контексте географической информации требует комплексного подхода, который включает как теоретические, так и практические аспекты. Это связано с тем, что знание о географических объектах не может быть изолировано от данных, которые их описывают, и моделей, которые определяют их структуру и использование. В конечном итоге интеграция этих элементов позволяет создать более полное и точное представление о географической реальности, что имеет важное значение для различных приложений, таких как картография, геоинформационные системы и другие области, связанные с пространственными данными.

4. Картографический метод познания действительности

Для более глубокого понимания понятия ГПЗ важно рассмотреть содержание электронной карты и ее составляющие. Информация, представляемая на таких картах, делится на две основные категории: семантическую и метрическую [10, 11]. Эти категории помогают уточнить, что именно включает в себя ГПЗ и как она может быть использована в различных областях, таких как география, экология, городское планирование и многие другие.

Семантическая информация — это сведения, которые описывают определенные характеристики объектов местности, процессов или событий, представленных на карте [11]. Важно отметить, что семантическая информация не просто описывает объекты, но и придает им смысл, позволяя пользователю понять, как эти объекты взаимодействуют друг с другом и как они вписываются в более широкий контекст.

Метрическая информация, в свою очередь, относится к количественным характеристикам объектов, таким как расстояния, площади, координаты и другие измеримые параметры. Она позволяет точно определить расположение объектов на карте и их размеры, что особенно важно для навигации и планирования.

Следует также обратить внимание на понятие «знак» в контексте картографии. Знак — это символ, который представляет собой материальный объект, процесс или явление, существующее в реальном мире. Он выступает как представитель действительных объектов местности и используется для передачи информации.

Для более глубокого понимания знаков в картографии полезно обратиться к концепции «знаковой ситуации», которая включает в себя пару «знак — обозначаемое». Например, знак «парк» на карте обозначает конкретное место, где располагается зеленая зона. В этом контексте знак не просто указывает на местоположение, но и передает информацию о свойствах этого места.

Таким образом, семантическая информация и знаки на картах играют ключевую роль в формировании нашего понимания ГПИ. Они помогают нам не только ориентироваться в пространстве, но и осмысленно понимать окружающий мир.

Таблица 1. Объекты местности в символьном представлении

Символьный знак	Содержание предмета (денотат)
	Электростанции
	Электрические подстанции
	Радиостанции, телевизионные центры
	Мосты
	Церкви, костелы, кирхи
	Аэродромы

Кроме того, в последние годы наблюдается рост интереса к использованию ГПЗ в различных сферах, включая экологические исследования, управление природными ресурсами, транспортное планирование и даже в области здравоохранения. С помощью геопространственной информации можно анализировать влияние различных факторов на окружающую среду, планировать оптимальные маршруты для доставки товаров или услуг, а также отслеживать распространение заболеваний и организовывать реагирование на чрезвычайные ситуации.

Таким образом, понятие ГПЗ охватывает широкий спектр данных и их взаимо-

связей, что делает его крайне важным для современного общества. Понимание семантической и метрической информации, а также знаков и их значений, позволяет лучше использовать геопространственные данные для решения реальных задач и улучшения качества жизни.

Существует большое разнообразие знаковых систем (рис. 6). В цифровой картографии нас будут интересовать: из неязыковых – знаки-символы, знаки графической информации; из языковых – знаки естественного языка.



Рисунок 6. Обзорно-знаковая модель местности

Карта – это не просто изображение местности, это сложная система кодирования информации, включающая в себя несколько взаимосвязанных языков. Один из них – это искусственный язык номенклатуры, строго регламентирующий обозначение каждого картографического листа. Этот язык, базирующийся на буквенно-цифровых кодах (например, Р-41-133-А-а, б для карты масштаба 1:25 000 или Р-38-І, ІІ для масштаба 1:200 000), указывает на его географическое положение относительно экватора и нулевого меридиана, позволяя однозначно идентифицировать любой фрагмент земной поверхности, охваченный картографическим покрытием. Система номенклатуры построена на иерархическом принципе: более крупные листы разбиваются на более мелкие, и каждый подлист получает свой уникальный код, являющийся частью кода родительского листа. Это позволяет легко ориентироваться в обширном массиве картографической информации и быстро находить необходимый лист. Более того, структура кодирования отражает масштаб карты: чем мельче масштаб, тем короче код, так как он обозначает более крупную территорию.

Помимо номенклатуры, на карте присутствует другой, не менее важный язык – язык цифровых знаков координатной сетки. Эти цифры, выражающие координаты точек, представляют собой метрическую информацию, отображающую пространственное расположение объектов. Однако, утверждение о строгом разделении информации на метрическую и семантическую является условным. Метрическая информация сама по себе несет семантическую нагрузку, поскольку определяет взаиморасположение объектов и их положение относительно системы координат.

Далее, карта использует различные знаковые системы для отображения разнообразных объектов и явлений. Это могут быть условные обозначения (леса, реки, дороги, населенные пункты), картодиаграммы (картограммы) – графическое представление статистических данных, распределённых по территории (например, плотность населения, уровень осадков, распределение типов почв). Цветовая гамма и насыщенность фона карты также являются мощным средством передачи информации, позволяя визуально дифференцировать территории по различным признакам: например, различным типам растительности, рельефу местности, геологическим формациям. Специальные знаки служат для отображения динамических объектов, например, движения войск (военные карты), распространение эпидемий (медицинские карты), движения воздушных масс (метеорологические карты) [8].

Кроме того, существуют карты специального назначения, которые используют свои собственные знаковые системы, адаптированные к специфике отображаемой информации. Например, геологические карты используют особые обозначения для различных типов горных пород, а топографические карты – для обозначения высот и форм рельефа.



Рисунок 7. Схема картографического метода познания действительности

В навигации активно используются электронные карты, где знаковые системы представлены в цифровом виде, используя векторную или растровую графику, что позволяет значительно расширить возможности отображения и анализа информации. Количество и сложность взаимодействующих знаковых систем напрямую зависят от масштаба и тематики карты: более детальные и специализированные карты содержат большее количество знаков и более сложные правила их интерпретации. Масштабируемость картографического языка – ключевое свойство, позволяющее применять картографический метод для исследования объектов разных масштабов, от локальных участков до всей планеты. Анализ знаковых систем и их

взаимодействий позволяет проводить пространственный анализ, выявлять пространственные закономерности, создавать модели и прогнозы. Таким образом, карта – это не просто статичное изображение, а динамическая система представления информации, язык которой нуждается в изучении и понимании для эффективного использования ее потенциала.

Картографические исследования можно пояснить схемой на рис. 7, на которой выделены стадии картографирования и использования карты: 1) получение информации I_1 т. е. сведений об окружающем мире, в результате наблюдения некоторой части действительности D_1 – ее явлений и процессов; 2) обработка информации I_1 и построение карты K – пространственной обзорно-знаковой модели исследуемой части действительности; 3) изучение (чтение) карты K для извлечения из нее информации I_2 об отображенных на карте явлениях; 4) мысленное формирование в сознании исследователя образа D_2 о моделированной на карте действительности на основе информации, заключенной в карте, и ранее накопленных знаний.

Суть первой и второй стадии заключается в отображении информации о некоторой части действительности в сознании человека, затем, на основе определенных правил, – проявление этой информации в виде карты. С точки зрения семиотики, этот процесс называется формированием первичной семантической информации об объекте по заданию (рис. 8).

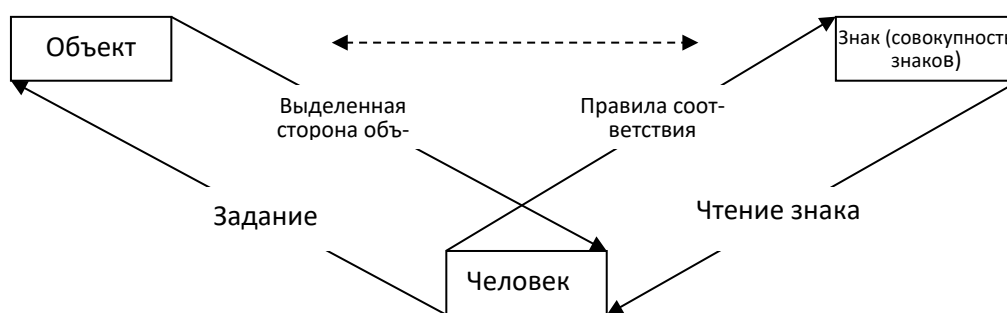


Рисунок 8. Схема абстрагирования объектов обстановки

Согласно теории познания [12], первичная семантическая информация представляет собой зафиксированное отображение выделенной человеком стороны (сторон) объекта. Человек при этом руководствуется выделением относительно устойчивых категорий, образующих своего рода каркас – логическую структуру первичной семантической информации. Основой являются категории диалектики: цель, метод, средство, общее, единичное, особенное, качество, количество, причина, следствие, содержание, форма и др. (категория – обобщенное отражение объективной реальности и вместе с тем существенное определение аспекта объекта). Таким образом, создается абстрактная модель земной поверхности [13], так как она смоделирована с использованием знаковой системы, которая по своей сути является абстракцией. К примеру, линия, которая описывает границу озера на карте, в природе не существует. Человек использует эту абстракцию для отображения, а затем для познания формы водоема. Третий и четвертый этапы включают в себя декодирование информации, заключенной в знаках на основе правил чтения каждой знаковой системы [14, 15].

Следует отметить важность этапа оцифровывания. Посредством определенных методов происходит преобразование одной формы семантической информации в другую. Визуально-отображенная информация переходит в форму, приемлемую для компьютера, т.е. проявленная на карте информация отображается посредством компьютерной знаковой системы в форму, пригодную для программной обработки.

5. Обсуждение

Картографическое изображение, будь то бумажная карта или электронный аналог, представляет собой сложную систему знаков, несущих семантическую нагрузку. Эта информация воспринимается визуально – будь то линии, цвета, символы на бумаге или пиксели на экране. Однако глубинная сущность карты выходит за рамки простого визуального восприятия. Электронные карты, например, демонстрируют особенно ярко это двойное существование информации. На экране мы видим проявленную информацию – визуальное представление местности, дорог, объектов инфраструктуры. Однако за этой картинкой скрывается отображенная информация – цифровая модель, набор данных, хранящихся в компьютерной памяти [16]. Это координата, атрибуты объектов, многослойная структура данных, доступная для обработки и анализа вычислительной машиной. Именно это цифровое представление позволяет выполнять сложные операции, такие как маршрутизация, поиск объектов, анализ пространственных данных, недоступные для простого чтения бумажной карты.

Аналогию можно провести с человеческим восприятием мира [6]. Внешняя реальность – это проявленная информация, которую мы воспринимаем через органы чувств. Однако наше понимание этой реальности формируется через призму отображенной информации – системы концепций, знаний, представлений, полученных в процессе обучения и жизненного опыта. Мы не просто видим дом, мы распознаем его как дом, основываясь на нашем опыте и знании этого понятия. Это преобразование проявленной информации в отображенную происходит постоянно и неосознанно [3]. Отображенная информация, в свою очередь, может вновь становиться проявленной, но уже в преобразованном виде. Например, мы можем описать увиденный дом словами, создав таким образом вербальную модель, которая передаст кому-то другому представление об этом объекте. Или же мы можем нарисовать его, создав графическое представление. В обоих случаях мы переводим внутреннюю, отображенную информацию, обратно в проявленную форму, используя знаковые системы – язык и рисунок.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что существенная разница между отображенной информацией, полученной из внешнего мира, и информацией, создаваемой человеком, заключается в степени ее полноты и объективности. Наша модель реальности всегда неполна, упрощена и субъективна. Мы видим только то, что способны воспринимать и интерпретировать. Наши знания определяют границы нашего восприятия. Если у нас отсутствуют понятия, относящиеся к определенным объектам или явлениям, мы просто не будем их замечать [4]. Это подчеркивает существование непроявленной информации – информации, потенциально существующей в идее ГПЗ, но недоступной нам в силу ограниченности нашего познания. Развитие науки и технологий, появление новых концепций и терминов расширяют наши возможности "проявления" ранее непроявленной информации.

Возвращаясь к анализу карты как таковой, можно сделать вывод, что она представляет собой попытку перевести часть проявленной информации о реальном мире в отображенную форму, а затем снова сделать ее проявленной, но уже в структурированном и обобщенном виде [17, 18]. Различные типы карт отражают разные аспекты реальности и используют разные знаковые системы. Топографическая карта использует изолинии, условные обозначения для рельефа, гидрографии и объектов инфраструктуры. Тематическая карта может фокусироваться на определенных явлениях, таких как распределение населения, температура, тип почвы. Каждая из них предоставляет пользователю определенный набор проявленной информации, основанной на

предварительно обработанной и структурированной отображенной информации.

Наибольший интерес у авторов статьи вызывают электронные карты, которые используют множество различных знаковых систем. Цифровые данные здесь могут быть представлены в разных форматах, использующих различные кодировки и алгоритмы сжатия. Визуальное представление на экране также может варьироваться в зависимости от масштаба, проекции и настроек отображения. В результате возникает сложная многоуровневая система представления информации, где проявленная и отображенная формы тесно переплетаются и дополняют друг друга. Разработка и использование карт – это постоянный процесс перевода, интерпретации и преобразования информации между различными формами и знаковыми системами, целью которого является предоставление пользователю наиболее полного и понятного представления о реальности.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 28.441-99 Цифровая картография. Термины и определения // – М.: Госстандарт. 1999.
2. Оразбаев Б. Б., Курмангазиева Л. Т., Коданова Ш. К. Теория и методы системного анализа // – Пенза: ИД "Академия Естествознания". 2017. 248 с.
3. Шавенько Н.К. Основы теории информации – М.: Изд-во МИИГАиК, 2019. – 135 с.:
4. История и философия науки: учебник для вузов / А. С. Мамзин [и др.] ; под общей редакцией А. С. Мамзина, Е. Ю. Сиверцева. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2020. — 360 с.
5. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем // – СПб.: Питер, 2001 г. – 384 с.
6. Хромов Л. И. Теория информации и теория познания. – 2-е изд., доп. – СПб., Изд. Русского философского общества, 2021. – 310 с.
7. Киргизова Е.В. Технологии программирования: от теории к практике / Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2021. – 124 с.
8. Радченко Л.К. Познавательный аспект в картографии // Вестник СГУГиТ. – 2020. Т.25, №4. С. 138-145.
9. https://docs.orbimap.ru/editor/import_export_files.
10. Розенберг И. Н., Дулин С. К. Развитие геоинформационных технологий // Автоматика, связь, информатика. №11, 2021. С. 20-25.
11. Дулин С.К., Дулина Н.Г., Косарик В.В., Никишин Д.А. Макет интероперабельной информационно-аналитической системы для обеспечения пространственного и семантического поиска и анализа геоданных // Системы и средства информатики. Т. 27. № 1. 2017. С. 47-60.
12. Макаренко С. И., Соловьева О. С. Основные положения концепции семантической интероперабельности сетевых систем //Журнал радиоэлектроники, 2021. № 4.С. 1–24.
13. Новаковский Б.А., Пермяков Р.В. Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа. – М.: Изд-во МИИГАиК. 2019 – 175 с.
14. Сяо Н. Алгоритмы ГИС / пер. с англ. А.А.Слинкина. - М.: ДМК Пресс. 2021. – 328 с.
15. Третьяков В.Ю. Геоинформационные системы в экологии и природопользовании: программирование на Python в arcGIS и Quantum GIS . - СПб: РГТУ. 2022 - 112 с.
16. NextGIS Web. <https://nextgis.ru/blog/nextgis-frontend/> (дата обращения 20.01.2025).
17. OpenStreetMap. <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения 20.01.2025).
18. 8 Javascript-библиотек для визуализации данных в виде интерактивных карт. <https://habr.com/ru/articles/318600/> (дата обращения 20.01.2025).

УДК: 625.17.1:656.13.1

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

Коваленко Н.И. д.т.н., профессор, E-mail: kni50@mail.ru,
Мочалов Н.А., аспирант, E-mail: mochalov_n.a@internet.ru,
РУТ (МИИТ), Москва, Россия,

Аннотация

Рассматриваются основные аспекты эксплуатации высокоскоростного диагностического поезда, и его роли в обеспечении безопасности высокоскоростных железнодорожных магистралей. Приведены примеры диагностических поездов в различных странах. Рассмотрены технические устройства на высокоскоростном диагностическом поезде «IRIS 320». Выполнен анализ предполагаемого влияния высокоскоростного диагностического поезда на эффективность текущего содержания пути на ВСЖМ-1 Москва-Санкт-Петербург. Рассмотрен расчёт периодичности контроля рельсов на ВСЖМ-1 неразрушающими методами. Приведены рекомендации минимального и максимального количества проверок рельсов неразрушающими методами контроля. Рассмотрены технологические вызовы, с которыми придется столкнуться при внедрении высокоскоростного диагностического поезда на ВСЖМ-1 и описаны проблемы в случае отказа от данной технической единицы.

Ключевые слова: высокоскоростная железнодорожная магистраль; техническое обслуживание; высокоскоростной диагностический поезд; мониторинг и инспекция.

FEATURES OF MONITORING HIGH-SPEED RAIL LINES

Kovalenko N.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, RUT (MIIT)
E-mail: kni50@mail.ru
Mochalov N.A. postgraduate student, RUT (MIIT),
E-mail: mochalov_n.a@internet.ru

Annotation

The main aspects of the operation of a high-speed diagnostic train and its role in ensuring the safety of high-speed railways are considered. Examples of diagnostic trains in different countries are given. The technical devices on the high-speed diagnostic train "IRIS 320" are considered. The analysis of the expected impact of the high-speed diagnostic train on the efficiency of the current maintenance of the track on the VSZHM-1 Moscow-St. Petersburg is carried out. The calculation of the frequency of rail monitoring on the VSZHM-1 by non-destructive methods is considered. Recommendations for the minimum and maximum number of inspections of rails by non-destructive testing methods are given. The technological challenges that will have to be faced when implementing a high-speed diagnostic train on the VSZHM-1 are considered and the problems in case of abandonment of this technical unit are described.

Keywords: high-speed railway; maintenance; high-speed diagnostic train; monitoring and inspection.

Введение

Высокоскоростная железнодорожная магистраль Москва – Санкт-Петербург, (ВСЖМ-1), запланированная к вводу в эксплуатацию в 2030 году, станет одним из важнейших инфраструктурных проектов России. Она обеспечит новый уровень пассажирских перевозок, сократив время в пути между двумя крупнейшими городами страны до 2 часов 15 минут [1]. Однако строительство и эксплуатация таких магистралей сопряжены с высокими требованиями к техническому состоянию пути, контактной сети и других элементов инфраструктуры, поскольку на инфраструктуру ВСЖМ-1 оказывают воздействие значительные динамические нагрузки, возникающие при движении поездов со скоростями свыше 200 км/ч [2, 3]. При эксплуатации железных дорог с высокими скоростями и высокой интенсивности движения подвижного состава необходимо внедрение передовых технологий мониторинга и диагностики, позволяющих своевременно выявлять дефекты и повреждения [4, 5].

Целью работы является рассмотрение мобильных технических средств для мониторинга и диагностики верхнего строения пути (далее ВСП), количества проверок для своевременного обнаружения неисправностей и потребного количества данных технических единиц на линию ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург.

Одним из технологических решений для обеспечения надежности и безопасности движения поездов на высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва - Санкт Петербург (ВСЖМ-1) является внедрение высокоскоростных диагностических поездов, которые способны выявлять неисправности на ранних стадиях. Это позволит обеспечить устойчивую эксплуатацию высокоскоростной железнодорожной магистрали и оптимизировать техническое обслуживание [6].

Актуальность работы обусловлена тем, что впервые на отечественных железных дорогах принято решение о строительстве новой магистрали для движения со скоростями более 250 км/ч, что безусловно является новым технологическим вызовом. Несомненно, проблемы качества и количества диагностики и проверок ВСП выходят на новый уровень и играют ключевое значение в обеспечении надёжности, устойчивой работы и безопасной эксплуатации ВСЖМ-1 Москва – Санкт Петербург.

Необходимо в первую очередь рассмотреть международный опыт стран, которые имеют высокий уровень строительства и эксплуатации высокоскоростных железных дорог (далее ВСМ) и провести сравнение существующего опыта Российских железных дорог, посвящённые вопросам диагностики ВСМ и управления его состоянием [7, 8].

Данная статья посвящена анализу опыта других стран по оценке потребного количества мобильных технических средств их технико-эксплуатационных особенностей для диагностики и мониторинга ВСП применительно к ВСЖМ-1 Москва-Санкт-Петербург. Статья имеет рекомендательный характер.

1. Материалы и методы

Как правило, страны с развитой инфраструктурой ВСМ используют два типа мобильных технических средств для диагностики ВСП: высокоскоростные диагностические поезда (далее ВДП) и технические автомотрисы [9]. Высокоскоростной диагностический поезд является ключевой технической единицей для диагностики и мониторинга путевой инфраструктуры. Например, Китай, имеющий наибольшую протяжённостью ВСМ, в своем парке имеет высокоскоростные диагностические поезда различных модификаций, которые различаются по скорости диагностики,

применения в различных климатических зонах и других факторов [10]. Эти поезда оснащены современными системами мониторинга, позволяющими в режиме реального времени собирать данные о состоянии путевой инфраструктуры.

Главной особенностью применения ВДП является диагностика верхнего строения пути в дневное время в промежутках между коммерческими поездами при скорости их движения аналогичной скорости высокоскоростного поезда, тем самым обеспечивая их бесперебойную работу. Такой режим диагностики позволяет получать больше времени на устранение обнаруженной неисправности в ночное время. Поезд диагностирует более сотни различных параметров, что в электронном виде составляет от 5 до 6 терабайт необходимых сведений. Чтобы избежать электромагнитных помех вся информация передаётся в централизованную систему по оптоволоконной сети для обеспечения большей надёжности. В таблице 1 приведены примеры высокоскоростных инспекционных поездов, эксплуатирующиеся в различных странах.

На примере французского поезда «IRIS-320» можно получить некоторые представления об организации работы и получаемых результатах путеизмерительных и диагностических систем, установленных в высокоскоростном инспекционном подвижном составе [11].

Таблица 1. Высокоскоростные инспекционные поезда, эксплуатирующиеся в различных странах

Название	Скорость	Периодичность диагностики	Составность
 «Diamante 2.0» (Италия)	До 300 км/ч	не реже одного раза в две недели	2 моторных и 8 прицепных вагонов
 «IRIS320» (Франция)	до 320 км/ч	не реже 15 дней	2 моторных и 8 прицепных вагонов
 «CRCIT» (Китай)	до 350 км/ч	не реже 15 дней	8 моторных вагонов
 «Dr. Yellow» (Япония)	До 270 км/ч	не реже 1 раза в 8-10 дней	7 моторных вагонов

В течение рабочего дня данным поездом можно получить информацию на полигоне до 1500 км длины ВСМ. Диагностическим комплексом инспекционного поезда оцениваются такие параметры, как геометрия пути, сигнализация, одновременно производится диагностика контактной сети и связь.

Поезд «IRIS-320» оснащен 75 датчиками, которые приводятся в действие во время движения. На крыше вагонов установлены два купола для мониторинга контактной сети, 13 антенн (4G, GPS, GSM-R) и 17 измерительных систем. Поезд оборудован системами локализации, состоящих из датчиков обеспечивающих выявление дефектов и неисправностей с точностью до 5 метров [12].

Далее используются сокращения: УЗВД-ультразвуковые вагоны-дефектоскопы; МВД- магнитные вагоны-дефектоскопы; УЗАМД-ультразвуковые дефектоскопные автотрисы; САМД- совмещенные дефектоскопные автотрисы; СВД-совмещенные вагоны-дефектоскопы; ОДР- остродефектный рельс.

На рисунке 1 показана схема расположения вагонов и датчиков.



Рисунок 1. Схема расположения вагонов и датчиков «IRIS-320»

В отличие от различных стран, имеющих ВСМ, где ВДП является одной из ключевых технических единиц для диагностики и мониторинга путевой инфраструктуры в дневное время, в России с 2015 года на высокоскоростном подвижном составе (далее ПС «Сапсан») используется автономная информационно – измерительная система (далее ИИС) [13]. Интеграция данной системы в ПС «Сапсан» позволяет совершать диагностику ВСП, не занимая дополнительную нитку графика движения поездов, как это выполняется при применении ВДП.

Следует отметить, что компания «НПЦ ИНФОТРАНС» по заказу ОАО «РЖД» модернизирует ИИС. Данная модернизация будет выполняться в рамках подготовки диагностики нового поколения для ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург, где движение ПС «Сапсан» будет осуществляться при скорости до 360 км/ч.

Внедрение высокоскоростного диагностического поезда для ВСЖМ-1 представляет важные преимущества, которые невозможно достичь традиционными методами диагностики.

Техническое обслуживание ВСЖМ-1 планово-предупредительного характера, в основном, будет происходить в ночное время. Для этого необходимо выполнить требуемую диагностику, получить сведения о неисправностях и нарушениях и только потом осуществлять техническое обслуживание. Без использования высокоскоростного диагностического поезда оперативно получить необходимую информацию, практически, невозможно.

В результате проходов высокоскоростного диагностического поезда, информация о наличии дефектов и повреждений будет передаваться в дневное время, не мешая движению коммерческих поездов. Таким образом, в ночное время не требуется выполнять диагностику путей, а сразу можно приступить к устранению неисправностей. Характер таких путевых работ можно будет рассматривать как оперативных, что позволит своевременно обслуживать высокоскоростную железнодорожную магистраль.

Отказ от использования высокоскоростного диагностического поезда на ВСЖМ-1 приведет к значительным эксплуатационным и экономическим проблемам. Прежде всего, отсутствие такой технической единицы диагностики пути увеличит зависимость от ручных методов диагностики, которые потребуют значительных временных и трудовых ресурсов. Также это приведет к увеличению затрат на техническое обслуживание из-за необходимости более частых инспекций и внеплановых ремонтов.

В настоящее время предприятием АО «Фирма ТВЕМА» ведутся разработки отечественного поезда для мониторинга и диагностики путей на ВСЖМ-1 «Пионер-Интеграл-002», решающего следующие задачи:

- Рельсовая дефектоскопия;
- Контроль геометрии пути и рельсов;
- Визуальное обнаружение дефектов;
- Контроль габарита приближения строений;
- Контроль устройств автоматики и телемеханики;
- Контроль радиосвязи;
- Контроль состояния балластного слоя и основной площадки земляного полотна;
- Контроль контактной сети (КС).

Функциональные возможности комплекса «Пионер-Интеграл-002», обеспечивают инспекцию и мониторинг не хуже зарубежных высокоскоростных автомотрис (диагностических поездов) [14]. Кроме того, мировой опыт показывает, что данные автомотрисы используются для диагностики ВСП на основании сбора данных после пропуска высокоскоростного диагностического поезда.

На отечественных линиях ВСМ проводить диагностику и мониторинг путевой инфраструктуры предполагается осуществлять разрабатываемым отечественным ПС с модернизированной ИИС. Для определения потребного количества единиц ИПС на ВСЖМ-1 необходимо учитывать:

- Длину линии;
- Скорость диагностики;
- Частоту проверок.

Рассмотрим примеры определения количества высокоскоростных диагностических поездов (ВДП) в различных странах:

1. В Китае формируется один ВДП на 1000-1500 км протяжённости высокоскоростной линии. В расчётах учитывается коэффициент интенсивности $K_{\text{инт}}$ перевозочного процесса. Например, при интенсивности движения поездов ≤ 200 пар высокоскоростных поездов в сутки $K_{\text{инт}} = 1.0$ (+ один резервный). При движении > 200 пар поездов в сутки, $K_{\text{инт}} = 1,5$ (+один резервный ВДП);

2. Япония использует один ВДП на 500 км (+1 резерв).

Проанализировав опыт различных стран, можно сделать предположение, что для отечественных условий эксплуатации потребуется ПС оснащённых ИИС в количестве двух единиц для мониторинга и диагностики ВСЖМ-1.

Для определения потребного количества ПС оснащённых ИИС, также следует учитывать следующие параметры: длина линии, скорость диагностики, длительность ночного окна, частота проверок и резерв на ремонты. В таблице 2 представлены примеры применяемого количества автомотрис на линиях ВСМ в различных странах. Проанализировав таблицу 2 можно сделать вывод, что различные страны используют зонирование линии. Разделение происходит в соотношении 200-250 км на 1 автомотрису. Следовательно, можно сделать вывод, что для ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург, длинна которой будет составлять 679 км, потребуется минимум 3 автомотрисы.

Таблица 2. Потребное количество автомотрис на линию ВСМ в различных странах

Страна	Линия	Длина (км)	Автомотрисы (шт.)
Китай	Пекин – Шанхай	1318	6
Япония	Токайдо-Синкансэн	515	3
Франция	LGV Sud-Est	409	2

2. Расчет периодичности контроля рельсов на ВСЖМ-1 неразрушающими методами

Расчёты распространяются на средства дефектоскопии – съемные и мобильные дефектоскопы для неразрушающего контроля рельсов в пути и элементов стрелочных переводов и устанавливается алгоритм расчета периодичности проверки и межконтрольных интервалов.

При выполнении данной работы за основу принята Методика определения периодичности контроля рельсов, разработанная Главным управлением пути и сооружений ОАО «РЖД» (ЦП) [15].

На основании данных журнала учета покилометрового выхода ОДР по участкам контроля по формуле (1) определяется среднее значение выхода ОДР $\bar{P}$, шт./км, за предыдущие 12 месяцев для каждого участка контроля

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{L}, \quad (1)$$

где P_i - количество ОДР, обнаруженных на контролируемом участке в течение n проверок за 12 предыдущих месяцев, шт.; n - количество проверок за 12 предыдущих месяцев; L - длина контролируемого участка или подучастка, км.

На участке проверяется наличие километров с повышенным выходом ОДР. Причиной такого выхода может быть плохое текущее содержание пути, заводские дефекты партии рельсов или другие эксплуатационные факторы. Определяются километры на основании данных журнала учета покилометрового выхода ОДР по участкам контроля и предельных значений выхода ОДР на километре участка контроля (таблица 3).

Таблица 3. Предельные значения выхода ОДР на километре участка контроля

Средний выход ОДР на 1 км пути за 12 мес. $\bar{P}$, шт./км	Длина участка контроля L , км										
	≤ 5	6-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100
0,1-0,4	> 1										
0,5	> 1			≥ 3							
0,6	> 1		≥ 3				≥ 4				
0,7	≥ 2	≥ 3		≥ 4					≥ 5		
0,8	≥ 2	≥ 3	≥ 4		≥ 5						
0,9	≥ 3	≥ 4				≥ 5					
1,0	≥ 3	≥ 4	≥ 5		≥ 6				≥ 7		
2,0	≥ 8	≥ 9	≥ 10	≥ 11	≥ 12	≥ 13			≥ 14		

Промежуточные значения среднего выхода ОДР $\bar{P}$ округляются в меньшую сторону.

Для участков, на которых за предыдущие 12 месяцев выход ОДР отсутствовал, в качестве $\bar{P}$ принимается средний выход ОДР на один километр пути на других участках дороги с аналогичными значениями грузонапряженности и пропущенного тоннажа с момента укладки рельсов, при этом принимается $P_{расч}$ не менее 0,1 шт./км в год. Число проверок в зимний и летний период ($N_{зим}$, $N_{л}$) и интервал между ними ($T_{зим}$, $T_{л}$) определяется исходя из $P_{расч}$ минимальных зимних температур, типа и закалки рельсов, используемого дефектоскопического комплекса, наработки рельсов и грузонапряженности на участке контроля.

Общее расчетное число проверок $N_{расч}$ за год определяется по формуле (2):

$$N_{расч} = N_{зим} + N_{л}. \quad (2)$$

Допускается отклонение от расчетных интервалов $T_{зим}$ и $T_{л}$ в пределах $\pm 10\%$. Летние проверки $N_{л}$ проводятся, начиная с апреля, продолжительностью равной произведению $N_{л} \times T_{л}$.

При $P_{расч}$ более 2 шт./км общее число проверок мобильными средствами дефектоскопии и съёмными дефектоскопами должно составлять 60 проверок в год.

При невозможности контроля рельсов съёмными ультразвуковыми дефектоскопами из-за низких температур (при температурах ниже -30°C) контроль осуществляют САМД, СВД только магнитным методом, а также натурным осмотром рельсов. При наступлении температур выше -30°C должны быть проведены пропущенные проверки ультразвуковым и магнитным методами контроля, результаты которых учитываются при корректировке числа последующих проверок. В этом случае интервал в днях между проверками определяется по формуле (3):

$$T_{зим}^{ост} = \frac{T_{зим}(N_{зим} - N_{зим}^{вып}) - T_{-30^{\circ}\text{C}}}{(N_{зим} - N_{зим}^{вып})}, \quad (3)$$

где $T_{зим}^{ост}$ - откорректированный интервал в днях между проверками с учетом пропущенных при низких температурах; $N_{зим}^{вып}$ - количество проведенных проверок до наступления низких температур; $T_{-30^{\circ}\text{C}}$ - продолжительность в днях периода низких температур.

3. Результаты

Минимальное число проверок в год должно быть не менее 6-ти (не реже одного раза в два месяца). Максимальное число ограничивается 60 проверками в год. На таких участках, с периодичностью контроля 60 раз в год, в зависимости от причин выхода ОДР в первоочередном порядке должны выполняться ремонтные работы, включая сплошную выправку пути и профильную шлифовку рельсов, а также сплошную замену рельсов [16].

Такие же мероприятия, но в плановом порядке, следует предусматривать на участках с устойчивым выходом ОДР, требующим проведения 37-60 проверок в год.

Для выявления опасных дефектов рельсов, обусловленных текущим содержанием пути, допускается увеличение количества проверок отдельных подучастков по показаниям вагона-путеизмерителя (при наличии просадок

третьей; четвертой степени).

4. Обсуждение

К технологическим задачам развития диагностики и мониторинга для высокоскоростных магистралей отечественных железных дорог следует отнести разработку и внедрение технических устройств, позволяющих проводить ультразвуковую диагностику (или аналогичную) при скорости движения диагностических устройств более 200 км/ч, например: акселерометры, гироскопы, энкодеры и другие приборы.

Также важным требованием является адаптация технических устройств, которые будут размещены на высокоскоростном диагностическом поезде к климатическим условиям нашей страны, поскольку Россия отличается разнообразием климатических зон, что создает дополнительные требования к оборудованию. Системы мониторинга, такие как лазерные сканеры, датчики и камеры должны эффективно функционировать при экстремальных температурах, высокой влажности, обледенении и других факторах.

Выводы

Для безопасного движения высокоскоростных поездов на ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург особое внимание необходимо уделять методом неразрушающего контроля для своевременного обнаружения и оперативного устранения неисправностей, поскольку даже малейшее отклонение от нормативных требований может спровоцировать за собой серьезные последствия. Высокоскоростные диагностические поезда являются одним из ключевых элементов современной железнодорожной инфраструктуры, обеспечивающих безопасность, надежность и эффективность эксплуатации высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Россия находится на этапе разработки и строительства ВСЖМ-1 Москва – Санкт-Петербург и имеет уникальную возможность адаптировать международный опыт и перенять передовые технологии.

Внедрение высокоскоростного диагностического поезда потребует решения ряда технологических и технических задач, однако успешное преодоление этих вызовов позволит не только повысить качество технического обслуживания высокоскоростной магистрали, но и укрепит позиции России, как одного из лидеров в области железнодорожного транспорта. Также это станет важным шагом на пути модернизации транспортной системы России в целом.

В статье рассмотрены мобильные технические средства для диагностики и мониторинга путевой инфраструктуры высокоскоростных магистралей, такие как ВДП и технические автотрисы. Приведены ВДП, применяемые в различных странах. На примере поезда «IRIS-320», показаны датчики и составность вагонов в поезде. Рассмотрен альтернативный вариант отечественных технологий мониторинга и диагностики ИИС. Определены основные функции автотрисы «Пионер-Интеграл-002». На основе анализа опыта различных стран предложено потребное количество мобильных технических средств и представлен расчет периодичности контроля рельсов неразрушающими методами.

Список использованной литературы

1. В поисках высоких скоростей. Что значит ВСМ для России? / В.В. Косой, П.А. Лавриненко, Н.А. Макуцкий, М.С. Фадеев [и др.] – М.: Арт Продакшн, 2024. – 77 с.
2. Локтев Д.А., Быков Ю.А., Коваленко Н.И. Использование метода анализа размытия изображения для определения внешних дефектов железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. №1. 2016. – С. 42 – 49.
3. Сычев В.П., Виноградов В.В., Быков Ю.А., Коваленко Н.И. Об автоматизированной технологии текущего содержания железнодорожного пути // Вестник МГСУ. №3. 2016. – С. 84-93.
4. Коваленко Н.И., Гринь Е.Н. Технология предотвращает угрозу// Мир транспорта. 2011. № 5. С. 138÷142.
5. Романов, И.А. Принципы оценки эффективности инновационных проектов в сфере транспорта // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 5 – С. 135-136.
6. Tsvetkov V. Ya. Opposition information analysis // European Journal of Technology and Design. – 2014. - Vol. (6), № 4, pp189-196.
7. Ефимов А.Н., Малинский С.В., Певзнер В.О. Исследование спектральных характеристик неровностей железнодорожного пути // Исследование взаимодействия пути и современного подвижного состава: межвузовский сборник научных трудов / ДИИТ. 1987. С. 45 – 52.
8. Певзнер В.О. Декоративность и стабильность пути//Путь и путевое хозяйство. 2005. №2. С. 23-26.
9. Detection and Maintenance for Railway Track Defects: A Review [Электронный ресурс] – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1140/1/012011/pdf>.
10. Development of track geometry inspection equipment for high-speed comprehensive inspection train in China [Электронный ресурс] – URL: <https://www.emerald.com/insight/2755-0907.htm>.
11. Track geometry monitoring using smartphones on board commercial trains [Электронный ресурс] – URL: https://www.researchgate.net/publication/361137897_Track_geometry_monitoring_using_smartphones_on_board_commercial_trains.
12. IRIS-320 AN ESSENTIAL RECORDING TRAIN FOR MAINTENANCE [Электронный ресурс] – URL: https://youngtransportpro.com/wp-content/uploads/2021/08/20_iris320.pdf.
13. Чекин А.А., Цифровая модель стрелочного перевода// Наука и образование транспорту. 2021. №2. С. 261÷265.
14. Nondestructive Testing Technologies for Rail Inspection: A Review [Электронный ресурс] – URL: <https://doi.org/10.3390/coatings12111790>.
15. Положение о системе неразрушающего контроля рельсов и эксплуатации средств рельсовой дефектоскопии в путевом хозяйстве железных дорог ОАО «РЖД», утверждённое распоряжением ОАО «РЖД» №2714р от 27.12.2012.
16. Парамонова Н.В., Оптимум для времени «окна». Мир транспорта. 2007. Т. 5. № 1 (17). С. 114-116. ISSN 1992-3252.

УДК 629.5.058.76:62-7

ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОПРИВОДА

Никитченко С.Л., к.т.н., доцент, E-mail: binom_a@rambler.ru

Игнатьева О.В., к.т.н., доцент, E-mail: lesjaignateva@rambler.ru

Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация

Гидравлический привод широко применяется в конструкциях наземных транспортно-технологических средств. Методы дистанционного диагностирования с автоматизированной оценкой технического состояния узлов и агрегатов гидропривода в режиме реального времени и мгновенная отправка результатов контроля на компьютер инженера по сервису позволяют осуществлять постоянный мониторинг удалённого объекта, снизить простои по техническим причинам, прогнозировать и предупредить назревающие отказы. Цель работы – исследовать возможности создания системы дистанционного диагностирования технического состояния гидропривода мобильных машин на основе отечественных компонентов. Авторы использовали аналитический метод исследования, установили перечень параметров технического состояния гидропривода, рассмотрели типовую структуру системы дистанционного диагностирования, для которой выбрали модели отечественных датчиков, устройства и протоколы обмена данными, инструменты разработки пользовательских программ.

Ключевые слова: гидропривод, техническое состояние, дистанционное диагностирование, телематическая система, датчик, протокол HART, GSM, TCP/IP

SELECTION OF SYSTEM ELEMENTS FOR REMOTE DIAGNOSTICS OF THE TECHNICAL CONDITION OF A HYDRAULIC DRIVE

Nikitchenko S.L., Candidate of Technical Sciences, associate professor,

E-mail: binom_a@rambler.ru

Ignatyeva O.V., Candidate of Technical Sciences., associate professor,

E-mail: lesjaignateva@rambler.ru

Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract

Hydraulic drive is widely used in the construction of ground transportation and technological facilities. Remote diagnostic methods with automated assessment of the technical condition of hydraulic drive components and assemblies in real time and instant transmission of control results to the service engineer's computer allow continuous monitoring of a remote facility, reduce downtime due to technical reasons, predict and prevent impending failures. The purpose of the work is to explore the possibilities of creating a system for remote diagnosis of the technical condition of hydraulic drives of mobile machines based on domestic components. The authors used an analytical research method, established a list of parameters for the technical condition of the hydraulic drive, examined the typical structure of the remote diagnostics system, for which they selected models of domestic sensors, devices and data exchange protocols, and tools for developing user programs.

Keywords: hydraulic drive, technical condition, remote diagnostics, telematics system, sensor, HART protocol, GSM, TCP/IP

Введение

В конструкциях современных машин распространены различные гидравлические системы, которые позволяют приводить в действие поступательно движущиеся или вращающиеся рабочие органы [1]. Гидравлический привод имеет особое значение для мобильных наземных транспортно-технологических средств – грузовых и специальных автомобилей, тракторов, сельскохозяйственной техники. С помощью гидропривода осуществляются рабочие процессы данных машин, поэтому для обеспечения качества работы транспортно-технологических средств важно следить за техническим состоянием отдельных узлов гидропривода. Сегодня актуальна перспективная стратегия поддержания работоспособности техники, ориентированная на постоянный или периодический контроль состояния систем и механизмов с предупреждением отказов и прогнозированием остаточного ресурса узлов и агрегатов машины.

При этом процесс диагностирования технического состояния у большинства машин остаётся довольно трудоёмким, требует их остановки и проведения дополнительных разборочных работ. Здесь простой негативно сказывается на технико-экономических показателях эксплуатируемых объектов. Существенно снизить простой машин по техническим причинам позволяют телематические системы [2] и методы дистанционного диагностирования [3], которые реализуются с применением современных информационных технологий и развитием бортовых систем машин. Благодаря своевременному обнаружению неисправностей с помощью таких систем можно снизить затраты на содержание и эксплуатацию техники до 30%.

С конца 90-х годов XX века методы дистанционного диагностирования технических объектов получили применение в виде SCADA-систем [4], а в настоящее время они стали обыденным инструментом Интернета-вещей и интегрируются с системами управления предприятиями ERP, CMMS [5], EAM [6]. Автоматизация процессов оценки технического состояния гидронасосов, гидромоторов, гидрораспределителей, фильтров и других «умных» составных частей гидропривода в режиме реального времени и мгновенная отправка результатов диагностирования на компьютер инженера по сервису позволяют осуществлять постоянный мониторинг технического состояния гидропривода, выявлять причины неисправностей, прогнозировать и предупреждать назревающие отказы. Реализация таких дистанционных технологий контроля мобильных технических объектов сегодня связана с процессами импортозамещения в отечественном машиностроении.

Цель данной работы – исследовать возможности создания системы дистанционного диагностирования технического состояния гидропривода мобильных машин на основе отечественных компонентов. В статье рассматривали гидроприводы с возможными характеристиками давления и расхода жидкости, характерными для насосов НШ-10 и НШ-32, которые широко применяются в конструкциях отечественных наземных транспортно-технологических средств.

1. Анализ темы с обзором источников

Задача разработки системы для дистанционного диагностирования технического состояния удалённого объекта требует системного подхода, при котором необходимо знать: устройство самого объекта, суть процессов при его работе, параметры технического состояния каждого узла объекта и существующие традиционные методы их диагностирования. Далее необходимы знания о принципах функционирования дистанционных систем диагностирования – методах сбора первич-

ных данных с помощью сенсоров, протоколах передачи данных и методах их анализа, принципах работы телеметрии и используемых средствах коммуникации, специализированном программном обеспечении.

1.1. Устройство и параметры технического состояния гидропривода

В качестве объекта диагностирования будем рассматривать типовой гидравлический привод, схема которого показана на рисунке 1. Гидропривод содержит гидробак (ГБ) 1 с маслом, шестерённый гидронасос (ГН) 2 типа НШ, гидрораспределитель (ГР) 3, гидроцилиндр (ГЦ) 4 одностороннего действия. Очистка масла осуществляется фильтром 5, предохранительный клапан (ПК) 6 позволяет избежать разрушения узлов гидросистемы при нештатных ситуациях, вызывающих повышение давления. Все перечисленные элементы соединены рукавами высокого давления и трубопроводами.

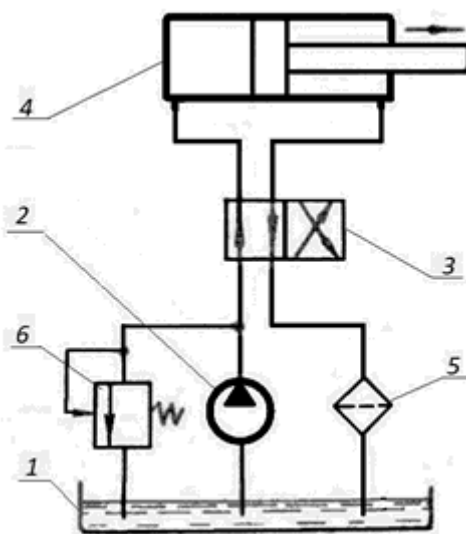


Рисунок 1. Принципиальная схема гидропривода

Рассмотрим параметры технического состояния гидропривода [7]. Работоспособность ГН принято оценивать по величине давления в нагнетательной магистрали ГН и по значению расхода масла (подаче) ГН. Давление срабатывания ПК также является диагностируемым параметром при оценке технического состояния гидропривода.

Состояние ГР характеризуется величиной утечек жидкости, которые могут быть определены как разность между подачей ГН и величиной расхода жидкости в магистрали после ГР.

Степень засоренности фильтра можно оценить величиной давления масла в сливной магистрали перед фильтром. Номинальное значение этого давления у разных конструкций гидроприводов может отличаться, но максимальное давление слива в гидросистеме, например у отечественных тракторов, строго регламентировано ГОСТ 32485-2013 и не должно превышать 1 МПа.

Оценку состояния гидроцилиндра проводят по значению давления в надпоршневой полости и соответствующей ему величине скорости и линейного перемещения штока, а также визуально по наличию подтекания масла через уплотнения ГЦ.

Недостаток рабочей жидкости в гидросистеме приводит к потере её работоспособности, поэтому уровень масла в баке тоже является контролируемым параметром.

При работе системы нагрев масла более 50 °С недопустим, поскольку при этом изменяются его вязкостные свойства и это негативно сказывается на работе гидропривода. Реальные гидроприводы могут иметь радиатор на гидробаке для охлаждения масла. Контроль температуры масла в баке является обязательным, поскольку это косвенно позволит судить о состоянии системы охлаждения масла.

Существующие типовые технологии диагностирования в стационарных условиях реализуются на определённом режиме работы гидронасоса, т.е. необходимо знать частоту вращения приводного вала насоса [8]. Наиболее распространённым и точным методом диагностирования является статопараметрический метод, при котором имитируются определённые нагрузочные режимы гидропривода, например с помощью дросселя-расходомера приспособления КИ-5473 ГОСНИТИ, и при установленном давлении определяются значения расхода жидкостей в нужных сечениях. Все это сопровождается разборочно-сборочными работами на остановленной машине, что довольно трудоёмко. Технологию диагностирования гидропривода необходимо автоматизировать и реализовать дистанционно.

1.2. Существующие системы дистанционного диагностирования удалённых объектов

Контролировать на расстоянии различные объекты и процессы люди начали после изобретения телематических систем. Они представляют собой комплекс автоматизированных средств, который позволяет получить первичную информацию о параметрах технологических процессов, преобразовать и передать информацию по разным каналам связи, выполнить приём, обработку и регистрацию информации. Первые телематические системы для гражданских отраслей появились в 70-х годах, их использовали для контроля стационарных удалённых объектов. Позже выделился целый класс таких систем с названием SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) – система диспетчерского контроля, сбора данных и дистанционного управления объектами. К 90-м годам XX столетия SCADA-системы приобрели человеко-машинный интерфейс и стали частью автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) предприятий. Итоговая информация в них представляется человеку в удобном для восприятия виде с помощью специального программного обеспечения (приложения).

Известными телематическими системами с функциями удалённого диагностирования объектов и планирования мероприятий их технической эксплуатации являются современные зарубежные продукты JDLINK, Fleet Complete, TELEMATICS (CLAAS), Cat Product Link [9] и др. SCADA-система InTouch существует на рынке почти 30 лет и является одной из самых популярных систем в мире. Известными российскими телематическими системами являются «АвтоГРАФ» – система спутникового мониторинга и контроля транспорта [10], MasterSCADA от компании НПФ ИнСАТ – автоматизация объектов любого масштаба, «PCM Агротроник» и «Агромонитор» – системы точного земледелия и дистанционного диагностирования машин [11] и др. Ведутся работы по созданию аппаратно-программных платформ сбора и обработки эксплуатационных данных сельскохозяйственной техники [12].

Имеющийся перечень систем дистанционного диагностирования не снижает актуальности дальнейших исследований в области комплексной оценки технического состояния гидроприводов мобильных машин в удалённом режиме.

2. Методы проведения исследований

Методологическую основу исследования составили методы анализа, синтеза и логического обобщения. Теоретической и методической основой исследования являются труды ученых, посвященные исследованию сущности, структуры и условий функционирования информационных систем для дистанционного диагностирования технических объектов, материалы открытого доступа от ведущих зарубежных и российских компаний, осуществляющих разработку и внедрение телематических систем и их компонентов.

3. Результаты и их обсуждение

Рассматриваемая телематическая система с функцией дистанционного диагностирования традиционно представляет из себя три взаимосвязанных блока: удалённый терминал (RTU – Remote Terminal Unit), диспетчерский пункт управления (MTU – Master Terminal Unit) и коммуникационная система (CS – Communication System).

RTU подключается непосредственно к контролируемому объекту и осуществляет сбор информации о параметрах технического состояния объекта в режиме реального времени. RTU является автономным устройством связи с объектом (УСО) и в реальных продуктах часто выполнен в виде микроконтроллерного блока (трекера) с набором датчиков (преобразователей), присоединяемых к трекеру двухпроводной линией. Питание датчиков напряжением 24 В осуществляется по этим же двум проводам. Значения параметров технического состояния объекта (механические величины) измеряются датчиками с помощью так называемой токовой петли 4...20 мА [13]. Обмен данными между датчиками и контроллером может осуществляться по протоколам Modbus RTU, HART или др. Датчики генерируют аналоговые сигналы, которые передаются по внутренней сети RTU к контроллеру через устаревший интерфейс 4-20 мА или через более современный последовательный интерфейс RS-485. Последний рассматривается в качестве физического уровня для протокола передачи данных Modbus RTU.

Применение популярного в промышленных сетях протокола скоростного адресного доступа к удаленному преобразователю (Highway Addressable Remote Transducer, HART) дает возможность передавать больше информации по той же двухпроводной линии, при этом протокол HART может отправлять цифровые сигналы, накладывая их на аналоговые сигналы без искажений или помех. Устройства, основанные на протоколе HART, передают аналоговый сигнал, используя существующий подход 4–20 мА, а также цифровые сигналы, используя частотную манипуляцию Bell 202. Это гарантирует, что аналоговый сигнал не будет подвержен влиянию цифрового сигнала. Уже существует беспроводная версия этого протокола – WirelessHART, которая работает на основе технологии самоорганизующихся ячеистых сетей (Mesh Network). Это очень полезное свойство версии протокола и его в будущем можно использовать для самоорганизации системы на уровне RTU при добавлении новых точек диагностирования объекта. Однако, пока беспроводной вариант в нашем случае работать не сможет, поскольку есть ограничения на расстояния установки адаптеров WirelessHART от металлических поверхностей. Микроконтроллер MTU в своей структуре содержит GSM-модем, GPRS-модем или универсальный вариант GPRS/GSM-модема. Это может быть выполнено также в виде отдельного блока передачи данных DTU (Data Transfer unit).

Телематическая система в принципе способна передавать данные от RTU к MTU по какому-то одному протоколу беспроводной связи. Протокол пакетной передачи данных GPRS является надстройкой стандарта GSM и характеризуется относительно небольшой пропускной способностью по сравнению, например с протоколом GSM 4G (LTE). Если объем передаваемых данных измеряется килобайтами, то в устройстве контроллера RTU или в блоке DTU достаточно иметь GPRS-модем. А в случае увеличения объема трафика свыше Mb (например мы поставим web-камеру для визуального контроля состояния гидроцилиндра) понадобится GSM-модем.

При современном развитии Интернет-технологий уже нерационально рассматривать MTU в виде одиночного компьютера с приложением для пользователя и с дополнительными устройствами подключения к каналам связи. Устройства пользователей (девайсы) – ноутбуки, планшеты или смартфоны могут вообще ничего не содержать из элементов рассматриваемой телематической системы. Система управления базой данных (СУБД) с результатами телеметрии и приложение для доступа к системе в этом случае располагаются на облачном сервере, а приложение для доступа все заинтересованные специалисты могут открывать через обычный интернет-браузер. Либо здесь может быть вариант, когда на девайс инженера устанавливается клиентское приложение, которое позволяет работать с облачным сервером.

Коммуникационная система CS обеспечивается путем интеграции разрабатываемой телематической системы в уже существующие информационные инфраструктуры – каналы сотовой связи стандарта GSM в сочетании с проводным Интернетом. В России мобильная связь стандарта GSM уже очень развита, поэтому для нашего проекта здесь ничего создавать не нужно, а просто использовать как есть. Протокол WAN (Wide Area Network) глобальной вычислительной сети участвует в работе телематической системы – он служит для объединения разрозненных сетей так, чтобы пользователи, компьютеры и удаленные устройства, где бы они ни находились, могли взаимодействовать со всеми остальными участниками глобальной сети. Для бесшовного переключения между различными вариантами WAN-подключений здесь используется протокол Mobile IP (MIP). Переключение происходит автоматически за очень короткий интервал и не воспринимается как прерывание связи.

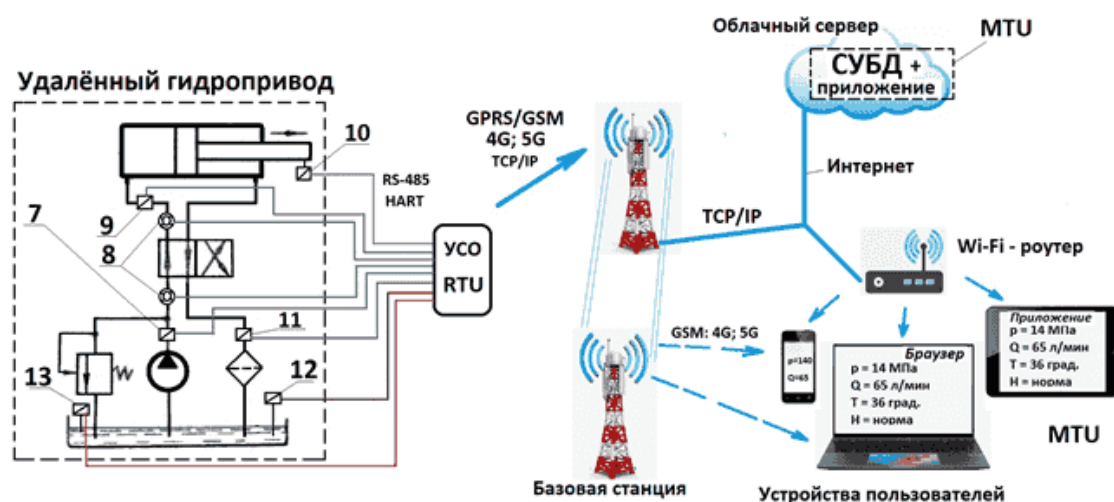


Рисунок 2. Схема системы дистанционного диагностирования гидропривода

С учётом приведённых сведений, на рисунке 2 показана схема системы дистанционного диагностирования гидропривода мобильного транспортно-технологического средства. Места установки датчиков на схеме совпадают с местами присоединения диагностических приспособлений при традиционной технологии диагностирования. В остальном схема содержит типовой набор элементов и кардинально не отличается от существующих аналогов.

Анализ продукции российских производителей сенсорных устройств позволил выбрать для рассматриваемой системы диагностирования необходимый набор датчиков, которые перечислены в таблице. В таблице 1 указаны типы, места установки датчиков, возможные пределы значений измеряемых величин и рекомендуемые модели датчиков. Номера датчиков совпадают с номерами, приведенными на схеме рисунка 2.

Таблица 1. Характеристики и места установки датчиков

Тип и номер датчика	Место установки	Измеряемый параметр	Пределы измерения	Модели датчиков	Выходной сигнал
Датчик давления масла (7)	Напорная магистраль ГН	Давление в напорной магистрали ГН	0...20 МПа	МПД-07; DMP 333; ЕСМА Р500	4...20 мА; 0...5 В; HART; RS485
Датчик расхода масла (8)		Подача ГН	5...200 л/мин	ЕСМА Р500; US-800; ЭМИС-ДИО 230	4...20 мА; HART; RS485
Датчик расхода масла (8)	Напорная магистраль после ГР	Расход через распределителя ГР	5...200 л/мин	ЕСМА Р500 US-800; ЭМИС-ДИО 230	4...20 мА; HART; RS485
Датчик давления масла (9)	На входе в надпоршневую полость ГЦ	Давление в надпоршневой полости ГЦ	0...20 МПа	МПД-07; DMP 333; ЕСМА Р500	4...20 мА; 0...5 В; HART
Датчик линейных перемещений (10)	Корпус или шток гидроцилиндра ГЦ	Длина выхода штока ГЦ	0...300 мм	ТЛ-С 10-0	4...20 мА; RS485 ModBus RTU
Датчик давления масла (11)	Сливная магистраль перед фильтром	Давление на входе в фильтр гидросистемы	0,05...1,0 МПа	ИЗМЕРКОН-ДИ-21; СЕНСОР-М-125-И1-t2-0,25-K1-(1,6МПа/42)/М	4...20 мА RS485 Modbus RTU; HART
Датчик уровня (12)	Бак гидросистемы	Уровень масла в баке ГС	0...1000 мм	МПУ-01; ДИ/Г-27; Эсспорт ТД-150; Arnavi LS 2DF	4...20 мА; HART; RS485; 0,2...9,5 В
Датчик температуры (13)	Бак гидросистемы	Температура масла в баке	-35 ... +80 °С	МПТ-01; СКОРСА 01-П-70-300-III	4...20 мА;
Датчик частоты вращения вала ГН	Зона привода ГН	Частота вращения ведущего вала ГН	0...3500 об/мин	КАМАЗ Startvolt; ДТА СКОРСА 02-1-200	4...20 мА; 0,2...10 В; 1,25...6 В

Все указанные в таблице датчики являются продукцией российских компаний «Мераприбор», «ЭСКОРТ», «Измерение и Контроль», «СКОРСА», «Тета Технологии», ГК «ЭМИС», «ЭЛ-СКАДА» и «ТрейсЛайн». Видно, что предложения отечественных производителей датчиков полностью обеспечивают потребность в них при решении рассматриваемой задачи.

Имеющиеся серийные образцы датчиков расхода в основном предназначены для работы под давлением не более 6,4 МПа, а рабочее давление в рассматриваемом

нами гидроприводе достигает 16 МПа и более. Компании-производители могут изготовить датчики, работающие под высоким давлением, по специальному техническому заданию от заказчика. Также в настоящее время хорошей тенденцией является изготовление гидроаппаратов, уже оснащённых сенсорами. Такие устройства легче интегрировать с телематической системой. Это было бы очень удобно для организации диагностирования, например гидроцилиндра. Размещение магнито-стрикционного датчика линейных перемещений ТЛ-С 10-0 на штоке гидроцилиндра не очень рационально, поскольку соединительные провода и сам датчик могут быть повреждены внешними предметами при работе ГЦ. В мире давно практикуется размещать сенсорные устройства внутри конструкции цилиндров. Российская компания «Орион» развивает производство гидроцилиндров со встроенными датчиками положения.

Датчики являются существенной частью блока RTU, но в нем еще должен быть микроконтроллер с GSM/GPRS модемом. В России выбор микроконтроллеров собственного производства пока ограничен. Однако, для рассматриваемой задачи не нужны большие вычислительные мощности и здесь можно подобрать варианты российских микроконтроллеров. Например продукты отечественных компаний «Миландр» и «Микрон», которые специализируются на разработке микроконтроллеров для интернета вещей, систем мониторинга и телеметрии. Компания «Миландр» выпускает 32-разрядный микроконтроллер MDR1206FI на базе процессорного ядра BM-310S с открытой архитектурой набора команд RISC-V (не требует лицензионных отчислений), а также микроконтроллеры типа K1986BE92FI на базе процессорного ядра ARM Cortex-M3, являющиеся изделиями с высоким уровнем ответственности. Компания «Микрон» в 2024 году начала массовые продажи микроконтроллера МІК32 «Амур» (K1948BK018) с архитектурой набора команд RISC-V. Российские производители также освоили выпуск модемов GPRS/GSM. Их производят компании АО «Телеофис», iRZ, АО «Элдис», ОБЕН, Segnetics и др. Для наших целей подойдет GSM модем TELEOFIS RX108-R4 с типом основного интерфейса RS-485 и с поддержкой режима GPRS. Модем выполнен на базе итальянского GSM-модуля Telit GL865-DUAL V3.1 и предназначен для беспроводного обмена данными в системах дистанционного мониторинга и диспетчеризации промышленных объектов. Встроенный интерпретатор языка программирования Python позволяет пользователю загружать в модем собственное ПО (пользовательские скрипты) и управлять прибором без использования внешнего микроконтроллера. Т.е., в системах телеметрии сегодня при определённых условиях можно обходиться без микроконтроллеров и отправлять данные через GPRS/GSM-модемы. Выбранный модем способен реализовать логику управления без использования внешнего микроконтроллера.

На рисунке 3 показан внешний вид датчика давления МПД-07, GSM модема и микроконтроллера МІК32 «Амур».



Рисунок 3. Датчик давления МПД-07 (а), GSM/GPRS модем TELEOFIS RX108-R4 (б) и микроконтроллер МІК32 «Амур» (в)

В блоке MTU нашей системы основными компонентами являются база данных и приложение для пользователей. СУБД должна иметь соответствующие характеристики для работы на интернет-сервере, быть надёжной и бесплатной. Одной из систем с растущей популярностью здесь является СУБД PostgreSQL, которая распространяется по свободной лицензии. Можно использовать её, либо построенные на ее основе версии российских СУБД – Tantor, Proxima DB, Postgres Pro, Jatoba, Квант-Гибрид, Arenadata PG. Заслуживают внимания также полностью российские СУБД Линтер, SoQoL, РЕД База Данных и др. При выборе языка программирования и среды разработки для создания пользовательского web-приложения нужно учитывать, что информационная система будет не только выполнять функции дистанционной диагностики, но и в перспективе решать задачи прогнозирования остаточного ресурса узлов гидропривода. Следовательно, нужно иметь серьёзные библиотеки анализа данных. Для этих целей подходит язык Python. Бесплатный фреймворк с открытым кодом Django позволяет писать web-приложения на языке Python, при этом официально поддерживает и предоставляет функционал для СУБД PostgreSQL.

Заключение

Выполненное исследование показывает, что независимо от внешних санкций, отечественные производители сенсорных устройств, модулей сбора информации с удалённых объектов и ее передачи по каналам GSM, а также разработчики программных средств анализа, хранения и визуализации информации способны обеспечивать импортозамещающие технологические цепочки при создании системы дистанционного мониторинга и диагностирования гидроприводов мобильных машин. Все элементы рассматриваемой системы уже выпускаются отечественными производителями. Данное исследование актуально, а его результаты позволят сократить количество отказов гидроприводов машин, время поиска их неисправностей и затраты на эксплуатацию.

Список использованной литературы

1. Трушин Н.Н. Разработка системы классификации объемных гидравлических приводов машин // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2020. № 3 (9). С. 18-22.
2. Голубев И.Г., Мишуров Н.П., Гольяпин В.Я., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. Системы телеметрии и мониторинга сельскохозяйственной техники: аналит. обзор. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 76 с.
3. Фукс В.А. Универсальная система удаленной диагностики транспортных средств. Молодой ученый. 2019. № 12 (250). С. 40-44.
4. Алексеев Д.А. Основные понятия и структура системы SCADA // Научно-исследовательский центр "Technical Innovations". 2023. № 13. С. 110-114.
5. Никитченко С.Л., Лесник Н.А., Смыков С.В. Управление техническим обслуживанием сельскохозяйственной техники в условиях автоматизации и цифровизации производства // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 33-42. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-4-33-42>.
6. Никитченко С. Л., Капкаев А. А., Юхнов В. И., Муконина М. И. Управление жизненным циклом сельскохозяйственной техники на этапе эксплуатации в условиях цифровизации производства // Аграрный научный журнал. 2023. № 10. С. 194-204. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2023i10pp194-204>. (дата обращения: 17.02.2025)

7. Мукушев Ш.К. Диагностирование гидропривода / Мукушев Ш.К., Гамалий Д.А., Байбисенова А.А. // В сборнике: Образование. Транспорт. Инновации. Строительство. Сборник материалов II Национальной научно-практической конференции. 2019. С. 105-108.
8. Чиликин А.А., Трушин Н.Н. Сравнительный анализ современных методов диагностики состояния гидравлических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 117–127.
9. Никольский С.М. Автоматизация производственных процессов за счет внедрения прогрессивной измерительной техники // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 9. С. 307-312.
10. Михайлов А.С. Система мониторинга и контроля транспорта "АвтоГраф" как неотъемлемая часть современной эксплуатации машинно-тракторного парка // В сборнике: Передовые достижения науки в молочной отрасли. Сборник научных трудов по результатам работы IV Международной научно-практической конференции, посвящённой дню рождения Николая Васильевича Верещагина. 2022. С. 211-215.
11. Шишурин С.А. Современные цифровые решения для мониторинга состояния мобильных энергетических средств / Шишурин С.А., Гончаров Р.Д., Исаев А.Д., Россошанский С.Д. // В сборнике: Проблемы и перспективы развития АПК: технические и сельскохозяйственные науки. Материалы II Региональной научно-технической конференции. Саратов, 2024. С. 36-42.
12. Зуб Д.В. Разработка аппаратно-программной платформы сбора и обработки эксплуатационных данных сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. – 2020. – Т. 58. – № 1 (138). – С. 162-167.
13. Зиязев А.Н. Датчики давления с токовой петлей 4-20 мА. Принцип работы. Диагностика неполадок // В сборнике: EurasiaScience. Сборник статей LVI международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 68-70.

КОНТАКТЫ

Редакция

+7 (916) 433-60-72
journal@vniias.ru

Адрес

АО «НИИАС», Россия, г. Москва, 109029
Нижегородская ул., д.27, стр. 1

+7 (495) 967-77-06
info@vniias.ru



ВНИИАС