

# Наука и технологии железных дорог

Стратегия развития  
железных дорог

Интеллектуальные системы  
и технологии на транспорте

Геоинформационные технологии  
и системы на транспорте

Цифровые методы  
на железнодорожном  
транспорте

Организация работ  
и безопасность движения  
на транспорте



**3** стр.

**Стратегия развития железных дорог**

«Динамическая маршрутизация транспортных средств»

Лёвин Б.А., Розенберг И.Н., Цветков В.Я.

**10** стр.

**Стратегия развития железных дорог**

«Мировые тренды развития систем управления движением поездов»

Озеров А.В.

**15** стр.

**Интеллектуальные системы и технологии на транспорте**

«Информационная транспортная коммуникативистика»

Левицкий Л.О.

**22** стр.

**Интеллектуальные системы и технологии на транспорте**

«Применение агентных систем для оптимизации грузоперевозок»

Мельников Д.А.

**29** стр.

**Интеллектуальные системы и технологии на транспорте**

«Анализ надежности транспортных систем с использованием нечеткой логики»

Никашина П.О.

**38** стр.

**Геоинформационные технологии и системы на транспорте**

«Применение геоинформационной перколяции для исследования транспортного трафика»

Буравцев А.В.

**44** стр.

**Геоинформационные технологии и системы на транспорте**

«Пространственный мониторинг транспортной инфраструктуры»

Ознамец В.В.

**50** стр.

**Цифровые методы на железнодорожном транспорте**

«Фильтрация изображений земляного полотна, полученных с помощью лазерного сканирования»

Броневиц А.Г.

**55** стр.

**Организация работ и безопасность движения на транспорте**

«Современное производственно-нормативное планирование ресурсов путевого хозяйства линейных предприятий ОАО «РЖД»»

Коваленко Н.И., Коваленко А.Н.

**60** стр.

**Организация работ и безопасность движения на транспорте**

«Технологические и методические аспекты развития методики определения стоимости вагоно-часа»

Дятчин П.А., Коваленко Н.А.

УДК: 519.113.115+681.3

# Динамическая маршрутизация транспортных средств

## Dynamic Vehicle Routing

**Лёвин Б.А.**, д.т.н., профессор, Президент, Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ),  
E-mail: lyevin@rut-miit.ru, Москва, Россия

**Lyovin B.A.**, D.ofSci(Tech), Professor, President, Russian University of Transport, RUT (MIIT),  
E-mail: lyevin@rut-miit.ru, Moscow, Russia

**Розенберг И.Н.**, Чл.-корр.РАН, д.т.н., профессор, Российский университет транспорта (МИИТ),  
E-mail: rozenberg.in@miit.ru, Москва, Россия

**Rozenberg E.N.**, Corresponding Member of RAS, D.ofSci.(Tech), Professor, Vice-Rector,  
Russian University of Transport (MIIT), E-mail: rozenberg.in@miit.ru, Moscow, Russia

**Цветков В.Я.**, д.т.н., профессор, начальник научного отдела, АО «НИИАС»,  
E-mail: cvj2@mail.ru, Москва, Россия

**Tsvetkov V.Ya.**, D.ofSci.(Tech), Professor, Head of Scientific Department, JSC "NIIAS",  
E-mail: cvj2@mail.ru, Moscow, Russia



### Аннотация

В статье исследуются методы динамической маршрутизации на транспорте. Рассматриваются виды маршрутизации, содержание динамической маршрутизации, описаны методы ее реализации. Дана систематика видов маршрутизации по исходным условиям и особенностям применения. Показано значение и необходимость ситуационного моделирования в динамической маршрутизации. Раскрывается содержание метода двойного горизонта при динамической маршрутизации, исследована маршрутизация электрического транспорта. Показано, что динамическая маршрутизация решает задачу дискретной оптимизации с подключением факторов разного качества: организационных, пространственных, экономических, технических, энергетических. Доказано, что динамическая маршрутизация является обязательным компонентом управления транспортом в мегаполисах и в условиях роста интенсивности транспортных потоков.

**Ключевые слова:** транспорт, маршрутизация, динамическая маршрутизация, эвристика, ситуационное моделирование.

### Abstract

The article explores the methods of dynamic routing in transport. The types of routing, the content of dynamic routing are considered, the methods of its implementation are described. The systematics of types of routing according to initial conditions and features of application is given. The importance and necessity of situational modeling in dynamic routing is shown. The content of the double horizon method with dynamic routing is revealed, the routing of electric transport is investigated. It is shown that dynamic routing solves the problem of discrete optimization with the inclusion of factors of different quality: organizational, spatial, economic, technical, energy. It has been proven that dynamic routing is a mandatory component of transport management in megacities and in the conditions of increasing traffic intensity.

**Keywords:** transport, routing, dynamic routing, heuristics, situational modeling.



## Введение

Маршрутизацией транспортных средств (vehicle routing problem – VRP) называют формирование маршрутов транспортных средств [1]. Разделяют маршрутизацию: транспортных средств, транспортных потоков [2], потоков грузов [3], пассажиропотоков. Маршрутизация транспортных средств связана с планированием маршрута для отдельных транспортных средств или парка. Маршрутизация транспортных потоков имеет место в мегаполисе [5] или при генерализации транспортных сетей.

Маршрутизация потоков грузов связана с мультимодальными перевозками и перегрузкой груза с одного транспортного средства на другой. Маршрутизация пассажиропотоков имеет субсидиарный характер, поскольку пассажиров можно рассматривать как активный груз, который пересаживается с одного вида транспорта на другой и выбирает маршрут исходя из личных побуждений. Пассажиры при организации своих маршрутов используют технологию мобильный краудсенсинг (crowdsensing) [6]. Она заключается в возможности использования смартфонов для анализа ситуации и выбора маршрутов. Такси, как активное транспортное средство, использует дополнительно технологию «краудмаппинг» (Crowdmapping) [7], которая включает использование навигатора и выбора маршрута движения с помощью электронных карт.

Маршрут является ориентированным графом, поэтому при маршрутизации используют топологические модели как основу выбора маршрута. Динамической маршрутизацией называют технологию выбора маршрута и последующую его корректировку или изменение. Во многих случаях такая маршрутизация является ситуационной и требует ситуационного анализа [8]. Учет пространственных факторов требует использования геоинформатики, геоинформационного моделирования [9] и ситуационного геоинформационного моделирования [10]. Динамическая маршрутизация связана с дискретной оптимизацией [11], эвристикой, агентными технологиями, топологическим анализом и рядом новых методов типа «двойного горизонта». Это направление требует исследования и развития.

## Постановка и виды задач маршрутизации

Формулировка задачи маршрутизации транспортных средств (VRP) была введена как обобщение задачи коммивояжера (TSP), VRP обычно определяется на графе

$$G=(V, E, C),$$

где:  $V=(v_0, v_n)$  множество вершин;

$E=(v_i, v_j)$  множество дуг ( $v_i \neq v_j$ );  $v_i, v_j \in V$

$C=(c_{j,i})$  – матрица весов или в простейшем случае затрат.

В зависимости от весовых характеристик транспортного графа выбор начального маршрута может существенно меняться. Традиционно начальная вершина транспортной сети  $v_0$  называется депо, а остальные вершины в множестве  $V$  представляют клиентов (или запросы), которые необходимо обслужить. VRP состоит в нахожде-

нии набора маршрутов для  $K$  одинаковых транспортных средств, базирующихся в депо, таких, что каждая из вершин посещается ровно один раз, при минимизации общей стоимости маршрута.

К одинаковых транспортных средств является ограничительным условием. Существуют модификации этой задачи, например, Capacitated VRP (CVRP). В задаче CVRP у каждого клиента есть спрос на товар, а транспортные средства имеют конечную вместимость. Существует задача VRP с временными окнами (Time Windows) (VRPTW), где каждого клиента необходимо посетить в течение определенного периода времени. Существует задача VRP с забором и доставкой (with Pick-up and Delivery) (PDP), в которой товары должны быть забраны и доставлены в определенных количествах в вершины транспортного графа. Фирма международной доставки DHL решает именно такую задачу. Существует задача с неоднородным парком (Heterogeneous fleet) (HVRP), где транспортные средства имеют разную вместимость перевозимого груза. Проблемы маршрутизации, связанные с перемещением людей между местоположениями, называются проблемой Dial-A-Ride-Problem (DARP) для наземного транспорта и Dial-A-Flight-Problem (DAFP) для воздушного транспорта.

В настоящее время при определении маршрута транспортных средств, реальные приложения часто включают два важных фактора: эволюцию и качество информации [12]. Эволюций информации [12] обозначают динамическую информационную ситуацию, в которой информация, доступная планировщику маршрута (компьютер или человек), может изменяться в процессе выполнения маршрутов, например, при поступлении новых запросов клиентов.

Качеством информации [12] обозначают возможную неопределенность информации, например, когда запрос клиента известен только как интервальная оценка диапазона его спроса.

Кроме того, в зависимости от задачи и доступной технологии, маршруты транспортных средств могут проектироваться либо статически (априори), либо динамически. Например, VRP со стохастическим спросом (VRPSD) можно рассматривать с обеих точек зрения. Со статической точки зрения проблема состоит в том, чтобы априори спроектировать набор надежных маршрутов, которые будут претерпевать незначительные изменения во время их выполнения. С динамической точки зрения проблема маршрутизации состоит в разработке маршрутов транспортных средств в режиме онлайн, сообщая транспортному средству, какого клиента обслуживать следующим, как только оно становится бездействующим.

## Типы маршрутизаций

Выделяют пять типов задач маршрутизации по исходным условиям:

- статические и детерминированные;
- статические и стохастические;



- динамические и детерминированные; динамические и стохастические;
- динамическая маршрутизация.

Между этими задачами нет четких границ.

В статических и детерминированных задачах все входные данные известны заранее, и маршруты транспортных средств не меняются после их выполнения. Эта классическая проблема подробно описана в литературе. Примером ее является транспортная задача.

Статические и стохастические проблемы характеризуются входными данными, частично известными как случайные величины, реализации которых обнаруживаются только во время выполнения маршрутов. Кроме того, предполагается, что маршруты разработаны априори и впоследствии допускаются лишь незначительные изменения. Например, допустимые изменения включают планирование поездки обратно в депо или пропуск клиента. Приложения этой категории не требуют какой-либо технологической поддержки. Наиболее изученными являются три случая:

- стохастические клиенты, когда клиент должен быть обслужен с заданной вероятностью;
- стохастическое время, в котором либо время обслуживания, либо время в пути моделируются случайными величинами;
- стохастические требования, которые являются известными в рамках интервалов, но конкретные значения их параметров могут меняться.

В динамических и детерминированных задачах часть или все входные данные неизвестны и обнаруживаются динамически во время оперативного проектирования маршрута или выполнения маршрутов. Для этих задач маршруты транспортных средств постоянно переопределяются, что требует технической поддержки для связи в реальном времени между транспортными средствами и лицом, принимающим решения (например, мобильные телефоны и глобальные системы позиционирования). Этот класс задач также упоминается некоторыми авторами как онлайн или в режиме реального времени. Однако детерминированность исключает неопределенность и представляет собой набор возможных известных динамических информационных ситуаций, действия в которых предопределены. В этих случаях используют набор заранее готовых прескриптивных [13] моделей.

Динамические и стохастические проблемы имеют часть или все свои входные данные, неизвестные и обнаруживаемые динамически во время выполнения маршрутов, но, в отличие от последней категории, стохастические знания, которые можно использовать, доступны для динамически раскрываемой информации. В этой ситуации маршруты транспортных средств могут постоянно переопределяться с помощью технической поддержки. Динамические задачи являются ситуационными, то есть зависят от ситуации. Они требуют формирования модели информационной ситуации и систематики информационных ситуаций.

Динамическая маршрутизация включает условия четвертой и третьей задачи, но дополняется условиями, связанными не только с маршрутами, но и с диспетче-

ризацией транспортных средств, например, управление парком машин скорой помощи. Сюда также относятся проблемы управления дальнемагистральными автомобильными перевозками. Динамическая маршрутизация выходит за рамки топологии и дискретной математики и подключает когнитивные и мета эвристические компоненты.

Первая задача динамической маршрутизации транспортных средств состояла в том, что запросы клиентов при заданной поездке из пункта отправления в пункт назначения появляются непредсказуемо динамически. Эта задача решается методами эвристики и мета эвристики [14, 15]. Позже это условие усилилось тем, что клиент, запрашивающий услугу, всегда хочет, чтобы его обслужили как можно раньше. Это требует немедленного перепланирования маршрута. В последнее десятилетие для решения подобной задачи были разработаны интеллектуальные транспортные системы (ИТС) [16], которые основаны на сочетании технологий геолокации с точными географическими информационными системами и все более эффективным аппаратным и программным обеспечением для обработки данных и планирования операций. Появились работы, основанные на теории игр [17], решающие подобные задачи.

## Методы двойного горизонта

Динамическая проблема вывоза и доставки с временными окнами (PDPTW) решается методов двойного горизонта [18] или скользящей ситуации. В динамическому PDPTW будущие запросы не моделируются и не прогнозируются стохастически. Стандартной методологией решения для динамического VRPTW является использование скользящего временного горизонта. При назначении нового запроса транспортному средству может быть предпочтительнее учитывать влияние решения как на краткосрочную, так и на долгосрочную перспективу. В частности, более эффективное управление временем простоя в отдаленном будущем может помочь снизить стоимость маршрутизации. Результаты вычислений показывают преимущество использования двойного горизонта в сочетании с эвристикой вставки и улучшения.

Другой вариант двойного горизонта используют для распределения причалов и назначения причальных кранов с незапланированными судами. Портовые операции обычно страдают от неопределенностей, таких как время прибытия судов и время обработки, а также незапланированные суда. Чтобы решить эту проблему, в этом исследовании представлена специфическая проблема динамического распределения причалов и назначения кранов (BACASP), когда в порт прибывают незапланированные суда, которая названа специфической проблемой распределения причалов и назначения причальных кранов для незапланированных судов (UBACASP).

Предлагается основанный на скользящем горизонте метод декомпозиции UBACASP на многоэтапное >>>

статическое решение BACASP, в котором метод оптимизации гибридного скользящего горизонта на основе перепланирования основан на марже путем включения событийно-ориентированных и периодических стратегий скользящего горизонта в качестве срочности. динамических событий оценивается. В каждом катящемся горизонте, смешанная модель целочисленного линейного программирования (MILP) представлена для BACASP, чтобы минимизировать общее время пребывания судов в порту и штрафы за задержки, связанные с пространственными и временными ограничениями, такими как длина непрерывного причала, количество причальных кранов (QCs) и отсутствие пересечения QC.

Стратегия дискретизации предназначена для разделения непрерывного причала на дискретные сегменты и преобразования BACASP в задачу дискретной комбинаторной оптимизации, которая эффективно решается с помощью предлагаемого адаптивного алгоритма поиска в больших окрестностях (ALNS). Проводятся тематические исследования с различными характеристиками проблемы, чтобы доказать эффективность методов решения, предложенных в этом исследовании. Кроме того, сравниваются характеристики ALNS и существующих методов решения BACASP.

## Логистика электронной коммерции

Логистика электронной коммерции требует быстрых и эффективных услуг электронного исполнения для доставки товаров потребителям в течение короткого промежутка времени для выполнения требований заказа клиента. Это приводит к необходимости применения динамической маршрутизации. В [19] рассматривается, как логистическая компания электронной коммерции может использовать киберфизическую логистическую систему (CPLS) и Интернет вещей (IoT), которые могут раскрыть потенциал для решения задач распределения заказов и маршрутизации транспортных средств на новый лад. CPLS распределяет заказы между подходящими транспортными средствами и планирует наилучший маршрут, чтобы максимизировать скорость выполнения заказов с помощью облачных вычислений для снижения локальной вычислительной мощности.

В этой статье представлена новая вложенная система муравьев MAX-MIN (MMAS) для решения проблемы маршрутизации транспортных средств (VRP), которая может служить основным элементом CPLS. Цель состоит в том, чтобы выполнить, чтобы максимизировать заказы, минимизировать общую стоимость поездки и удовлетворить все ограничения задачи. В этом документе рассматриваются вопросы, связанные с приоритетом VIP и ограничениями точки высадки, чтобы сделать маршрут решения более реалистичным и повысить точность. Численный опыт показывает, что CPLS успешно внедряется в гонконгской логистической компании электронной коммерции с многообещающей производительностью при разумном времени вычислений и новыми лучшими решениями.

## Динамическая маршрутизация нескольких транспортных средств

Задачи маршрутизации нескольких транспортных средств со стохастическим спросом также относятся к динамической маршрутизации. Эта задача (MVRPSD) является важной проблемой как в теории, так и на практике. Однако решение MVRPSD с помощью традиционных методов, таких как априорная оптимизация или динамическое программирование на основе алгоритма развертывания, обычно ограничивается проблемами эффективности вычислений и качества решения.

В условиях растущего спроса на эффективную логистику в режиме реального времени используют автономный алгоритм приближенной итерации значений (OAVI) для динамических решений MVRPSD. Этот алгоритм обеспечивает быстрые и эффективные онлайн-решения для динамической маршрутизации. Принятие такого алгоритма сопряжено с двумя проблемами: во-первых, необходимо определить правильную структуру затрат для решения о динамической маршрутизации; во-вторых, необходимо эффективно бороться с «проклятием размерности», которая возникает в алгоритмах перебора.

## Динамическая маршрутизация транспортных средств в режиме реального времени

Динамические задачи маршрутизации транспортных средств в режиме реального времени возникают при доставке срочных грузов. В работе [20] предлагается новый проактивный подход к управлению в режиме реального времени для динамических задач маршрутизации транспортных средств, в которых срочная доставка товаров имеет первостепенное значение. Без предположения о каком-либо распределении стохастические знания о будущих запросах генерируются с использованием информации о прошлых запросах. Полученные знания интегрируются в транспортный процесс, который контролируется алгоритмом запретного поиска, чтобы активно направлять транспортные средства в районы с вероятным запросом до того, как туда поступят запросы. Анализируя результаты, полученные для различных параметров тестирования, мы определяем структурное разнообразие как важнейший критерий для классификации качества стохастических знаний, получаемых из информации о прошлых запросах. Этот критерий обеспечивает многообещающую отправную точку для оценки качества информации о прошлых запросах, чтобы эффективно использовать полученные стохастические знания в подходах к управлению в реальном времени. Показана эффективность подхода прямым сравнением с детерминированным подходом на тестовых сценариях с различным структурным разнообразием. Благодаря предложенной классификации структурного разнообразия становятся объяснимыми различия в результатах, полученных в тестируемых сценариях. >>>

## Метод муравьиной колонии

Задача динамической маршрутизации транспортных средств (ДВРП) привлекает все большее внимание в связи с ее широкими приложениями в логистике. По сравнению со статической задачей маршрутизации транспортных средств, DVRP характеризуется динамическим появлением ранее неизвестных запросов клиентов при выполнении маршрута. Тем не менее, вновь появившиеся клиенты представляют большую проблему для оптимизатора маршрутов, так как оптимизированный маршрут может быть наоборот плохого качества при включении в планирование маршрута новых клиентов, далеких от запланированных маршрутов. Чтобы решить эту проблему, используют метаэвристику, основанную на разнообразии покрытия спроса, называемую АСО-CD, в рамках алгоритма муравьиной колонии [20]. Метод муравьиной колонии решает пространственную задачу покрытия спроса для поддержания разнообразия охваченных клиентов на маршрутах, чтобы оптимизатор мог эффективно реагировать на вновь появляющиеся запросы клиентов. В отличие от покрытия в мобильной сетевой связи данная задача решается динамически.

## Мета эвристические алгоритмы

Мета эвристические алгоритмы в разных вариантах широко применяют при динамической маршрутизации [14]. Повышение осведомленности о системах своевременного снабжения с появлением новых достижений в области связи и информационных технологий недавно заставило исследователей сосредоточиться на проблеме динамической маршрутизации транспортных средств (DVRP). В DVRP клиентские запросы неизвестны и раскрываются после принятия некоторых решений. Альтернативный вариант динамического подбора и доставки стратегии задачи маршрутизации транспортных средств возникает, когда новые клиенты появляются в турах после стартового визита. DVRP являются одними из наиболее важных и сложных расширений VRP. Мета эвристика включает алгоритм локального поиска для оптимального или целесообразного решения DVRP. Как показано в [11] в дискретных задачах термин оптимальный должен быть заменен на термин целесообразный или рациональный.

В работе [22] дан другой вариант эвристики. В ней приведен многоэтапный эвристический алгоритм, основанный на группировке задач для решения задачи маршрутизации транспортных средств с ограничением энергии при стихийных бедствиях.

В последние годы часто происходили серьезные стихийные бедствия, приводящие к значительным человеческим жертвам и существенным экономическим последствиям. Учитывая, что спасательные машины в основном работают на электричестве, они не могут конкурировать с обычными по дальности плавания. Поэтому очень важно изучить, как спасательные машины могут быстро и эффективно выполнять несколько спасательных задач при ограничении энергии. В этой статье предлагается

многоэтапный алгоритм маршрутизации транспортных средств, основанный на группировании задач (MSVR-TG), для задачи маршрутизации аварийно-спасательных транспортных средств с энергетическим ограничением (VRPEC) при стихийных бедствиях.

На этапе группировки задач предлагается новый алгоритм K-средних, основанный на угловой плотности (K-means-ad), для устранения нестабильности результата K-средних, вызванной случайным выбором начальных центров кластеров. Он может максимально сбалансировать расстояние движения каждого транспортного средства, что имеет решающее значение, когда транспортные средства ограничены в энергопотреблении. На этапе планирования последовательности вводится генетический алгоритм для конкретной задачи (PSGA) с несколькими правилами инициализации популяции и стратегией улучшения маршрута, чтобы сбалансировать скорость конвергенции и разнообразие популяции, достигая многообещающего результата планирования. На этапе корректировки маршрута различные эвристики удаления и вставки в поиске больших окрестностей (LNS) предназначены для корректировки маршрутов, тем самым еще больше улучшая результат планирования. Маршруты, участвующие в уравнивании, получают по разработанному правилу выбора маршрута. Достоверность каждого этапа в MSVR-TG была проверена в ряде сценариев.

## Динамическая маршрутизация электрического городского транспорта

Технология электромобилей обещает снизить как затраты, так и воздействие на окружающую среду логистических операций. Поэтому в этой области проводится много исследований. На операционном уровне недавно была введена проблема маршрутизации электромобилей (EVRP), которая касается формирования эффективных планов маршрутов для транспортных средств при соблюдении ряда ограничений, связанных с батареями. В работе [23] дан анализ по EVRP и его расширениям. Исследовано 136 публикаций, в которых рассматривается маршрутизация аккумуляторных электромобилей. Обсуждаются варианты базового EVRP, дается математическая формулировка, которая также моделирует несколько простых вариантов задачи, и подробно обсуждаются разработанные подходы к решению.

В работе [24] дается модификация задачи. Исследована маршрутизации транспортных средств смешанного парка и адаптивный поиск больших окрестностей. Описано решение задач маршрутизации транспортных средств смешанного парка с временными окнами и частичной подзарядкой несколькими зарядными устройствами (MF-VRP-MC). Парк состоит из автомобилей с электроприводом и двигателем внутреннего сгорания и объединяет несколько аспектов в всеобъемлющей уникальной модели. MF-VRP-MC. Эта модель учитывает пройденное расстояние и нагрузку на транспортные средства как в функциях выбросов, так и в функциях потребления энергии. Это связано с минимизацией >>>

общих затрат при удовлетворении потребностей клиентов в доставке. Во-первых, мы разрабатываем формулу математического программирования смешанных целых чисел для MF-VRP-МС. Из-за NP-сложности проблемы для решения задач среднего и большого размера применен алгоритм, основанный на адаптивном поиске больших соседей (ALNS), с введением новых усовершенствованных механизмов соседства для успешного решения сложных проблемных ограничений. Выбор технологии подзарядки среди других на зарядной станции в первую очередь рассматривается на этапе решения проблемы смешанного парка.

Маршрутизация многорежимного гибридного электромобиля рассмотрена в [25]. Гибридные электромобили (HEV) — это экологически безопасные транспортные средства, которые используют комбинацию электрического двигателя и двигателя внутреннего сгорания в своих силовых установках для снижения расхода топлива и выбросов. В [25] исследован парк HEV в логистических операциях и представляем проблему маршрутизации гибридных электромобилей (HEVRP). Поскольку HEV работает в разных режимах привода, то эта проблема маршрутизации считается многорежимным HEVRP (MM-HEVRP). На начальном этапе модель стоит как линейная программа со смешанными целыми числами.

В такой модели целевая функция минимизирует общую стоимость пройденных расстояний в разных режимах. В общем виде и аналитически проблема неразрешима. Предложен мета эвристический подход к ее решению. Предлагаемый подход сочетает в себе эвристический локальный поиск окрестностей с математическим программированием. Численные результаты показывают, что предложенный математический метод позволяет получать высококачественные решения при разумных затратах времени на вычисления. Кроме того, этот метод применим для задач большой размерности.

Еще одна задача маршрутизации электрического транспортного средства дана в [26]. Решается задача маршрутизации подключаемого гибридного электрического мусоровоза для сбора отходов. Коммерческий сбор отходов является важной услугой, требующей эффективного и надежного предоставления клиентам. На операционном уровне одной из самых сложных проблем является разработка набора маршрутов мусоровозов для сбора отходов из набора баков. Для многократного использования эти транспортные средства необходимо регулярно опорожнять в течение дня. В [26] исследуется проблема сбора отходов с помощью однородного парка подключаемых гибридных электрических мусоровозов, работающих от двух разных источников энергии, т. е. от электричества и сжатого природного газа (СПГ).

Функции потребления топлива используются для оценки общей потребности в энергии для каждого вида топлива, включая дозаправку и перезарядку, а также подробного потребления энергии на пути между двумя интересующими узлами. Дан алгоритм гибридного порогового принятия (НТА) для этой проблемы. Он обозначен как решение проблемы гибридного сбора отходов (HWCP). Вычислительные эксперименты подтверждают, что предложенный алгоритм НТА обеспечивает

хорошие результаты по сравнению с существующими современными алгоритмами, разработанными для задачи маршрутизации электромобилей. Результаты вычислений демонстрируют эффективность метода с учетом как полной, так и частичной перезарядки, а также влияние различных факторов: емкостей батареи/резервуара. По сравнению со стандартными транспортными средствами, работающими на сжатом природном газе или электромобилями, мы также показываем преимущества использования парка гибридных электрических мусоровозов с точки зрения эксплуатационных расходов и общего пройденного расстояния.

Еще одна задача маршрутизации с экономическим аспектом рассмотрена в [27]. В этом исследовании предлагается новая модель для проектирования маршрутов и транспортных услуг с учетом спроса на электроэнергию (e-DRT), в которой план обслуживания транспортных средств и план возможной зарядки могут быть оптимизированы одновременно. В частности, все планы подзарядки хорошо согласованы с гибкими графиками транзитных перевозок. Для эффективного решения предложенной модели разработан настраиваемый поиск переменных по окрестностям. Это известный подход мета эвристики. Представлены реальные примеры для оценки производительности системы и обоснования возможностей предлагаемого метода. Сравнительный анализ показывает, что предлагаемая модель требует на 11% меньше общих затрат, чем альтернативная модель со стратегией полной зарядки. Анализ чувствительности показывает влияние зарядной мощности, емкости шины.

## Заключение

Динамическая маршрутизация выходит за рамки топологии маршрутов и стационарного проектирования маршрутов, а также решения таких простых задач как «транспортная задача». Динамическая маршрутизация включает факторы диспетчеризации транспортных средств, потребления ресурсов и типа транспортного средства. Динамическая маршрутизация решает задачу дискретной оптимизации с подключением факторов разного качества: организационных, пространственных, экономических, технических, энергетических. Она учитывает проблемы управления дальнемагистральными автомобильными перевозками и управления городским транспортом. На железной дороге она актуальна при автоматизации сортировки вагонов. Основной способ решения этой проблемы мета эвристика. Другим является агентный подход. Использование интеллектуальных транспортных систем и кибер-физических систем на транспорте является возрастающей тенденцией, которая также решает проблему динамической маршрутизации. Динамическая маршрутизация является обязательным компонентом управления транспортом в мегаполисах и в условиях роста интенсивности транспортных потоков. ■





## Список литературы

1. Дышленко С.Г. Модели построения маршрутов в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. – 2018. Т.2. – 4(8). – С.48-56.
2. Захаров В. В., Крылатов А. Ю. Конкурентная маршрутизация транспортных потоков поставщиками услуг навигации // Управление большими системами: сборник трудов. – 2014. – №. 49. – С. 129-147.
3. Панин В. В., Колесникова Е. С. Маршрутизация перевозок грузов на сети железных дорог ОАО "РЖД" // Железнодорожный транспорт. – 2011. – №. 2. – С. 34-39.
4. Парлюк Е. Г. Имитационное моделирование пассажиропотоков в системе " железная дорога-городской общественный транспорт" // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – №. 3. – С. 78-82.
5. Козлов А.В. Многоцелевое управление транспортом мегаполиса // Наука и технологии железных дорог. – 2018. Т.2. – 4(8). – С.40-47.
6. Carponi A. et al. A survey on mobile crowdsensing systems: Challenges, solutions, and opportunities // IEEE communications surveys & tutorials. – 2019. – Т. 21. – №. 3. – С. 2419-2465.
7. Qiu S. et al. Crowd-mapping urban objects from street-level imagery // The world wide web conference. – 2019. – С. 1521-1531.
8. Дышленко С. Г. Ситуационный анализ в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.26-33.
9. Цветков В.Я. Основы геоинформационного моделирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1999. – №4. – С.147-157.
10. Цветков В. Я. Ситуационное моделирование в геоинформатике // Информационные технологии. – 2014. – №6. – С.64-69.
11. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Оптимизация движения в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6. №3 (23). – С.10-19.
12. Pillac V. et al. A review of dynamic vehicle routing problems // European Journal of Operational Research. – 2013. – Т. 225. – №. 1. – С.1-11.
13. Козлов А.В. Логические дескриптивные и прескриптивные модели // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. – 2018. – № 6 (10). -С.3-8.
14. Elshaer R., Awad H. A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants // Computers & Industrial Engineering. – 2020. – Т. 140. – С. 106242.
15. Morales-Castañeda B. et al. A better balance in metaheuristic algorithms: Does it exist? // Swarm and Evolutionary Computation. – 2020. – Т. 54. – С. 100671.
16. Цветков В.Я., Розенберг И.Н. Интеллектуальные транспортные системы – Saarbrücken, 2012. – 297 с.
17. Tsvetkov V. Ya. Trade-off transportation problem. Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2019. Т. 3. № 435. С. 109-113. <https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.75>.
18. Mitrović-Minić S., Krishnamurti R., Laporte G. Double-horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows // Transportation Research Part B: Methodological. – 2004. – Т. 38. – №. 8. – С. 669-685.
19. Kucukoglu I., Dewil R., Cattrysse D. The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Т. 161. – С. 107650.
20. Ferrucci F., Bock S., Gendreau M. A pro-active real-time control approach for dynamic vehicle routing problems dealing with the delivery of urgent goods // European Journal of Operational Research. – 2013. – Т. 225. – №. 1. – С. 130-141.
21. Tsvetkov V.Ya. Incremental Solution of the Second Kind Problem on the Example of Living System, Biosciences biotechnology research Asia, November 2014. Т. 11 №5 С. 177-180.
22. Jiao L. et al. A multi-stage heuristic algorithm based on task grouping for vehicle routing problem with energy constraint in disasters // Expert Systems with Applications. – 2022. – Т. 212. – С. 118740.
23. Kucukoglu I., Dewil R., Cattrysse D. The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review // Computers & Industrial Engineering. – 2021. – Т. 161. – С. 107650.
24. Dönmez S., Koç Ç., Altıparmak F. The mixed fleet vehicle routing problem with partial recharging by multiple chargers: Mathematical model and adaptive large neighborhood search // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2022. – Т. 167. – С. 102917.
25. Seyfi M. et al. Multi-mode hybrid electric vehicle routing problem // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2022. – Т. 166. – С. 102882.
26. Masmoudi M. A., Coelho L. C., Demir E. Plug-in hybrid electric refuse vehicle routing problem for waste collection // Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. – 2022. – Т. 166. – С. 102875.
27. Li X. et al. Electric demand-responsive transit routing with opportunity charging strategy // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2022. – Т. 110. – С. 103427.

УДК: 656.25:621.38+656.212.5-52

# Мировые тренды развития систем управления движением поездов

## Global trends in the development of Train Traffic Control Systems

**Озеров А.В.**, Начальник Международного управления АО «НИИАС»,  
E-mail: A.Ozerov@vniias.ru, Москва, Россия  
**Ozerov A.V.**, Head of International Department, JSC «NIIAS»,  
E-mail: A.Ozerov@vniias.ru, Moscow, Russia

### Аннотация



На ноябрьском заседании секции «Комплексные проблемы транспорта» Научно-технического совета ОАО «РЖД» представлены результаты работ в области создания российской системы управления движением поездов (РСУДП). В контексте заявленных подходов к построению и дальнейшему развитию системы РСУДП, в статье рассматриваются некоторые тренды развития систем СУДП в мире.

**Ключевые слова:** транспорт, система управления движением поездов, автоблокировка, интервальное регулирование, подвижный блок-участок, радиоканал, гибридная система управления.

### Abstract

At the November meeting of the Section “Complicated Transport Challenges” of the Scientific and Technical Council of JSC RZD, the results of the development of the Russian Train Control System (RTCS) were presented. In the context of the stated approaches to the construction and further development of RTCS, the article deals with some trends in the development of TCS systems in the world.

**Keywords:** transport, train traffic control system, automatic blocking, interval control, moving block section, radio channel, hybrid control system.



## Введение

Современные системы управления движением поездов (СУДП) различаются по нескольким значимым критериям, в числе которых – используемый тип передачи данных. Так, например, в Великобритании до сих пор эксплуатируется система с точечным типом передачи данных AWS, в Германии – PZB, в Швейцарии и Дании – ZUB, в Испании – ASFA, в которых используются путевые индукторы для контроля проезда запрещающего сигнала. Эти системы имеют очевидные ограничения с точки зрения технологии интервального регулирования движения поездов, направленной на решение задач пропуска поездопотоков разной интенсивности.

Данные ограничения в той или иной степени преодолены в системах с непрерывным типом передачи данных. При этом средой передачи могут быть кабельные шлейфы (например, система LZB, которая эксплуатируется в Германии, Австрии и Испании), кодовые рельсовые цепи (например, система автоблокировки TVM во Франции, BASS в Италии, АТВ в Нидерландах, АТС в Японии, АБТЦ-МШ в России), а также радиосвязь (европейская система ETCS/ERTMS уровней 2 и 3, американская PTC, китайская CTCS 3 и 4) [2].

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики некоторых систем автоблокировки, использующих в качестве среды передачи данных кодовые рельсовые цепи и успешно эксплуатирующихся в указанных странах, в том числе на линиях с интенсивным и высокоскоростным движением. Следует отметить, что для высокоскоростных магистралей (ВСМ) в таких системах используются рельсовые цепи повышенной длины.

Данный фактор учитывается и в перспективной российской системе управления движением поездов

(PCУДП) в случае ее последующего применения на ВСМ. С этой целью АО «НИИАС» разработан макет тональной рельсовой цепи повышенной длины (около 750 м), позволяющей в дальнейшем, после проведения всех необходимых испытаний, реализовать пропуск высокоскоростных поездов с соблюдением необходимых требований безопасности.

Базовым элементом управления движением по перегону и главным станционным путям в составе PCУДП является система автоблокировки АБТЦ-М(Ш). Система выполнена на российской элементной базе и обладает расширенными функциональными возможностями в сравнении с типовой автоблокировкой. В ней используется бесстыковая рельсовая цепь, реализован алгоритм подвижного блок-участка, расширено количество передаваемой информации автоматической локомотивной сигнализации. Функциональные возможности позволяют сравнивать АБТЦ-М(Ш) с лучшими зарубежными образцами, указанными в таблице 1. Еще одним достоинством системы является высокая живучесть и защищенность от кибератак.

В целом, PCУДП строится как гибридная система управления, то есть, помимо рельсопроводного канала передачи данных, используется и цифровой радиоканал. Гибридный принцип построения СУДП является достаточно новым и перспективным направлением, которое изучается, к примеру, в рамках европейских проектов, направленных на развитие системы ETCS/ERTMS уровень 2 с учетом задач сокращения интервала попутного следования.

В данном случае для реализации квази-подвижного блок-участка в системе ETCS/ERTMS уровень 2 предусма-

Таблица 1  
Сравнение систем автоблокировки

Показатель	TVM 300; TVM 430 (Франция)	ВАСС (Италия)	АТС (Япония)	АБТЦ-М(Ш) (Россия)
Род тягового тока и параметры тяговой сети	1,5 – 3 кВ постоянного тока; 25 кВ, 50 Гц, 15 кВ, 16,7 Гц	3 кВ постоянного тока; 25кВ, 50 Гц	25 кВ, 60 Гц	3 кВ постоянного тока; 25кВ, 50 Гц
Длина блок-участка, м	~2000	1350	~3000	фиксированный б/у от 780 до 1700 или подвижный б/у
Средства обнаружения поезда на блок-участке	Одна РЦ на блок-участок с конденсаторами через каждые 100 м	Одна РЦ на блок-участок	Две РЦ на блок-участок	Три-четыре РЦ на блок-участок
Частоты, используемые РЦ для обнаружения поезда	1700 и 2300 Гц для одного пути; 2000 и 2600 Гц для второго пути	50 и 178 Гц	720 и 900 Гц для одного пути; 840 и 1020 Гц для второго пути	475, 525, 575, 625, 675, 725, 775, 825, 875, 925 Гц с кодовыми признаками от К1 до К12
Необходимость в изолирующих стыках	Не требуются	Требуются	Не требуются	Не требуются
Средства передачи данных между сигнальными точками	Кабель	РЦ	Кабель	Кабель
Централизация систем блокировки	Да	Нет	Да	Да
Возможность диспетчера экстренно остановить поезд	Нет	Нет	Да	Да





Рисунок 1. Состав подсистем РСУДП

тривается возможность использования в центре радиоблокировки RBC информации от МПЦ о проследовании поездом, оснащенным бортовым оборудованием ETCS, границ рельсовых цепей для расчета доверительного интервала координаты хвостового вагона поезда. При этом поезда, не оснащенные бортовым оборудованием ETCS, следуют в обычном режиме по кодам национальной АЛС.

Данный алгоритм уже реализован в системе РСУДП, однако важным отличием является то, что в российском решении используется единое бортовое устройство безопасности, которое одновременно взаимодействует с аппаратурой рельсовых цепей (принимая сигналы АЛС) и с центром радиоблокировки по радиоканалу. Общая структура РСУДП указана на Рисунке 1.

Фактически в РСУДП реализован принцип «умного борта», что дает возможность на той же аппаратной платформе обеспечить дальнейшее развитие системы интервального регулирования и переход от АЛСО с «плавающим блок-участком» (ПБУ) к полноценной гибридной системе с цифровым радиоканалом, которая в настоящее время тестируется на МЦК и обеспечивает возможность сокращения интервала попутного следования с переходом в дальнейшем к автоматическому (беспилотному) режиму движения поездов. Важнейшим преимуществом такого решения является интероперабельность – техническая и технологическая совместимость – бортового устройства безопасности и напольной инфраструктуры на самых разных участках сети ОАО «РЖД».

Такая задача стоит перед любой железнодорожной компанией мира, но решается она по-разному. Так, в системе ETCS/ERTMS уровень 2 и 3 для обеспечения интероперабельности с напольной инфраструктурой национальной сигнализации на борту поезда помимо штатного устройства ETCS (европейского безопасного компьютера EVC) всегда используется и национальное локомотивное устройство безопасности. В классификации ETCS/ERTMS данное устройство называется STM («Специализированный модуль передачи данных») [2].

Необходимо подчеркнуть, что система ETCS/ERTMS уровень 2 изначально позиционировалась как автономная система, призванная заменить все национальные системы в ЕС. Основным принцип – управление по радиоканалу с опорой на путевые бализы, устанавливаемые для точной координатной привязки подвижных единиц, при этом контроль свободности пути и полнотности подвижных составов осуществляется внешними средствами – рельсовыми цепями или счетчиками осей. Отказ от данных средств и переход к бортовым средствам контроля, в том числе с помощью данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в рамках реализации системы ETCS/ERTMS уровень 3 изучается в целом ряде проектов ЕС [3].

Тот же подход предусмотрен и в китайском аналоге – системе CTCС уровень 3 и 4, однако в качестве резерва обязательно сохраняется национальная СУДП, то есть при выходе из строя радиосвязи движение осуществляется по кодам АЛС [4]. Рисунок 2 иллюстрирует подход, реализуемый в перспективной китайской системе CTCС, уровень 4.

Интересен также подход, внедряемый в США в рамках масштабного проекта по развертыванию системы PTC (Positive Train Control). Система PTC является оверлейной, то есть накладывается на существующую инфраструктуру СЦБ. В системе PTC предусмотрена возможность управления по радиоканалу 220 МГц, но при этом в качестве низовой автоматики могут выступать как бализы и счетчики осей по аналогии с системой ETCS/ERTMS, так и кодовые рельсовые цепи. В последнем случае отказ системы радиосвязи обеспечивает движение в штатном режиме благодаря передаче информации на поезд по рельсовым цепям. Основным акцент в проекте PTC также сделан на применении единого бортового устройства безопасности и обеспечении совместимости с разным типом напольных устройств СЦБ.

Сравнительный анализ указанных перспективных систем СУДП приведен в обобщенном виде в Таблице 2. >>>

Таблица 2  
Сопоставление перспективных СУДП в мире

Показатель	США, Канада (PTC)	Западная Европа (ERTMS уровень 3, ERTMS Regional, Hybrid ERTMS)	Китай (CTCS 4)	Россия (РСУДП)
Канал передачи данных	220 МГц, Wi-Fi или др. + точечный канал 4 МГц (базисы)	GSM-R/TETRA (в перспективе с переходом к IP) + точечный канал 4 МГц (базисы)	GSM-R (в перспективе с переходом к IP) + канал передачи АЛС по рельсовой цепи	GSM-R (в перспективе с переходом к IP) + канал передачи АЛС по рельсовой цепи
Позиционирование	Спутниковая навигация (GPS), одометры + базисы	Спутниковая навигация (GPS/GALILEO), одометры + базисы	Спутниковая навигация (GPS/Beidou), одометры, виртуальная базиса	Спутниковая навигация (Beidou/ГЛОНАСС), одометры, виртуальная базиса
Электронная карта	Да	Да	Да	Да
Определение полносоставности	Счетчики осей, РЦ	Бортовые средства в виде устройства контроля хвостового вагона по радиоканалу (или счетчики осей/РЦ на существующей инфраструктуре)	Счетчики осей, РЦ	Счетчики осей, РЦ
Резервирование	Да (в случае выхода из строя радиоканала движение по светофорам)	Нет (в случае выхода из строя радиоканала движение по принципу «один поезд на перегон»)	Да (в случае выхода из строя радиоканала движение по сигналам РЦ)	Да (в случае выхода из строя радиоканала движение по сигналам РЦ)
Автоведение	<b>Предусматривается</b>	<b>Предусматривается</b>	<b>Предусматривается</b>	<b>Предусматривается</b>

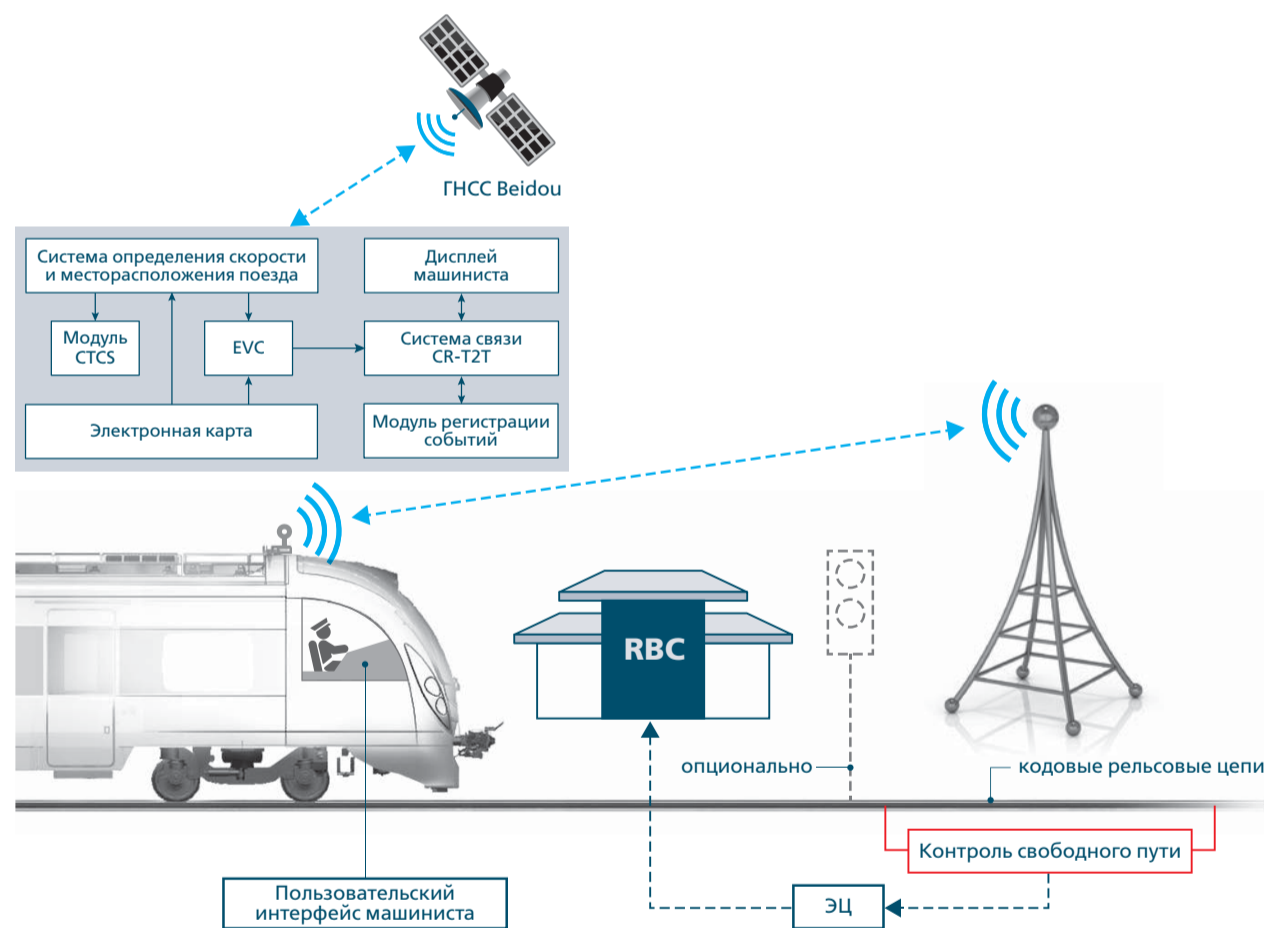


Рисунок 2. Архитектура китайской CTCS, уровень 4

## Выводы

Представленный краткий обзор позволяет сделать вывод, что технологическое развитие систем управления движением поездов в России идет в русле ключевых мировых трендов, а в некоторых аспектах демонстрирует более высокий уровень технологической готовности.

Например, применение технологии позиционирования подвижного состава на основе данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в том числе

с применением дифференциальной коррекции, и использование бортовых электронных карт является стандартной практикой в ОАО «РЖД» на протяжении многих лет. В ОАО «РЖД» создана и функционирует единая геоинформационная сеть тягового подвижного состава (ЕГИС ТПС) ОАО «РЖД», отрабатываются алгоритмы автоматической расшифровки съемного носителя регистрации поездки с использованием современных методов обработки информации. >>>

Подобные решения перекликаются с направлениями стратегических программ инновационного развития и цифровизации железнодорожного транспорта разных стран, однако в ОАО «РЖД» они имеют практическую реализацию. К примеру, нужно признать совершенно уникальный опыт, накопленный компанией за долгие годы в сфере сетевого применения электронных бортовых карт в составе локомотивных устройств безопасности – сопоставимого опыта нет ни у одной железнодорожной компании в мире, за исключением, очевидно, железных дорог США. В остальных странах данная тематика по-прежнему находится в научно-экспериментальной стадии.

При этом, в отличие от практики железных дорог США, где электронная карта маршрута передается на борт

по радиоканалу, в ОАО «РЖД» отработан более безопасный и защищенный способ, не требующий использования дорогостоящих средств криптозащиты, – с помощью съемного носителя регистрации поездки, что в свою очередь позволяет при автоматической расшифровке данных поездки привязывать зафиксированные события к соответствующим геолокациям.

Внимательное изучение и сравнительный анализ зарубежного опыта и отечественных решений в области систем управления движением поездов с учетом новых тенденций и подходов к решению проблемных вопросов является необходимым элементом дальнейшего совершенствования отечественных технологий интервального регулирования и обеспечения безопасности движения поездов. ■

## Список литературы

1. G. Theeg, S. Vlasenko (Eds.). Railway Signalling and Interlocking. 2020. PMC Media House GmbH. P. 259-267.
2. Озеров А.В. Европейская система интервального регулирования / Озеров А.В. // Автоматика, связь, информатика. №6 (2019), С.14-15.
3. Проект Europe's Rail. [Электронный ресурс] / URL: [https://projects.shift2rail.org/s2r\\_projects.aspx](https://projects.shift2rail.org/s2r_projects.aspx).
4. Розенберг Е.Н. Современные системы управления движением поездов / Розенберг Е.Н., Шухина Е.Е., Озеров А.В., Малинов В.М. // Электронное издание, «Издательские решения», 2020. – С.151-164.

УДК: 656.09

# Информационная транспортная коммуникативистика

## Information transport communication science

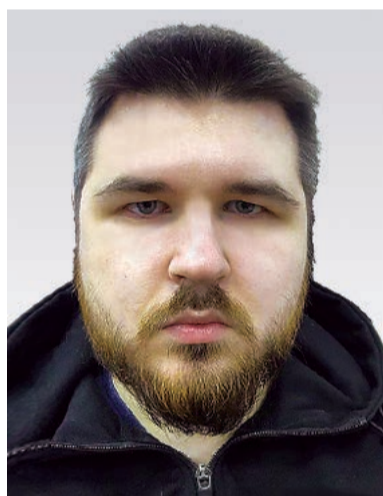
**Левицкий Л.О.**, Ведущий инженер, Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).

E-mail: levitskiylo@yandex.ru, Москва, Россия

**Levitsky L.O.**, Leading engineer, Russian Technological University (RTU MIREA),

E-mail: levitskiylo@yandex.ru, Moscow, Russia

### Аннотация



В статье исследуется социальная и информационная коммуникативистика. Вводится новое понятие «информационная транспортная коммуникативистика», которое является развитием понятия социальная коммуникативистика или общая коммуникативистика. Информационная транспортная коммуникативистика использует общие принципы социальной коммуникативистики, но имеет и свои отличия, она может рассматриваться как коммуникативистика в информационном поле, что дает возможность использования информационного подхода и информационного моделирования этой технологии. Раскрывается содержание понятия «Информационная транспортная коммуникативистика». Она задает новую методологию управления и снятия информационной неопределенности в сфере транспорта, создает новый инструментальный анализ информационного обмена и информационных процессов.

**Ключевые слова:** транспорт, коммуникации, коммуникативистика, теория коммуникации, социальная коммуникация, информационная коммуникация, информационная неопределенность, обработка информации, информационная асимметрия.

### Abstract

The article explores social and information communication science. A new concept of "information transport communication science" is introduced, which is the development of the concept of social communication science or general communication science. Information transport communication science uses the general principles of social communication science, but it also has its own differences, it can be considered as communication science in the information field, which makes it possible to use the information approach and information modeling to this technology. The content of the concept of "Information transport communication" is revealed, it sets a new methodology for managing and removing information uncertainty in the field of transport and creates a new toolkit for the analysis of information exchange and information processes.

**Keywords:** transport, communications, communication science, communication theory, social communication, information communication, information uncertainty, information processing, information asymmetry. >>>

## Введение

В настоящее время меняется роль и применение информационных и коммуникационных технологий в сфере транспорта [1]. Более широкий контекст глобальных изменений в отношении «транспорт – информационные коммуникации» определен ростом сферы услуг и экономики, основанной на знаниях, разрушением торговых барьеров и развитием новых моделей путешествий. Информационные коммуникации из частного инструмента связи преобразуются в интегрированный инструмент управления и взаимодействия. Появление мобильной информации [2] создало новую среду общения, управления и информирования. Существует информационное управление транспортом [3]. Возникло и развивается понятие информационный транспорт [4]. Информационный транспорт и интернет-коммуникации формируются как особая часть транспортной системы. Развитие беспилотного управления [5] также по-новому использует информационные коммуникации. Обеспечение информационной безопасности на транспорте [6] связано с технологиями коммуникации. Все это приближает к использованию информационной коммуникативистики [7].

Информационная коммуникативистика ярко проявляется в мобильном краудсенсинге (mobile crowdsensing) [8]. Эта технология есть альтернатива, когда множество пассажиров и их мобильные устройства используются для сбора данных практически бесплатно. Технологию рассматривают как приложение для умного города. Внешний интерфейс этой службы называется TrafficInfo. Это приложение для Android, которое визуализирует информацию об общественном транспорте данного города в режиме реального времени на Картах Google. Оперативное обновление информации о расписании транспорта зависит от автоматического обнаружения остановки общественного транспорта. TrafficInfo построен на основе коммуникационной структуры на основе расширяемого протокола обмена сообщениями и присутствия (XMPP) [8].

Внедрение GSM-R в качестве обязательной системы радиосвязи для оперативной голосовой связи и передачи данных ERTMS/ETCS между железнодорожной инфраструктурой и бортовыми системами поездов обеспечило стабильную опору для единого европейского железнодорожного пространства, основанного на единой радиотехнологии и едином диапазоне радиоспектра. Однако в последние годы стало ясно, что полагаться исключительно на одну радиотехнологию, которая вскоре устареет, нецелесообразно в будущем. В будущем необходим более гибкий подход, основанный на мультимедийных технологиях [9]. Мультимедийные технологии – это часть информационной коммуникативистики. Таким образом, развитие транспорта и технологий коммуникации приводит к необходимости использования информационной коммуникативистики на транспорте как интегратора коммуникаций и информационных взаимодействий. Есть основание ввести понятие «информационная транспортная коммуникативистика»

## Коммуникативистика и информационная коммуникативистика

Информационная коммуникативистика связана с коммуникациями в информационном поле и информационном пространстве. Информационная транспортная коммуникативистика связана с коммуникациями в сфере транспорта, с информационным управлением в сфере транспорта, со снятием информационной неопределенности в сфере транспорта. Информационная транспортная коммуникативистика может быть рассмотрена как коммуникативистика информационных потоков, в отличие от коммуникаций, связанных с материальными потоками. Обычная коммуникативистика связана с коммуникациями в социальной среде [10, 11]. Информационная сетевая коммуникативистика связана с коммуникациями в сетевой среде.

К сетевым средам относят коммуникационные сети, беспроводные сети, информационно-вычислительные сети, глобальные сети. Информационная коммуникативистика также связана с информационным полем и образует специфическое подмножество поля. Обычная коммуникативистика связана, в первую очередь, с социальной коммуникацией. Информационная коммуникативистика связана с информационной коммуникацией: информационным взаимодействием и информационным обменом в информационном поле. Информационная транспортная коммуникативистика связана с коммуникациями в транспортной сфере, с управлением и информационным взаимодействием. Информационная транспортная коммуникация использует коммуникационные процессы. Многие функции социальной и информационной коммуникацией сходные. Например, информационный обмен существует в социальной и информационной коммуникации.

Форма и технология информационного обмена различается для социальной среды и сферы транспорта. В широком смысле основой любой коммуникативистики является информационное моделирование [12]. Социальная коммуникативистика реализуется в форме дискурса [13] и рассуждений. Информационная сетевая коммуникативистика использует рассуждения в информационном поле [14]. Информационная коммуникативистика применяется в сложных организационно-технических системах [15, 16] и в прикладных системах [17, 18]. Информационная транспортная коммуникативистика применяется при переподготовке специалистов транспорта на стадии обучения и тестирования. Информационная коммуникативистика применяется в иммерсивных образовательных средах. Информационная образовательная коммуникативистика применяется в картографии и геоинформатике при пространственном моделировании [19] и геоинформационном моделировании [20, 21].





## Развитие коммуникативистики и информационной транспортной коммуникативистики

Наряду с информационной транспортной коммуникативистикой существует сетевая коммуникативистика. Это в первую очередь использование интернет [22]. Эти виды коммуникативистик взаимодействуют. Многие функции и особенности коммуникативистики переходят в информационную коммуникативистику и информационную транспортную коммуникативистику. Поэтому необходимо дать обзор общей или социальной коммуникативистики как основы информационной транспортной коммуникативистики.

Социальная коммуникативистика или просто коммуникативистика есть научное направление. Оно развивается и далеко от окончательного развития. Коммуникативистика имеет междисциплинарное значение [23, 24]. Коммуникативистика, как многие научные направления, главной задачей ставить получение знания. Она решает задачи устранения информационной асимметрии и снятия неопределенности. Информационная транспортная коммуникативистика также решает задачи устранения информационной асимметрии и снятия неопределенности, но в сфере управления транспортом.

Социальная коммуникативистика решает информационные задачи не в информационном поле, а в социальной сфере. Коммуникативистика применяет модель знания в рамках теории коммуникации. Развитие коммуникативистики широко освещается в журналах, из которых следует выделить «Современная коммуникативистика» [22], «Научные исследования и разработки. Современная коммуникативистика» [10, 11].

Информатизация и глобализация [23] требуют ускорения информационного обмена в современном обществе. Коммуникативистика выполняет четыре функции: обмена информацией, представление информации, информирование, регулирование социальной среды. Развитие функции обмена создает новые коммуникации и каналы общения. Функция представления создает возможность общественной и научной репрезентации знаний. Информационная функция создает возможность информирования. Регулирующая функция наиболее сложная. Она часто имеет мета эвристическую форму [24] для управления информационными потоками. Все общие коммуникационные функции используют информационные модели и информационные технологии и системы. Необходимо отметить, что в общей коммуникативистике информационные технологии и информационные системы большей частью имеют некомпьютерную форму. Например, телефонная связь, телевидение являются информационными не компьютерными технологиями. Публичные библиотеки и хранилища являются информационными системами.

Все функции информационной транспортной коммуникативистики используют информационные модели и информационные технологии и информационные системы. Эти функции в основном ориентированы на компьютерные технологии. Поэтому информационная транспортная коммуникативистика обеспечивает большую

скорость обмена информации, качество ее восприятия и многообразие форм представления.

Большое преимущество информационной транспортной коммуникативистики состоит в широком использовании разнообразных информационных моделей. Эти модели описывают: объекты, процессы [25, 26], взаимодействия, свойства, ситуации, отношения [27], потоки [28], метамоделли [29, 30] и информационные конструкции [31].

Преимуществом информационной коммуникативистики является использование разнообразных информационных единиц. В обычной коммуникативистике применяют чаще всего аудиальные и паралингвистические [32] информационные единицы. Информационные модели и информационные единицы являются инструментом и интеграции четырех функций информационной транспортной коммуникативистики.

Термин «информационно-коммуникационное взаимодействие» [33] применяют в общей коммуникативистике, в информационной транспортной коммуникативистике, в сетевой коммуникативистике. Но он имеет разные смысловые содержания в этих направлениях.

Также применяется термин «Коммуникативное пространство» или «коммуникативное пространство» [34] во всех трех направлениях. В информационной коммуникативистике и информационной транспортной коммуникативистике он является аналогом термина «информационное пространство». Наличие общности между коммуникативистикой и информационной коммуникативистикой дает основание использовать термин «информационная транспортная коммуникативистика».

## Общая коммуникативистика как основа информационной транспортной коммуникативистики.

Существует сходство и различие между коммуникативистикой и информационной транспортной коммуникативистикой. Общая или социальная коммуникативистика опирается на теорию коммуникаций [35]. Социальная коммуникативистика использует логику и риторику. Но предпочтение отдает риторике. В ней фактор эмоционального убеждения важнее фактора логического обоснования и доказательства. Паралингвистические единицы в общей коммуникативистике важнее, чем информационные и семантические единицы. Общая или социальная коммуникативистика характеризуется субъективностью. В ней главным фактором является информационный обмен с исключением активности компьютерных и сетевых технологий. Компьютерные и сетевые технологии в общей коммуникативистике используются как поддержка, например, как телевидение.

Общая коммуникативистика направлена на социальные задачи интерпретации действительности. Техническая задача состоит в предоставлении информации субъектам и группам субъектов. Культурная задача общей коммуникативистики заключается в развитии структуры, сохраняющей национальные культуры через общечеловеческую культуру. >>>

Интеграционная задача общей коммуникативистики заключается в объединение общества, его общественных и государственных структур. Цель общей коммуникативистики развитие и использование социальной коммуникации. В ней выделяют: информационно-коммуникационный блок и информационно-коммуникативный блок. Первый блок отражает содержательность или семантическую составляющую. Второй блок отражает процессуальную и репрезентационную составляющую. Уровень формализации общей коммуникативистики низкий. Формализацию выполняют с помощью инфологических моделей или структурных схем. Также низкий уровень применения информационных моделей и моделирования. Основной информационной моделью является модель сообщения. Язык общей коммуникативистики есть естественный язык.

Информационная или, социальная коммуникативистика, и информационная транспортная коммуникативистика используют теорию информации [36], теорию рецепции информации [37], информатику, математику, теорию вычислений, логику. В социальной коммуникативистике главным фактором является информационный обмен с исключением активности компьютерных и сетевых технологий. В ней фактор когнитивного восприятия является главным. Паралингвистические единицы в информационной транспортной коммуникативистике используют как основные.

Информационная транспортная коммуникативистика использует логику и пространственную логику. В ней фактор логического обоснования важнее фактора когнитивного восприятия. Паралингвистические единицы в информационной сетевой коммуникативистике также используют. Но они играют второстепенную роль. Главными являются информационные и семантические единицы.

В информационной транспортной коммуникативистике информационный обмен также важный фактор. Однако он связан с последующей информационной интерпретацией. Информационная транспортная коммуникативистика включает активность компьютерных и сетевых технологий. Компьютерные и сетевые технологии в информационной транспортной коммуникативистике используются как основа информационного обмена и анализа.

В информационной транспортной коммуникативистике существуют дополнительные задачи информационной интерпретации и анализа сообщений. Информационная транспортная коммуникативистика направлена на выявление и трансформацию неявных знаний. Информационная транспортная коммуникативистика направлена на устранение информационной асимметрии [38]. Например, существует информационная асимметрия по дистанции между видимой зоной для машиниста транспортного средства и невидимой. Информационная транспортная коммуникативистика устраняет эту асимметрию.

Существует информационная асимметрия по объему воспринимаемой информации. Она имеет место между информацией о видимом объекте и информационной ситуацией, в которой этот объект находится. Информационная транспортная коммуникативистика устраняет эту асимметрию.

Информационная транспортная коммуникативистика использует множество информационных моделей включая разнообразные модели сообщений. Большинство таких моделей в социальной коммуникативистике не используют. Информационные модели включают описания разных объектов или процессов. Информационная транспортная коммуникативистика имеет свой информационный язык, который образуют разнообразные группы информационных единиц [39]. Среди этих единиц выделяются семантические информационные единицы как основе передачи смысла. Информационная транспортная коммуникативистика характеризуется объективностью.

В информационной коммуникативистике применяют относительно новую модель информационную конструкцию [40], которая отражает онтологическую направленность. Эта модель является концептуализацией описания информационных моделей, что приближает информационную когнитивистику к онтологическому описанию и области искусственного интеллекта. Таким образом, еще одно различие в ориентации общей коммуникативистики на естественный язык и естественный интеллект. Информационная транспортная коммуникативистика использует информационный язык и искусственный интеллект. При этом она включает языковые конструкции естественного языка в виде дескрипторных моделей. Цель информационной транспортной коммуникативистики обмен знаниями. Язык информационной транспортной коммуникативистики включает естественный язык и искусственный язык.

## Мобильный краудсенсинг как пример технологии информационной транспортной коммуникативистики

Примером использования информационной транспортной коммуникативистики является мобильный краудсенсинг [8]. Мобильный краудсенсинг представляет собой метод информационной транспортной коммуникативистики, в котором большая группа людей, имеющих мобильные устройства, способные воспринимать и вычислять (такие как смартфоны, планшетные компьютеры, носимые устройства), коллективно обмениваются данными и извлекают информацию для измерения, картирования, анализа, оценки или вывести (предсказать) любые процессы, представляющие общий интерес. Короче говоря, это означает краудсорсинг данных датчиков с мобильных устройств. В аспекте картирования есть разновидность этой технологии, называемая «краудмаппинг» (Crowdmapping) [41].

Мобильный краудсенсинг можно трактовать как распределенную технологию интернета вещей. Устройства, оснащенные различными датчиками, получили повсеместное распространение. Большинство смартфонов могут определять окружающий свет, шум (через микрофон), местоположение (через GPS), движение (через акселерометр) и многое другое. Мобильный краудсенсинг может собирать данные, которые можно по-разному использовать. Например, данные GPS и акселерометра >>>

можно использовать для определения местоположения транспортного средства и выбоин на дорогах. Микрофоны можно использовать в сочетании с GPS для составления карты шумового загрязнения [42].

Термин «мобильный краудсенсинг» был придуман Рагху Ганти, Фань Е и Хуэй Леем в 2011 году. [42] Мобильный краудсенсинг относится к трем основным типам: экологический (например, мониторинг загрязнения), инфраструктурный (например, обнаружение выбоин) и социальный. (например, отслеживание данных упражнений в сообществе) [42]. Текущие приложения краудсенсинга работают на основе предположения, что все пользователи добровольно отправляют данные зондирования, что приводит к широкому участию пользователей [43]. Это также может указывать на то, как пользователи мобильных устройств формируют кластеры на основе определенной активности краудсенсинга [44].

Мобильный краудсенсинг происходит в три этапа: сбор данных, хранение данных и загрузка данных [45]. При этом возникают проблемы, близкие к обработке больших данных [45, 46]. Для сбора данных используются датчики, доступные через Интернет вещей [47, 48]. Существует три основных стратегии сбора этих данных [49].

Пользователь устройства собирает данные вручную. Это может включать фотографирование или использование приложений для смартфонов.

Пользователь может вручную управлять сбором данных, но некоторые данные могут собираться автоматически, например, когда пользователь открывает приложение.

Сбор данных запускается конкретным заранее определенным контекстом (например, устройство начинает собирать данные, когда пользователь находится в определенном месте в определенное время).

Этап сбора данных также может включать процесс, называемый дедупликацией, который включает удаление избыточной информации из набора данных для снижения затрат и улучшения взаимодействия с пользователем [49]. Процесс дедупликации фильтрует и сжимает собранные данные перед их загрузкой.

Второй этап включает в себя хранение данных на устройстве пользователя до тех пор, пока другой пользователь не сможет поделиться ими и общаться [44]. Например, видеоролики, отслеживающие действия

(трафик), могут храниться на устройстве пользователя в течение определенного периода времени, а затем передаваться лицу или учреждению, способному принять меры [50]. Пользователь может вручную управлять сбором данных, но некоторые данные могут собираться автоматически, например, когда пользователь открывает приложение.

## Заключение

Информационная транспортная коммуникативистика является развитием социальной коммуникативистики. Информационная транспортная коммуникативистика функционирует в информационном пространстве и информационном поле. Информационная транспортная коммуникативистика может быть рассмотрена как коммуникативистика в информационном поле или коммуникативистика информационного поля. Это дает возможность подключения информационного подхода и информационного моделирования к этой технологии. Информационная транспортная коммуникативистика задает новую методологию анализа сетей, основанную на топологии и информационных взаимодействиях. Информационная транспортная коммуникативистика создает новый инструментарий анализа информационного обмена и информационных процессов при управлении транспортом. Информационная транспортная коммуникативистика дает возможность объединять информационное моделирование, сетевой анализ, топологию и теорию коммуникаций в единый комплекс. Информационная транспортная коммуникативистика заимствует основные идеи коммуникационного обмена в социальной коммуникативистике, но дополняет их теорией информационного поля, моделями информационных ситуаций, информационных конструкций и информационных единиц. Такая детализация делает более прозрачными анализ сетевых взаимодействий и реконфигурации сетей. Информационная транспортная коммуникативистика позволяет использовать формальные когнитивные модели для анализа взаимодействия человека и сети. Информационная транспортная коммуникативистика является новым научным направлением и требует дальнейшего исследования и развития. ■



## Список литературы

1. Banister D., Stead D. Impact of information and communications technology on transport //Transport Reviews. – 2004. – Т. 24. – №. 5. – С. 611-632.
2. Morley D. Communications and transport: The mobility of information, people and commodities //Media, Culture & Society. – 2011. – Т. 33. – №. 5. – С. 743-759.
3. Замышляев А. М. Информационное управление в транспортной сфере //Наука и технологии железных дорог. – 2017. – Т. 1. – №. 4. – С. 11-24.
4. Зенкина Е. В. Информационный транспорт и интернет-коммуникации как часть современной транспортной системы //Экономика и предпринимательство. – 2018. – №. 4. – С. 678-681.
5. Андреева О.А. Беспилотное субсидиарное управление // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т.4.– 3(15). – С.44-52.
6. Зворыкина Ю. В., Глущенко В. В. Обеспечение информационной безопасности на транспорте //Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2016. – №. 1 (62). – С. 6-9.
7. Цветков В.Я. Информационная коммуникативистика // Славянский форум. – 2017. -3(17). – С.89-96.
8. Farkas K. et al. Crowdsending based public transport information service in smart cities //IEEE Communications Magazine. – 2015. – Т. 53. – №. 8. – С. 158-165.
9. Giuliano R. et al. Adaptable Communication System (ACS) for Flexible Communications in the Transport Sector: The AB4Rail project experience //2021 AEIT International Conference on Electrical and Electronic Technologies for Automotive (AEIT AUTOMOTIVE). – IEEE, 2021. – С. 1-6.
10. Гончарова Л.М. И все-таки они существуют: коммуникация и культура как ценности современного мира // Научные исследования и разработки. Современная коммуникативистика. -2022. Т.11. 4. С.6-9.
11. Ключанов И.Э. К осмыслению коммуникации как таковой // Научные исследования и разработки. Современная коммуникативистика. -2022. Т.11. 4. С.10-13.
12. Максудова Л.Г., Цветков В.Я. Информационное моделирование как фундаментальный метод познания // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2001. – №1. – С.102-106.
13. Агеева Ю.В. Коммуникативная стратегия самопрезентации русскоязычном деловом дискурсе // Научные исследования и разработки. Современная коммуникативистика. -2022. Т.11. 4. С.41-46
14. Чехарин Е. Е. Рассуждения в информационном поле // Славянский форум. 2022, 3(37). С. 72-83.
15. Анисимов В. Г. и др. Эффективность обеспечения живучести подсистемы управления сложной организационно-технической системы //Телекоммуникации. – 2020. – №. 11. – С. 41-47.
16. Розенберг И.Н., Соловьев И.В., Цветков В.Я. Комплексные инновации в управлении сложными организационно-техническими системами. /под ред. В.И. Якунина – М.: Феория, 2010. – 248с.
17. Juang J. N. Applied system identification. – Prentice-Hall, Inc., 1994.
18. Цветков В.Я. Прикладные системы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – №3. – С.76- 85.
19. Лотоцкий В.Л. Пространственное информационное моделирование // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – 3 (15). – С.114-122.
20. Цветков В.Я. Основы геоинформационного моделирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1999. – №4. – С.147 -157.
21. Андреева О.А. Геоинформационное моделирование // Славянский форум. -2019. – 2(24). – С.7-12.
22. Гойхман О. Я. Коммуникативистика в современном обществе. Научные исследования и разработки. // Современная коммуникативистика. – 2012. – Т. 1. – №. 1. – С. 4.
23. Цветков В.Я. Глобализация и информатизация // Информационные технологии. – 2005. – №2. – С.2-4.
24. Hussain K. et al. Metaheuristic research: a comprehensive survey //Artificial intelligence review. – 2019. – Т. 52. – №. 4. – С. 2191-2233.
25. Цветков В.Я. Информационные модели объектов, процессов и ситуаций // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2014. – 5(83). – С.4- 11.
26. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Информационные процессы в пространстве «больших данных» // Мир транспорта. 2017. – Т.15, №6(73). – С.20-30.
27. Ожерельева Т. А. Отношения несоответствия и соответствия в информационном поле // Славянский форум. 2021, 2(32). С.167-174.
28. Рогов И. Е. Моделирование транспортных потоков //Наука и технологии железных дорог. – 2019. – Т. 3. – №. 3. – С.26-38.
29. Цветков В.Я., Булгаков С.В., Титов Е.К., Рогов И.Е. Метамоделирование в геоинформатике // Информация и космос. 2020. – №1. – С.112-119.
30. Ожерельева Т.А. Метамоделирование в информационном поле – Saarbruken, 2020. –109с.
31. Чехарин Е. Е. Интерпретация информационных конструкций // Перспективы науки и образования- 2014. – №6. – С.37-40.
32. Цветков В.Я. Паралингвистические информационные единицы в образовании// Перспективы науки и образования. – 2013. – 4(4). – С.30-38.
33. Раицкая Л.К. Сущность информационно-коммуникационного педагогического взаимодействия в интернет-среде // Современная коммуникативистика. – 2012. – Т. 1. – №. 1. – С. 43-47.
34. Шилин А. М. Коммуникативное пространство современного мегаполиса //Научный журнал Дискурс. – 2018. – №. 8. – С. 133-147.
35. Гнатюк О.Л. Основы теории коммуникации: Учебное пособие. — М.: КНОРУС, 2010.
36. Иванников А.Д., Тихонов А.Н., Цветков В. Я. Основы теории информации – М.: МАКС Пресс, 2007. – 356 с.
37. Цветков В.Я. Рецепция информации // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – 1 (13). – с.121-129.
38. Tsvetkov V. Ya. Evaluations of Information Asymmetry // Modern Applied Science; 2015; № 6 (9); pp.243-247.



39. Ожерельева Т.А. Логические информационные единицы // Славянский форум, 2015. – 2(8) – с.240-249.
40. Rozenberg I. N. Information Construction and Information Units in the Management of Transport Systems // European Journal of Technology and Design, 2016, 12 (2), pp. 54-62.
41. Qiu S. et al. Crowd-mapping urban objects from street-level imagery //The world wide web conference. – 2019. – С. 1521-1531.
42. Ganti R. K., Ye F., Lei H. Mobile crowdsensing: current state and future challenges //IEEE communications Magazine. – 2011. – Т. 49. – №. 11. – С. 32-39.
43. Wang Y., Ma J. Mobile social networking and computing: A multidisciplinary integrated perspective. – CRC Press, 2014.
44. Pathan A. S. K. (ed.). Crowd assisted networking and computing. – CRC Press, 2018.
45. Dey N., Tamane S. (ed.). Big data analytics for smart and connected cities. – IGI Global, 2018.
46. Буравцев А.В., Цветков В.Я. Облачные вычисления для больших геопространственных данных // Информация и космос. 2019. – №3. – с .110-115.
47. Arkian H. R., Diyanat A., Pourkhalili A. MIST: Fog-based data analytics scheme with cost-efficient resource provisioning for IoT crowdsensing applications //Journal of Network and Computer Applications. – 2017. – Т. 82. – С.152-165.
48. Дешко И.П., Кряженков К.Г., Цветков В.Я. Устройства, модели и архитектуры Интернета вещей: Учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2017. – 88 с.
49. Liu J. et al. A survey of mobile crowdsensing techniques: A critical component for the internet of things //ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. – 2018. – Т. 2. – №. 3. – С. 1-26.
50. Borcea C., Talasila M., Curtmola R. Mobile crowdsensing. – Chapman and Hall/CRC, 2016.

УДК 001.895; 629.066; 656.029; 656.3

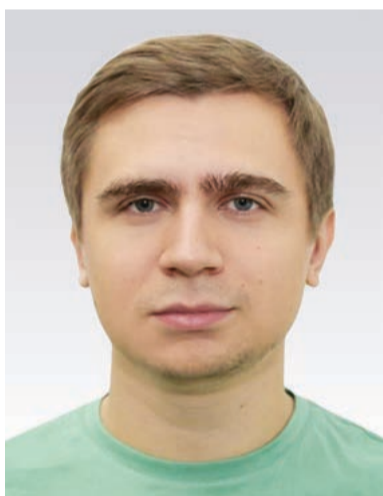
# Применение агентных систем для оптимизации грузоперевозок

## Application of agent systems to optimize cargo transportation

**Мельников Д.А.**, Аспирант, Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),  
E-mail: dmbox2019@gmail.com, Москва, Россия

**Melnikov D.A.**, Graduate student, Russian Technological University (RTU MIREA),  
E-mail: dmbox2019@gmail.com, Moscow, Russia

### Аннотация



В статье рассматривается развитие и применение агентных систем в сфере транспорта, раскрывается содержание модели агента и агентного подхода. Показано различие между агентными и мультиагентными системами. Дано сравнение агентов и информационных единиц. Агент является процессуальной информационной единицей в информационном поле, некоторые агенты являются интеллектуальными информационными единицами. Преимущество агентов проявляется в динамических ситуациях. Существует двойственность агентных систем – по организации и принципам они относятся к искусственному интеллекту, а по использованию – к прикладным системам. Показана целесообразность применения информационного моделирования при проектировании агентов, описаны примеры применения агентов для решения задач в транспортной сфере.

**Ключевые слова:** транспорт, перевозки, маршрутизация, агентные системы, информационные единицы, информационная ситуация.

### Abstract

The article discusses the development and application of agent systems in the field of transport, reveals the content of the agent model and the agent approach. The difference between agent and multi-agent systems is shown. A comparison of agents and information units is given. An agent is a procedural information unit in an information field, some agents are intelligent information units. The advantage of agents manifests itself in dynamic situations. There is a duality of agent systems – in terms of organization and principles, they belong to artificial intelligence, and in terms of use – to applied systems. The expediency of using information modeling in the design of agents is shown, examples of the use of agents for solving problems in the transport sector are described.

**Keywords:** transport, transportation, routing, agent systems, information units, information situation.



## Введение

Применение агентов для решения сложных задач основано на действиях [1, 2], в которых основой действий является физическая или информационная модель [3], называемая агентом и его вариативное поведение, зависящее от систематики информационных ситуаций [4] и среды, в которой он находится. Агентный подход позволяет не только проектировать гибкий маршрут движения, но и осуществлять его перемаршрутизацию в реальном времени [5]. Методология агентного подхода универсальна. Она позволяет оптимизировать сложные процессы разного уровня сложности. Ограничения ее применения обусловлены ограничением методических и вычислительных ресурсов. В работе [6] дается анализ и систематика агентов и межагентных отношений. В работе [7] дается анализ различных моделей агентно-ориентированных систем. Предлагается классификация интеллектуальных и мультиагентных систем, а также модели механизмов поведения интеллектуальных агентов. В работе [8] рассматриваются понятия как «интеллектуальный агент» (ИА), «мультиагентная система» (МАС), «агентно-ориентированная система». Выделены методологические подходы к проектированию АОС. В работе [9] дан обзор актуальных компьютерных систем поддержки принятия решений, разработанных с использованием агентного подхода. В работе [10] описаны агентные вычисления как область исследований, связанная с созданием интеллектуального программного обеспечения на основе концепции «агентов». Рассмотрены данные из 1064 журнальных статей, проиндексированных в сети знаний ISI, опубликованных за 20-летний период: 1990–2010 гг. В работе [11] дан обзор интеллектуальным и автономным агентам. Доказано, что это подобласть символического искусственного интеллекта, в которой эти агенты принимают решение, реактивно или проактивно, а также принимают решение о курсе действий, рассуждая на основе имеющейся информации. В области транспорта агенты применяются при динамической маршрутизации и специальных задачах таких как сцепка поездов [12].

## Принципы применения агентных систем

Необходимо различать агентные и мультиагентные системы. Мультиагентные или многоагентные системы (МАС) имеют наборы качественно разных агентов, между которыми существуют отношения и которые дополняют друг друга и образуют целостную саморазвивающуюся систему. Агентная система более автономна и допускает управление и развития извне и в отдельных случаях осуществляет действия только по указанию из внешних источников. В тоже время агентная система является более общим понятием и включает мультиагентные системы. Мультиагентные системы можно рассматривать как вид агентных систем.

Многоагентные системы (MAS) [13] как область исследования — это подобласть искусственного интеллекта (ИИ). Несмотря на то, что они относительно молоды

по сравнению с более архетипическими областями исследований, MAS имеют богатую историю; в 1995 году [14] агентные технологии были признаны быстро развивающейся областью исследований и одной из самых быстрорастущих областей информационных технологий. Здесь следует отметить, что МАС относят и к области информационных технологий. Соответственно, область информационного моделирования также применяется для создания и МАС.

Агентная система состоит из независимых интеллектуальных блоков управления, связанных с физическими или функциональными объектами (например, с транспортным средством, заказом). Это перспективное решение для управления сложными сетями, обеспечивающее большую гибкость, надежность, адаптивность и реконфигурируемость маршрута или сети.

Агенты действуют автономно, преследуя собственные интересы и взаимодействуя друг с другом, например, используя механизмы обмена информацией и переговоров. В транспортной сети у каждого заказа (работы) и каждого ресурса может быть свой целевой агент. Например, агент по работе может сосредоточиться на своевременной доставке с минимально возможными затратами, а агент по ресурсам может стремиться к максимальному использованию ресурсов. Ключевой вопрос заключается в том, как настроить агентов таким образом, чтобы их автономное поведение приводило к почти оптимальному решению для сети в целом. Одним из вариантов является использование рыночного механизма, такого как аукцион [15]. Общая цель производительности агентов в транспортной сети может состоять в том, чтобы сбалансировать общую задержку и общие соответствующие затраты.

Понятие аукцион в агентных системах имеет другой смысл [15]. Аукцион в агентных системах есть механизм переопределения целей и децентрализованного планирования и управления. Децентрализованное планирование — это проблема распределения ресурсов между альтернативными вариантами использования с течением времени, когда конкурирующие виды использования представлены автономными агентами. Рыночные механизмы используют цены, полученные посредством протоколов распределения ситуаций, для определения графиков движения.

Агенты как модели и механизмы неоднородны. Наибольшее значение имеют интеллектуальные агенты с памятью и механизмом принятия решений. Транспортные кибер-физические системы [16] можно рассматривать как комплекс интеллектуальных агентов. Интеллектуальный агент [17] можно обобщить как модель или компьютеризированную сущность [17], которая: способна рассуждать (рационально/когнитивно), независимо принимать собственные решения (автономно), сотрудничать с другими агентами, когда это необходимо (социально), воспринимать контекст, в котором она действует, и адекватно реагировать на него (реактивно) и, наконец, предпринимать действия для достижения своих целей (проактивно). Агентно-ориентированная (или >>>

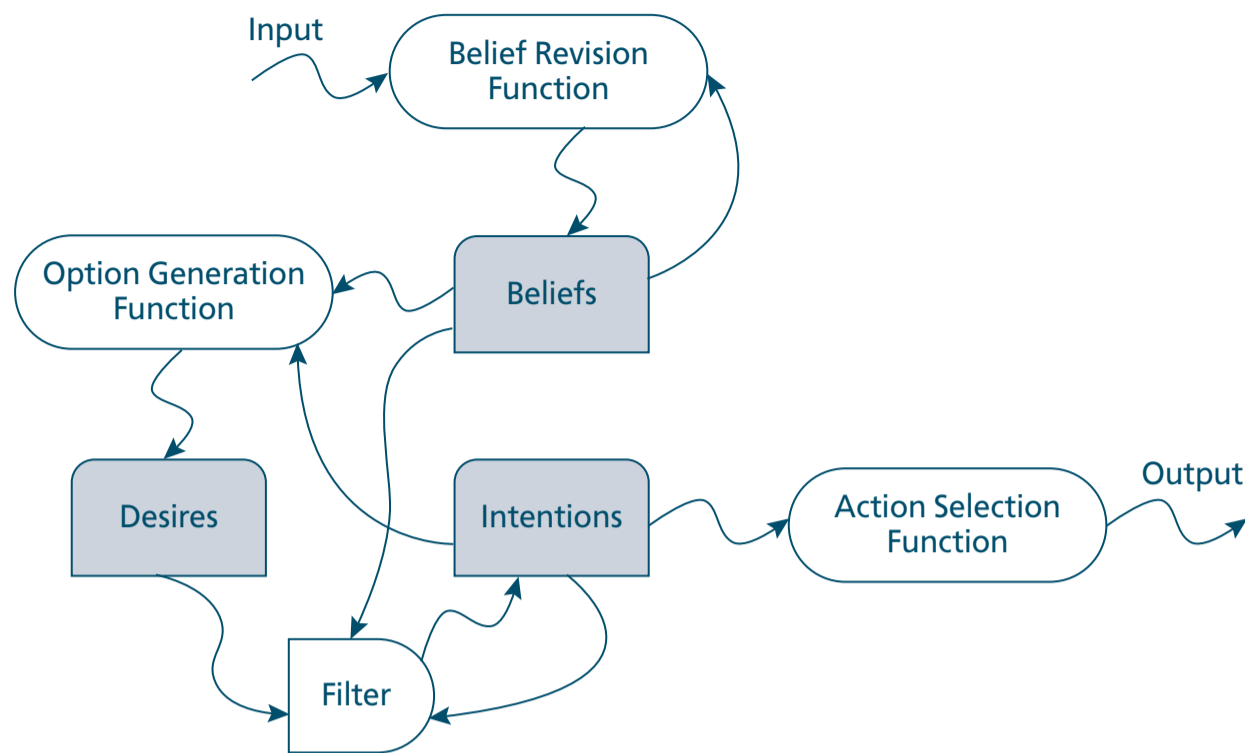


Рисунок 1. Модель BDI

агентно-ориентированная) система — это система, в которой агенты являются основными объектами, рассматриваемыми как первоклассные абстракции.

Отметим три конкретные модели, которые были фундаментальными при разработке агентов в прошлом и которые до сих пор используются в новых языках: система процедурного рассуждений (мышления) (PRS), модель убеждения-желания-намерения (BDI) и ситуационное исчисление.

Система процедурных рассуждений (PRS) [18] способна рассуждать о процессах и о процедурных формах знания. Затем агент в этой системе может использовать эти процедуры для выбора намерений для достижения определенных целей. Эти процедуры не вызываются априори, а запускаются, когда они могут способствовать достижению какой-либо цели или реагировать на некоторую ситуацию. Несмотря на некоторое сходство с планировщиками ИИ, основное отличие PRS состоит в том, что он выполняет частичное иерархическое планирование в том смысле, что он взаимодействует с динамической средой в процессе рассуждений, а не создает план для статической среды.

Модель убеждения-желания-намерения (BDI) [19, 20] состоит из процесса рассуждений, который помогает принять решение о выборе подходящего действия для достижения некоторой цели. Его три ментальные установки таковы: вера — знание того, что агент верит в свое окружение, себя и других агентов; желание — желаемые состояния, которых хочет достичь агент; и намерение — последовательность шагов к достижению желания. Эти ментальные установки соответственно представляют информационное, мотивационное и совещательное состояния агента. Рабочий процесс в универсальной системе BDI показан на рис.1 и работает как таковая: функция пересмотра убеждений получает входную информацию из окружающей среды (например, датчиков) и отвечает за обновление базы убеждений.

Это обновление может генерировать больше вариантов, которые могут стать текущими желаниями, основанными на базе убеждений и базе намерений. Фильтр отвечает за обновление базы намерений с учетом ее предыдущего состояния и текущей базы убеждений и базы желаний. Наконец, намерение выбирается как действие агента. BDI — самая популярная модель агентства, она использовалась и продолжает использоваться во многих языках программирования агентов.

Ситуационное исчисление связано с ситуационным моделированием [21-23] и с моделью информационной ситуации [24, 25]. Эта модель позволяет оценивать информационную позицию и информационное преимущество. Модель информационной ситуации служит одним из инструментов построения картины мира [26] (рис.1).

Модель информационной ситуации позволяет сжимать пространство в округ агента и тем самым повышает оперативность его действий. Развитием информационной модели являются информационные единицы [27]. Они, по существу являются описанием агентов. Во многих случаях информационные единицы — это пассивные агенты. Агент всегда характеризуется активностью, а информационная единица управляется извне и может обладать активностью или не обладать. Активная информационная единица с интеллектом и памятью это и есть агент. Информационные единицы выводят на информационное поле [28], элементами и агентами которого они являются [29].

Ситуационная обработка информации имеет два направления: ситуационное исчисление [30], связанное с языками программирования и агентами и ситуационная обработка информации [31], связанная с ситуационным моделированием. Ситуационное исчисление [30] — это язык первого порядка, предназначенный для представления изменений в динамических средах. Ситуация — это термин первого порядка, представляющий последовательность действий. Исходная ситуация — это когда никаких действий еще не произошло. >>>



## Агентные системы в транспортной сфере

Несмотря на то, что появилось много статей о многоагентных системах, также применяемых в логистике, литература по сравнению производительности между традиционными операционными системами и многоагентными системами недостаточна. В работе [5] проведено сравнение для транспортной сети, в которой заказы (полные загрузки грузовиков) с различными мягкими временными окнами поступают во время выполнения расписания и должны быть запланированы в режиме реального времени. То есть необходимо назначить транспортному средству заказ и определить возможное время начала движения. Поскольку требуется быстрое реагирование, то используют локальные правила диспетчеризации и последовательное планирование.

Рассмотрено [5] планирование в режиме реального времени полных заказов на перевозку грузовиков с временными окнами, которые поступают во время выполнения графика. Поскольку требуется метод быстрого планирования, для решения таких задач традиционно используются эвристики с опережением. В качестве альтернативы в [5] использованы агенты. В этом методе агенты транспортных средств планируют свои собственные маршруты. Они взаимодействуют с агентами по ресурсам, которые стремятся к минимальным транспортным расходам, используя аукцион [15] Викри для каждого поступающего заказа.

Подход с применением агентов имеет несколько преимуществ: он быстрый, требует относительно небольшого объема информации и облегчает корректировку расписания в ответ на обновление информации. Правильно разработанный многоагентный подход работает так же хорошо или даже лучше, чем традиционные методы. В частности, многоагентный подход дает меньше пустых миль и более стабильный уровень обслуживания.

При оперативном планировании и управлении многими транспортными средствами приходится иметь дело с информационными неопределенностями [32], такими как время транспортировки (например, из-за заторов), поступление срочных заказов во время выполнения графика и модификации заказов. В сочетании с иногда жесткими ограничениями (например, временными окнами) это приводит к необходимости гибкой, стабильной и надежной системы планирования и контроля.

Оперативный план движения должен быть гибким в том смысле, что корректировка расписания в ответ на обновление информации должна быть легкой. Он должен быть стабильным в том смысле, что незначительные обновления информации (например, поступление одного срочного заказа) должны влиять только на небольшую часть расписания. Он должен быть прочным в том смысле, что общая производительность транспортной сети (например, транспортные расходы, своевременная доставка) должна оставаться приемлемой при большом количестве сценариев непредвиденных событий, таких как срочные заказы.

Традиционно для построения интегральных транспортных графиков используются методы глобальной

оптимизации, основанные на исследовании операций. Однако может возникнуть вопрос, подходят ли такие методы для планирования и управления стохастическими динамическими транспортными сетями.

Во-первых, большинство алгоритмов оптимизации требуют много информации заранее. Во-вторых, алгоритмы глобальной оптимизации могут быть чувствительны к обновлениям информации: незначительное изменение информации может повлиять на графики движения многих транспортных средств. В-третьих, время, необходимое для алгоритма, может не позволить своевременно реагировать на непредвиденные события, такие как отказ оборудования и поступление срочных заказов. Наконец, гибкие транспортные сети могут состоять из нескольких независимых организационных единиц, которые работают автономно, в личных интересах и не обязательно в сотрудничестве. Альтернативой, которая была предложена в литературе по информатике, является многоагентная система (MAS).

В качестве общего критерия производительности MAS применяют: средний процент своевременной доставки, как мера обслуживания; изменение процентной доли своевременной доставки в качестве меры устойчивости; процент порожнего пробега в качестве меры эффективности. Также оценивают общие затраты (транспортные расходы, штрафные санкции) для измерения сочетания качества обслуживания и эффективности.

В концепции планирования на основе агентов используют назначение транспортных средств на работу, используя протокол переговоров, который неявно координирует решения агентов. Определение такой концепции планирования на основе агентов зависит от трех ключевых вариантов:

1. каких агентов различать с их задачами и целями;
2. какими продуктами (услугами) торговать;
3. какой рыночный механизм (аукцион) определить.

Также интерес представляет опыт использования агентов при динамическом планировании транспорта при множественных ограничениях ресурсов [33]. В этой статье представлена эвристика для динамической задачи планирования транспортных средств с несколькими ограничениями пропускной способности.

В обычной автоматизированной транспортной системе с использованием автоматизированных управляемых транспортных средств узкими местами являются (1) транспортные средства, (2) доки для погрузки/разгрузки, (3) места для парковки транспортных средств и (4) место для хранения груза. Эта проблема сложна, потому что взаимосвязанные действия (погрузка, транспортировка, разгрузка) в нескольких географических точках должны быть запланированы в соответствии с несколькими ограничениями ресурсов, где ресурс узкого места меняется с течением времени.

В работе [33] описан специальный метод последовательного планирования и проанализировали его динамическое поведение с помощью моделирования дискретных событий. Метод позволяет находить хорошие расписания транспортных средств, удовлетворяющие всем ограничениям ресурсов. Для сравнения использован простой подход, в котором не учитывали



ограничения ресурсов и увеличивали время обработки на статистически оцененное время ожидания для учета конечных мощностей. Обнаружено, что метод [33] находит лучшие расписания с точки зрения уровней обслуживания.

В этой статье описан метод последовательного планирования для динамической задачи планирования транспортных средств с ограниченными ресурсами в реальном времени. Это исследование было мотивировано изучением автоматизированной транспортной системы возле аэропорта Схипхол, Нидерланды. Автоматизированные управляемые транспортные средства (AGV) перевозят критически важные по времени продукты между терминалами на расстояние до 10 км. Эти терминалы требуют серьезных вложений в оборудование (автомобильные транспортные средства, доки) и площади (парковки, склады для грузов), особенно потому, что некоторые из них приходится строить под землей.

Система должна обеспечивать надежный сервис (своевременная доставка) при низких затратах. Поэтому количество доков, парковочных мест и мест хранения грузов в терминалах должно быть минимальным. Качественное расписание транспортных средств может снизить потребность в ресурсах, при этом соблюдая соглашения об уровне обслуживания (например, своевременная доставка на 98 %). Планирование особенно важно в этой конкретной ситуации, когда временные окна сжаты, а использование ресурсов является высоким.

В качестве модели выбрана транспортная сеть, состоящая из терминалов, между которыми необходимо перевозить грузы автомобилями, и центральных стоянок, где можно разместить автомобили, когда они временно не нужны или когда в других частях сети не хватает места.

Транспортное задание определяется как запрос на погрузку некоторого груза на определенном терминале после заданного времени выпуска, перемещение его в терминал назначения и выгрузку груза до заданного времени. Задания поступают со временем, и требуется принятие решений в режиме реального времени, учитывая их короткое время между поступлениями и временем обработки (в минутах, а не в часах). Помимо количества транспортных средств, стыковочные, стояночные и грузовые возможности терминалов ограничены. Фактически имеет место субсидиарный транспортный поток [34]

Описанную проблему можно рассматривать как проблему динамического планирования ресурсов. Ее можно интерпретировать как динамическую задачу планирования транспортных средств в реальном времени. Транспортные средства планируются на временной горизонт, а новые запросы на обслуживание поступают в режиме реального времени. После каждого прибытия текущее расписание может быть пересмотрено, чтобы включить новое прибытие, но периодическое изменение расписания также возможно. В динамическом случае планировщик должен реагировать на события, происходящие в режиме реального времени, такие как поступление рабочих мест, заторы и помехи. Большая часть литературы по маршрутизации транспортных средств и составлению расписаний посвящена статической задаче, в которой все данные известны до построения маршрутов.

При решении данной задачи использовался метод двойного горизонта [35]. Этот метод обусловлен тем, что динамическая проблема вывоза и доставки с временными окнами (PDPTW) возникает в случаях запросов на получение и доставку в тот же день для перевозки писем и небольших посылок. Эта задача решается в реальном времени.

Методологией решения для динамического PDPTW является использование скользящего временного горизонта, или двойного горизонта. В математике этот метод называют методом скользящего окна. Двойной горизонт состоит в том, что при назначении нового запроса, дополнительно к старому, транспортному средству необходимо учитывать влияние решения как на краткосрочную (горизонт 1), так и на долгосрочную (горизонт 2) перспективу.

В частности, более эффективное управление временем простоя в отдаленном будущем может помочь снизить стоимость маршрутизации. В этой статье описывается основанная на двойном горизонте эвристика для динамического PDPTW. Результаты вычислений показывают преимущество использования двойного горизонта в сочетании с эвристикой вставки и улучшения.

В [12] описана мультиагентная система планирования стыковки и совместного использования поездов железнодорожной транспортной системы (TCS). Система планирования включает в себя планирование единиц командировок и оптимизацию решений. Процесс планирования реализуется как пошаговый алгоритм, который позволяет интегрировать новые спецификации задач в текущий процесс планирования. Затем исходное решение оптимизируется с помощью моделируемой торговли. Кроме того, мультиагентный подход тестируется на практическом примере. Рабочие параметры и границы системы TCS изменены, чтобы получить сопоставимый график работы железной дороги

Внутренние, а также приграничные железнодорожные перевозки нуждаются в очень гибких производственных системах для удовлетворения требований клиентов. Это касается пассажирских и грузовых перевозок. Повышенная гибкость производственных систем и необходимая степень надежности в транспортной цепочке вызвали потребность в мощных системах планирования. Одним из возможных решений этих проблем планирования являются мультиагентные системы (MAS), как подобласть исследований искусственного интеллекта.

Основная идея MAS состоит в том, чтобы генерировать приближенные решения очень сложных задач, распределяя их среди автономных решателей задач (агентов). Эти агенты смогут сами решать локальные проблемы. Интегрируя агентов в коммуникационную среду, они могут найти решение всей проблемы в сотрудничестве друг с другом. Это означает, что каждый из этих агентов преследует свою локальную цель, например, транспортную задачу, но он также может вести переговоры с другими агентами для сотрудничества. Агентная система есть двух алгоритмическая система с локальным и общим алгоритмами [36].

Конкретным примером подхода MAS в области железнодорожных перевозок является применение системы сцепки и разделения поездов (TCS). TCS предла- >>>

гает гибкость, надежность и короткое время перевозки, предлагая клиентам поезда с высоким качеством перевозки прямых поездов даже с небольшим количеством вагонов (модулей). Однако концепция увеличит количество поездов в железнодорожной системе. Принимая во внимание затраты на выделение путей, которые рассчитываются по параметру «количество поездов», а не по «длине поезда» или «весу поезда», соответствующее потребление поездных путей должно быть уменьшено по экономическим причинам. Таким образом, чтобы снизить стоимость выделения дорожек и увеличить пропускную способность дорожек, различные модули соединяются и разъединяются (Coupling).

Результатом многоагентного подхода является расписание. Это расписание показывает для каждого модуля TCS последнее время завершения процесса загрузки, время отправления, время прибытия, время начала разгрузки, время стыковки, места стыковки и возможное время ожидания модуля. Цель состоит в том, чтобы найти решение со связанными модулями для минимизации затрат на размещение дорожек. Однако для создания оптимизированного расписания необходимо учитывать некоторые граничные условия.

Традиционный вид грузовых перевозок в виде обычных повагонных погрузок часто требует очень много времени из-за ожидания вагонов и вагонных групп на узловых станциях и сортировочных станциях: грузовые вагоны должны быть собраны с въезда в железнодорожную сеть и доставлены на узловую станцию. Другой процесс сбора с нескольких узловых станций происходит на следующем этапе транспортировки, когда вагоны доставляются с узловых станций на сортировочные станции. Эта задача решалась как стационарная.

В [12] рассматривается динамическая задача, в которой условия могут меняться в процессе сортировки. Такое решение позволяет снизить стоимость заданного набора транспортных задач в сети железных дорог. Каждая задача указывается в виде кортежа, состоящего из исходного и конечного узлов, самого раннего возможного времени отправления, самого позднего допустимого времени прибытия и дополнительной метки времени, указываю-

щей, когда задача объявляется системе. Таким образом, набор задач не полностью известен системе во время запуска, новые задачи поступают в процессе планирования. МАС решает такие задачи.

## Заключение

Анализ показывает, что агент является процессуальной информационной единицей в информационном поле. Некоторые агенты являются интеллектуальными информационными единицами. Агентные системы – это системы агентов, имеющие общий и частные алгоритмы. Преимущество агентных систем в их оперативной реакции на изменение внешней и внутренней ситуации. Это дает основание применять их для решения оперативных задач, включая перевозки и маршрутизацию. Многоагентные системы имеют явные преимущества по сравнению со стационарными системами. Включение множественных ограничений ресурсов в метод последовательного планирования возможно, и, особенно в случаях с большими ограничениями, могут быть достигнуты значительные улучшения в уровнях обслуживания. В некоторых случаях агентные системы моделируют цифровые двойники. Такой подход позволяет планировать в режиме реального времени. Агентные технологии можно рассматривать как динамическую область исследований искусственного интеллекта и как распределенные интеллектуальные транспортные системы.

Сравнение новых задач и требований с существующими методами управления является одним из основных мотивов применения агентных технологий. Важным выводом следует считать необходимость применения информационного моделирования при проектировании агентов. Использование агентной методологии позволяет задавать четкую организацию работ транспортных систем с использованием моделей типовых агентов и моделей их взаимодействий. С позиций информационного поля агенты есть разновидность активных информационных единиц. Использование модели информационной ситуации также расширяет возможности агентного подхода. ■



## Список литературы

1. Шермадини М. В. Агентное моделирование как современный метод исследования инновационных экономических систем // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2018. – Т. 8. – №. 7А. – С. 135-142.
2. Рамазанов Р. Р. Агентное моделирование в исследовании и прогнозировании социально-экономических систем и процессов // Экономика и математические методы. – 2021. – Т. 57. – №. 1. – С. 19-32.
3. Максудова Л.Г., Цветков В.Я. Информационное моделирование как фундаментальный метод познания // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2001. – №1. – с.102-106.
4. Цветков В.Я. Систематика информационных ситуаций // Перспективы науки и образования. – 2016. – №5 (23). – С.64-68.
5. Mes M., Van Der Heijden M., Van Harten A. Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems // European journal of operational research. – 2007. – Т. 181. – №. 1. – С. 59-75.
6. Цветков В. Я. Анализ агентных систем // Славянский форум. – 2015. – №. 2. – С. 310-318.
7. Швецов А. Н. Агентно-ориентированные системы: основные модели. – 2012.
8. Швецов А. Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению " Информационно-телекоммуникационные системы". – 2008.
9. Агеева А. Ф. Обзор современных систем поддержки принятия решений, созданных при помощи агентного подхода // Электронные информационные системы. – 2018. – №. 4. – С. 29-46.
10. Niazi M., Hussain A. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey // Scientometrics. – 2011. – Т. 89. – №. 2. – С. 479-499.
11. Cardoso R. C., Ferrando A. A review of agent-based programming for multi-agent systems // Computers. – 2021. – Т. 10. – №. 2. – С.16.
12. Böcker J., Lind J., Zirkler B. Using a multi-agent approach to optimise the train coupling and sharing system // European Journal of Operational Research. – 2001. – Т. 131. – №. 2. – С. 242-252/
13. Wooldridge, M. An Introduction to Multi Agent Systems, 2nd ed.; John Wiley and Sons: Hoboken, NJ, USA, 2009; ISBN 047149691X.
14. Wooldridge, M.J.; Jennings, N.R. Intelligent agents: Theory and practice. Knowl. Eng. Rev. 1995, 10, 115–152.
15. Wellman M. P. et al. Auction protocols for decentralized scheduling // Games and economic behavior. – 2001. – Т. 35. – №. 1-2. – С. 271-303.
16. Цветков В.Я. Управление с применением кибер-физических систем // Перспективы науки и образования. – 2017. – №3(27). – С.55-60.
17. Russell, S.J.; Norvig, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach, 3rd ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2010.
18. Georgeff, M.; Lansky, A. Procedural Knowledge. Proc. IEEE (Spec. Issue Knowl. Represent.) 1986, 74, 1383–1398.
19. Bratman, M.E. Intentions, Plans, and Practical Reason; Center for the Study of Language and Information: Stanford, CA, USA, 1999.
20. Rao, A.S.; Georgeff, M. BDI Agents: From Theory to Practice. In Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems (ICMAS), San Francisco, CA, USA, 12–14 June 1995; pp. 312–319.
21. Цветков В. Я. Ситуационное моделирование в геоинформатике // Информационные технологии. – 2014. – №6. – С.64-69.
22. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Объектные и ситуационные модели при управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 2(2). – С.2-10.
23. Цветков В.Я., Андреева О.А., Рогов И.Е., Титов Е.К. Ситуационное моделирование транспортной инфраструктуры при мобильном лазерном сканировании // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 2. С.2-4.
24. Плотников С.Б. Параметрическая и пространственная информационная ситуация // ИТ – Стандарт. 2021. 3(28). С.40-45.
25. Цветков В.Я. Модель информационной ситуации // Перспективы науки и образования. – 2017. – №3(27). – С.13-19.
26. Tsvetkov V. Ya. Formation of the world picture // European Journal of Technology and Design, 2020, 8(1). С.33-37.
27. Markelov V.M. The Application of Information Units in Logistics// European Journal of Technology and Design, 2014, № 4(6), p.176-183.
28. Раев В.К. Информационное пространство и информационное поле // Славянский форум. 2021, 4(34). С.87-96
29. Раев В.К. Информационные единицы в информационном поле // Славянский форум. 2022, 1(35). С. 104-114.
30. McCarthy, J.; Hayes, P.J. Some Philosophical Problems from the Standpoint of Artificial Intelligence. In Machine Intelligence 4; Meltzer, B., Michie, D., Eds.; Edinburgh University Press: Edinburgh, UK, 1969; pp. 463–502.
31. Титов Е.К. Алгоритмы ситуационной обработка информации // Славянский форум. -2018. – 4 (22). – С.60-64.
32. Цветков В.Я. Информационная неопределенность и определенность в науках об информации // Информационные технологии. – 2015. – №1. – С.3-7.
33. Ebben M. J. R., van der Heijden M. C., van Harten A. Dynamic transport scheduling under multiple resource constraints // European Journal of Operational Research. – 2005. – Т. 167. – №. 2. – С. 320-335.
34. Козлов А.В. Субсидиарные транспортные потоки // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6. №2 (22). – С.17-22.
35. Mitrovi -Mini S., Krishnamurti R., Laporte G. Double-horizon based heuristics for the dynamic pickup and delivery problem with time windows // Transportation Research Part B: Methodological. – 2004. – Т. 38. – №. 8. – С. 669-685.
36. Козлов А.В., Матчин В.Т. Методы и алгоритмы управления группами подвижных объектов // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т.4.– 3(15). – С.15-28.

УДК: 656

# Анализ надежности транспортных систем с использованием нечеткой логики

## Analysis of the reliability of transport systems using fuzzy logic

**Никашина П.О.**, Аспирант, Южный федеральный университет,  
E-mail: nikashina@sfnedu.ru, Таганрог, Россия  
**Nikashina P.O.**, Graduate student, Southern Federal University,  
E-mail: nikashina@sfnedu.ru, Taganrog, Russia

### Аннотация



Международный союз железных дорог ежегодно представляет отчет о безопасности, в котором подчеркивается, что одной из основных причин железнодорожных аварий является человеческий фактор. Изучение надежности действий человека-оператора должно быть включено в комплексную оценку надежности систем железной дороги. В работе представлен нечеткий метод оценки человеческого фактора в критически важных системах для железной дороги. Нечеткая логика позволяет упростить оценку параметров модели с помощью лингвистических переменных, более близких к когнитивным процессам человека. Такой подход лучше справляется с неопределенными и неполными данными, чем классический детерминированный подход, и сводит к минимуму субъективность оценки аналитика.

**Ключевые слова:** транспорт, нечеткая логика, человеческий фактор, железнодорожная инженерия, техническое обслуживание.

### Abstract

The International Union of Railways presents an annual safety report highlighting that one of the main causes of rail accidents is the human factor. The study of the reliability of the actions of a human operator should be included in a comprehensive assessment of the reliability of railway systems. The paper presents a fuzzy method for assessing the human factor in critical systems for the railway. Fuzzy logic makes it possible to simplify the estimation of model parameters using linguistic variables that are closer to human cognitive processes. This approach copes better with uncertain and incomplete data than the classical deterministic approach and minimizes the subjectivity of the analyst's assessment.

**Keywords:** transport, fuzzy logic, human factor, railway engineering, maintenance.



Железнодорожные системы – это технически сложная область, в которой многие аспекты работы системы выполняются с участием человека-оператора. Начиная с проектирования и построения системы, и заканчивая ее эксплуатацией, управлением и техническим обслуживанием, люди-операторы играют фундаментальную роль в жизненном цикле систем, связанных с железной дорогой.

Несколько статей и технических отчетов [1–3] сходятся во мнении, что многие железнодорожные аварии вызваны человеческой ошибкой или сочетанием человеческого фактора с аппаратно-программными сбоями. Стандарт ОАО РЖД №СТО РЖД 02.039-2011 от 21.09.2011 г. №2068р [4] посвященный анализу надежности персонала (АНП), указывает на необходимость надлежащей оценки вероятности человеческой ошибки (ВЧО), поскольку это серьезно влияет на общие параметры надежности, доступности, ремонтпригодности и безопасности системы.

Катастрофические бедствия и опасные несчастные случаи часто бывают результатами человеческих ошибок. Тривиальные человеческие ошибки, которые приводят к незначительным авариям, довольно распространены. Изучение надежности системы (механической или электрической) абсолютно необходимо для учета всех условий эксплуатации, влияющих на характеристики оборудования, таких как перепады температуры, относительная влажность, механические вибрации, тепловые и механические удары и так далее. Точно так же условия работы людей-операторов должны приниматься во внимание при оценке вероятности человеческой ошибки (ВЧО). Внутренние и внешние факторы, такие как эргономика рабочего места, время, доступное для выполнения задачи, микроклимат, уровень стресса и т.д., глубоко влияют на поведение операторов.

Несмотря на то, что в литературе доступно несколько методов АНП, был опубликован только один метод, специально разработанный для железнодорожного машиностроения. Совет по безопасности и стандартам железнодорожного транспорта (RSSB – Rail Safety and Standards Board) предлагает индивидуальную методику, называемую Оценка надежности железнодорожных действий (RARA – Railway Action Reliability Assessment, 2012) для оценки вероятности человеческой ошибки в железнодорожной отрасли [5].

Метод RARA широко используется в железнодорожном машиностроении, поскольку это единственный подход, широко признанный в этой области. Однако в этой технике можно обнаружить несколько критических моментов.

*Первый* – это влияние субъективности аналитика, проводящего оценку, которое не принимается во внимание.

*Второй* – это сложность, необходимая для оценки числовых значений, которые представляют влияние каждого внешнего фактора, влияющего на человеческие представления.

Таким образом, качество оценки в значительной степени зависит от опыта аналитика, проводящего оценку. Пытаясь решить эти проблемы, данное исследование направлено на поиск инновационного метода АНП, специально разработанного для применения в железнодорожной технике, который должен быть способен устранить основные недостатки метода RARA, имеющиеся в лите-

ратуре, а именно влияние субъективности аналитика и сложность численной оценки факторов влияния.

Подход, предложенный в данной работе, основан на нечеткой логике и интервальной арифметике оценить ВЧО задачи, связанной с железной дорогой, с целью уменьшения недостатков классического метода RARA. Более подробно, предлагаемый подход упрощает оценку ВЧО с помощью лингвистических переменных для описания как вероятности ошибки, так и уровня влияния каждого внутреннего и внешнего фактора.

Таким образом, можно разработать простой и эффективный инструмент для оценки ВЧО, который сводит к минимуму субъективность и влияние опыта аналитика. Нечеткие множества использовались в качестве оценок надежности человека, поскольку классические оценки могут быть неоднозначными, неопределенными, и вряд ли представлены четким числом, в то время как лингвистические переменные могут обеспечить оптимальное решение для решения таких проблем.

Основные преимущества предлагаемого метода:

- Внедрение инновационного метода АНП, специально разработанного для задач оператора в железнодорожном машиностроении, который использует нечеткую логику для оценки ВЧО.
- Предложение методологии, основанной на RARA, способной решить две основные проблемы классического RARA: субъективность аналитика и сложность численной оценки уровня воздействия.
- Проверка результатов, достигнутых в реальном тематическом исследовании, путем сравнения с методом RARA.

Начиная с 1970 года анализ надежности персонала (АНП) широко изучался, внедряя множество различных методов оценки вероятности человеческой ошибки (ВЧО). Каждый метод можно было бы разделить на три категории:

1. Методы первого поколения являются вехами АНП. Это простые подходы, которые рассматривают человека так же, как электрический / механический компонент (т.е. он способен только на успех или неудачу). ВЧО рассчитывается путем взвешивания базовой вероятности ошибки задач с некоторыми факторами, называемыми фактором формирования производительности (ФФП), такие как доступное время, стресс и рабочее время [14]. Как правило, эти методы классифицируют ошибки как упущение (когда оператор не выполняет задачу) или совершение (когда оператор выполняет задачу неправильно или делает что-то, что не требуется). Кроме того, используются простые когнитивные модели, такие как модели рисков человеческого фактора Расмуссена (основанная на навыках, правилах или знаниях).
2. Методы второго поколения вводят когнитивные модели и фокусируются на роли контекста в оценке ВЧО. Цель этих методов состоит в том, чтобы включить человеческое познание (психические процессы, такие как мышление, запоминание, решение проблем и т.д.) в рамках анализа человеческих действий. >>>

- Методы третьего поколения вводят симулятор для генерации данных для анализа. Эти методы направлены на разработку новых методов АНП или модификацию существующих методов АНП для рассмотрения динамического развития человеческого поведения, которое приводит к человеческой ошибке.

Динамические модели, используемые для оценки человеческого поведения, представляют собой фундаментальный аспект современных методов АНП. Большинство методов было разработано для атомной промышленности. Несмотря на это, надежность персонала является центральным моментом во многих различных областях применения, где человеческие ошибки могут привести к опасным авариям и опасным условиям. Одной из таких областей является железнодорожная отрасль, которая требует точного анализа надежности персонала в соответствии с стандартом ОАО РЖД [4].

Согласно последнему отчету МСЖД (Международного союза железных дорог) о безопасности за 2020 год человеческий фактор является второй причиной железнодорожных аварий после внешних причин (таких как нарушение границ, пешеход на железной дороге общего пользования, погода и т.д.), на долю которых приходится 3,7 % всех аварий [3]. Следовательно, оценка АНП на железной дороге может обеспечить ряд преимуществ для предотвращения опасных аварий. На самом деле, лишь несколько работ в современной литературе посвящены анализу надежности персонала в железнодорожном машиностроении.

Автор Грозданович [7] предлагает использовать метод SLIM для анализа вероятности человеческой ошибки оператора, работающего в центре управления железной дорогой [7]. Была изучена человеческая ошибка при оценке системы мониторинга и управления поездом [8]. Симуляторы кабины поезда использовались для сбора данных о вероятности человеческой ошибки при диагностике неисправностей машиниста поезда [9].

RSSB разработал модель RARA (Railway Action Reliability Assessment) в 2012 году [5]. RARA является наиболее распространенным методом HRA в железнодорожном машиностроении, поскольку это только один, специально разработанный только для такого рода приложений. Он классифицирует человеческую деятельность на железной дороге в рамках восьми различных общих типов задач (ОТЗ), сгруппированных в три категории: более автоматизированные процессы, основанные на навыках; более трудоемкие процессы, основанные на правилах; мышление вне процедур. Для каждого ОТЗ метод обеспечивает диапазон изменения вероятности человеческой ошибки и номинальное значение в пределах этого диапазона. RARA также рассматривает 27 различных условий, приводящих к возникновению ошибок (УПВО), чтобы учесть внутренние и внешние факторы, влияющие на поведение человека. Для каждого из УПВО метод обеспечивает максимальное воздействие (МВ), которое рассматриваемый УПВО окажет на оператора. Значение МВ взвешивается с помощью ОДВ (оцененная доля воздействия), чтобы оценить, насколько УПВО фактически влияет на задачу.

Используя базу данных RARA метода, предлагаемый подход состоит из нескольких шагов, чтобы вычислить ВЧО более простым способом для аналитика, гарантируя последовательные результаты. Поскольку данные о человеческих сбоях не всегда доступны, предлагаемый подход начинается с уже проверенных данных, предоставленных RARA.

Затем используется нечеткая логика для объединения базовой вероятности человеческой ошибки и условий внешнего воздействия, чтобы оценить вероятность совершения ошибки во время рабочей смены. Нечеткие рейтинги используются в качестве рейтингов, поскольку они помогают смягчить недостатки неоднозначных и неопределенных данных, присущие классическим рейтингам. Более того, нечеткая логика позволяет минимизировать субъективность оценки ВЧО с помощью лингвистических переменных вместо четкого числа. Фактически, аналитик, проводящий оценку, должен выбирать между различными функциями принадлежности (MFS) и связанной с ними лингвистической переменной вместо выбора значения в пределах диапазона ВЧО или выбора значения ОДВ для количественной оценки влияния  $A_i$  каждого УПВО. Этапы предлагаемого нечеткого подхода описаны следующим образом:

#### 1. Предварительная фаззификация ОТЗ.

- Используем  $V_{CHOmin}$ ,  $V_{CHOmax}$  и  $V_{CHOnom}$ , предоставляемые RARA для каждого ОТЗ, чтобы определить область нечеткого множества.
- Определяем от 3 до 5 MFS для каждого нечеткого набора ОТЗ.

#### 2. Предварительная фаззификация УПВО.

- Вычислить минимальное (ОДВ 0.1) и максимальное (ОДВ 1) значение любого воздействия, рассматриваемого RARA.
- Создать область нечеткого множества для каждого аффекта.
- Определить 5 MFS для каждого воздействия.

#### 3. Идентификация надлежащего ОТЗ.

- Выбрать общий тип задачи (ОТЗ).
- Выбрать MF для рассматриваемого ОТЗ.

#### 4. Идентификация УПВО.

- Выбрать любые условия, вызывающие ошибку  $i$ , которые имеют отношение к оцениваемой задаче.
- Выбрать MF для каждого УПВО.

#### 5. Расчет вероятности человеческой ошибки ВЧО.

#### 6. Дефаззификация нечеткого ВЧО.

Метод RARA основан на восьми различных ОТЗ. Для каждого из них RARA дает минимальное значение вероятности ошибки  $V_{CHOmin}$ , максимальное значение  $V_{CHOmax}$  и номинальное значение  $V_{CHOnom}$ , которые соответствуют наиболее вероятной вероятности ошибки для рассматриваемой задачи [5]. Все рассмотренные ОТЗ и соответствующие минимальные, максимальные и номинальные ВЧО включены в таблицу 1. >>>

Таблица 1  
**Основной тип задачи и вероятность человеческой ошибки согласно методике RARA**

Основной тип задачи	ВЧО <sub>min</sub>	ВЧО <sub>nom</sub>	ВЧО <sub>max</sub>
R1. Правильно реагировать на системную команду даже при наличии автоматизированной системы, обеспечивающей точную интерпретацию состояния системы.	0,0006%	0.002%	0.09%
R2. Полностью знакомая, хорошо продуманная, хорошо отработываемая задача, которая является рутинной.	0,008%	0.04%	0.7%
R3. Простое реагирование на специальный сигнал тревоги и выполнение действий, описанных в процедурах.	0,008%	0.04%	0.7%
R4. Задания, основанные на навыках (ручные, визуальные или коммуникационные), когда есть некоторая возможность для путаницы.	0,2%	0.3%	0.4%
R5. Довольно простая задача, выполняемая быстро или при недостаточном или неадекватном внимании.	6%	9%	13%
R6. Восстановите или переведите систему в исходное или новое состояние, выполнив процедуры с некоторой проверкой.	0,08%	0.3%	0.7%
R7. Идентификация ситуации, требующей интерпретации шаблонов сигналов тревоги/индикации.	2%	7%	17%
R8. Сложная задача, требующая высокого уровня понимания и мастерства.	12%	16%	28%

Таблица 2  
**Пример функции принадлежности, оцененной для ОТЗ R4 с использованием уравнений**

x	Степень принадлежности $\mu_{\text{ОТЗ}_i}(x)_{R4}$
0,2	0
0,22	0
0,24	0,5
0,26	1
0,28	1
0,30	1
0,32	1
0,34	0,5
0,36	0
0,38	0
0,40	0

Первый шаг предлагаемой процедуры использует эти значения для расчета нечеткой вероятности человеческой ошибки, связанной с каждым ОТЗ. Более подробно, нечеткая базовая вероятность человеческой ошибки будет связан с каждым типом задачи *i* следующим образом:

$$\widetilde{\text{ВЧО}}_{bi} = x, \mu_{\text{ОТЗ}_i}(x) \cdot x \in D_{\text{ОТЗ}_i} \quad (1)$$

$$\mu_{\text{ОТЗ}_i}(x) : D_{\text{ОТЗ}_i} \rightarrow [0, 1] \quad (2)$$

$$D_{\text{ОТЗ}_i} = \text{ВЧО}_{\text{mini}}, \text{ВЧО}_{\text{maxi}} \quad (3)$$

где  $\mu_{\text{ОТЗ}_i}(x)$  представляет функции принадлежности задачи *i*, в то время как  $D_{\text{ОТЗ}_i}$  является областью возможного допустимого значения по нечеткой базовой вероятности ошибки  $\widetilde{\text{ВЧО}}_{bi}$  ОТЗ<sub>*i*</sub>. Как и в уравнении (3), домен  $D_{\text{ОТЗ}_i}$  генерируется с использованием минимального и максимального значений ВЧО, предоставленных RARA для каждого ОТЗ.

Например, взяв ОТЗ R4 в качестве примера, область возможных допустимых значений  $D_{\text{ОТЗ}_i}$  R4 по ошибке нечеткой базы вероятность  $\widetilde{\text{ВЧО}}_{bi}$  R4 определяется уравнением (3) и таблицей 1 следующим образом:  $D_{\text{ОТЗ}_i} = [0,2\%, 0,4\%]$ .

Тогда, согласно уравнению (2), функции принадлежности ОТЗ R4 должны соответствовать следующему:

$$\mu_{\text{ОТЗ}_{R4}}(x) : [0,2\%, 0,4\%] \rightarrow [0, 1] \quad (4)$$

Только в иллюстративных целях один из этих трех MFS включен в таблицу 2 в соответствии с уравнением (1) и учитывая небольшую частоту дискретизации для простоты.

Результаты полного предварительного этапа фаззификации показаны на рисунке 1, где нечеткие множества, разработанные для каждого ОТЗ проиллюстрированы. Внутри домена каждой задачи было определено разное количество трапецевидных функций принадлежности (три, четыре или пять) в зависимости >>>



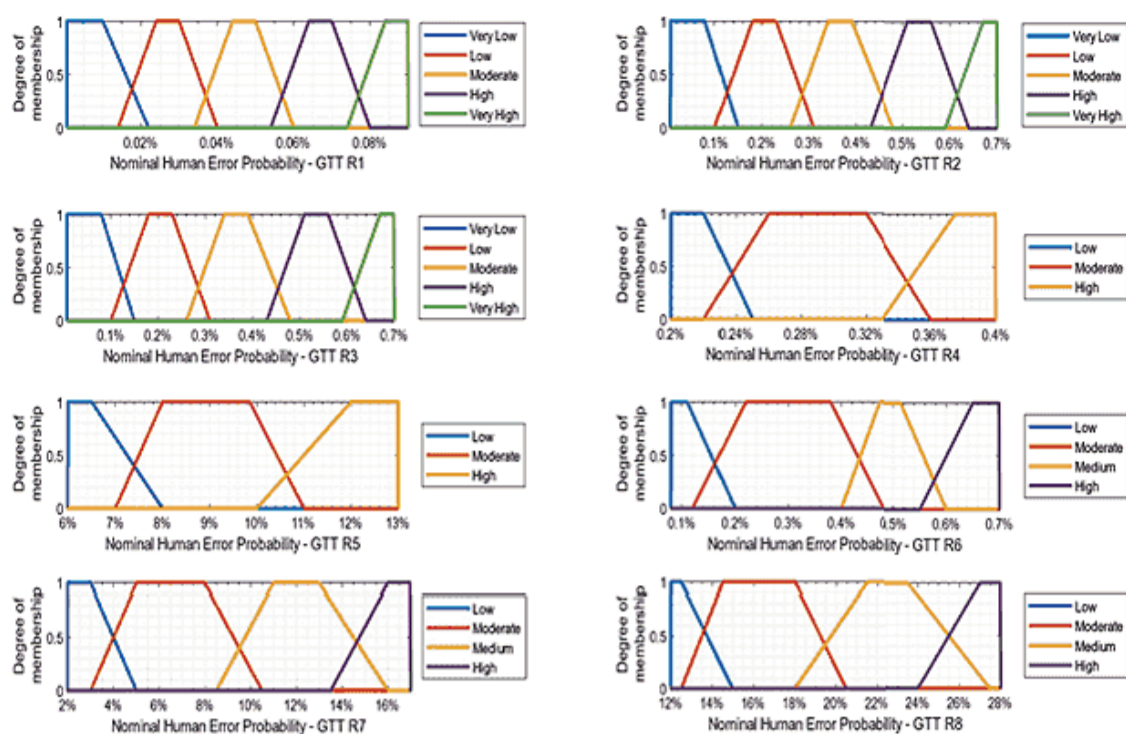


Рисунок 1. Функции принадлежности, предложенные для оценки НЕР каждого общего типа задачи (GTT), включенного в процедуру

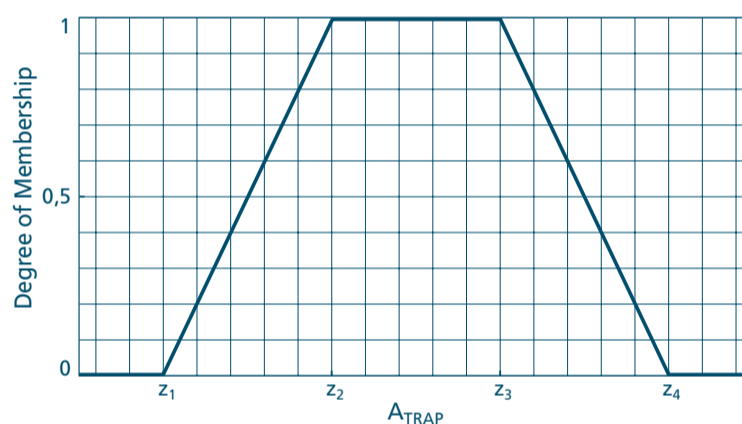


Рисунок 2. Пример общей трапециевидной функции принадлежности

от расширения самого домена. Трапециевидные MFS использовались, поскольку они являются наиболее распространенными функциями в приложениях надежности в соответствии с [10], [11]. Лингвистическая переменная была присвоена каждому MF каждого ОТЗ для того, чтобы интуитивно описать вероятность ошибки рассматриваемого ОТЗ.

Были разработаны шесть различных лингвистических переменных со значениями возрастающей вероятности, а именно: очень низкий, низкий, умеренный, средний, высокий, очень высокий. Наряду с минимальными и максимальными значениями ВЧО для каждого ОТЗ, RARA также предоставляет номинальное значение, которое в соответствии с оригинальной методикой является наиболее вероятным значением в пределах диапазона.

Чтобы также учесть информацию, предоставленную RARA, функция членства, которая включает номинальный ВЧО RARA, была разработана больше, чем другие, с большим количеством значений с максимальной степенью членства.

Второй шаг очень похож на первый. Целью фаззификации на этот раз является значение влияния А каждого. RARA оценивает влияние каждого УПВО с помощью мак-

симального влияния МВ и значения ОДВ, как в уравнении (1). Предлагаемый метод вводит лингвистические переменные вместо значения ОДВ для оценки уровня аффекта с меньшей субъективностью.

Затем, после оценки домена всех УПВО, учтенных RARA, были разработаны пять трапециевидных функций принадлежности в пределах каждого домена. Последовательно каждой MF, разработанной в этой работе, была присвоена лингвистическая переменная, которая быстро и легко описывает уровень воздействия, рассматриваемого УПВО.

Пять соответствующих лингвистических переменных следующие: очень низкий, низкий, умеренный, высокий, очень высокий.

Результаты предварительного этапа фаззификации УПВО показаны в таблице 3, где перечислены нечеткие наборы, разработанные для каждого УПВО. Определение каждого УПВО.

Для краткости в таблице 3 были использованы следующие обозначения для функции принадлежности трапеции: где взаимосвязь между математическими обозначениями и трапециевидной функцией принадлежности объясняется на рисунке 2. >>>

Таблица 3

Трапецевидные функции принадлежности, предложенные для оценки эффектов каждого УПВО, включенного в процедуру

Зона	Ссылки	Макс. Эффект	Очень Низкий	Низкий	Умеренный	Высокий	Очень высокий
Задача разработки	T1	17	(2.6, 2.6, 2.96, 5.84)	(2.96, 5.84, 6.56, 9.44)	(6.56, 9.44, 10.16, 13.04)	(10.16, 13.04, 13.76, 16.64)	(13.76, 16.64, 17, 17)
	T2	11	(2.2, 2.22, 5.4, 025)	(2.225, 4.025, 4.475, 6.275)	(4.475, 6.275, 6.725, 8.525)	(6.725, 8.525, 8.975, 10.78)	(8.975, 10.78, 11, 11)
	T3	8	(1.7, 1.7, 1.857, 3.117)	(1.857, 3.117, 3.432, 4.693)	(3.433, 4.692, 5.007, 6.267)	(5.007, 6.268, 6.582, 7.843)	(6.583, 7.843, 8, 8)
	T4	5.5	(1.45, 1.45, 1.55, 1.236)	(1.551, 2.361, 2.563, 3.374)	(2.564, 3.373, 3.576, 4.386)	(3.576, 4.387, 4.588, 5.399)	(4.589, 5.399, 5.5, 5.5)
	T5	3	(1.2, 1.2, 1.245, 1.605)	(1.245, 1.605, 1.695, 2.055)	(1.695, 2.055, 2.145, 2.505)	(2.145, 2.505, 2.595, 2.955)	(2.595, 2.955, 3, 3)
	T6	3	(1.2, 1.2, 1.245, 1.605)	(1.245, 1.605, 1.695, 2.055)	(1.695, 2.055, 2.145, 2.505)	(2.145, 2.505, 2.595, 2.955)	(2.595, 2.955, 3, 3)
	T7	2.5	(1.15, 1.15, 1.184, 1.454)	(1.184, 1.454, 1.521, 1.791)	(1.521, 1.791, 1.859, 2.129)	(1.859, 2.129, 2.196, 2.466)	(2.196, 2.466, 2.5, 2.5)
	T8	1.6	(1.06, 1.06, 1.074, 1.181)	(1.073, 1.181, 1.209, 1.317)	(1.209, 1.317, 1.344, 1.451)	(1.343, 1.452, 1.479, 1.587)	(1.479, 1.587, 1.6, 1.6)
	T9	1.4	(1.04, 1.04, 1.049, 1.121)	(1.049, 1.121, 1.139, 1.211)	(1.139, 1.211, 1.229, 1.301)	(1.229, 1.301, 1.319, 1.391)	(1.319, 1.391, 1.4, 1.4)
	T10	1.1	(1.005, 1.005, 1.006, 1.015)	(1.006, 1.015, 1.017, 1.026)	(1.017, 1.026, 1.029, 1.038)	(1.029, 1.038, 1.04, 1.049)	(1.04, 1.049, 1.05, 1.05)
Интерфейс	In1	10	(1.9, 1.9, 2.103, 3.722)	(2.102, 3.723, 4.127, 5.748)	(4.127, 5.747, 6.152, 7.772)	(6.152, 7.772, 8.178, 9.798)	(8.178, 9.79, 7.10, 10)
	In2	9	(1.8, 1.8, 1.98, 3.42)	(1.98, 3.42, 3.78, 5.22)	(3.78, 5.22, 5.58, 7.02)	(5.58, 7.02, 7.38, 8.82)	(7.38, 8.82, 9, 9)
	In3	8	(1.7, 1.7, 1.857, 3.117)	(1.857, 3.117, 3.432, 4.693)	(3.433, 4.692, 5.007, 6.267)	(5.007, 6.268, 6.582, 7.843)	(6.583, 7.843, 8, 8)
	In4	8	(1.7, 1.7, 1.857, 3.117)	(1.857, 3.117, 3.432, 4.693)	(3.433, 4.692, 5.007, 6.267)	(5.007, 6.268, 6.582, 7.843)	(6.583, 7.843, 8, 8)
	In5	8	(1.7, 1.7, 1.857, 3.117)	(1.857, 3.117, 3.432, 4.693)	(3.433, 4.692, 5.007, 6.267)	(5.007, 6.268, 6.582, 7.843)	(6.583, 7.843, 8, 8)
	In6	6	(1.5, 1.5, 1.613, 2.513)	(1.612, 2.513, 2.737, 3.638)	(2.737, 3.638, 3.862, 4.763)	(3.862, 4.763, 4.987, 5.888)	(4.987, 5.888, 6, 6)
	In7	4	(1.3, 1.3, 1.367, 1.908)	(1.368, 1.908, 2.042, 2.583)	(2.043, 2.583, 2.718, 3.258)	(2.718, 3.258, 3.393, 3.933)	(3.393, 3.933, 4, 4)
Управление компетенциями	C	9	(1.2, 1.2, 1.245, 1.605)	(1.245, 1.605, 1.695, 2.055)	(1.695, 2.055, 2.145, 2.505)	(2.145, 2.505, 2.595, 2.955)	(2.595, 2.955, 3, 3)
Процедуры	PR1	5	(1.4, 1.4, 1.49, 2.21)	(1.49, 2.21, 2.39, 3.11)	(2.39, 3.11, 3.29, 4.01)	(3.29, 4.01, 4.19, 4.91)	(4.19, 4.91, 5, 5)
	PR2	3	(1.2, 1.2, 1.245, 1.605)	(1.245, 1.605, 1.695, 2.055)	(1.695, 2.055, 2.145, 2.505)	(2.145, 2.505, 2.595, 2.955)	(2.595, 2.955, 3, 3)
Человек	P1	4	(1.3, 1.3, 1.367, 1.908)	(1.368, 1.908, 2.042, 2.583)	(2.043, 2.583, 2.718, 3.258)	(2.718, 3.258, 3.393, 3.933)	(3.393, 3.933, 4, 4)
	P2	2.6	(1.16, 1.16, 1.196, 1.484)	(1.196, 1.484, 1.556, 1.844)	(1.556, 1.844, 1.916, 2.204)	(1.916, 2.204, 2.276, 2.564)	(2.276, 2.564, 2.6, 2.6)
	P3	2	(1.1, 1.1, 1.123, 1.303)	(1.123, 1.303, 1.348, 1.528)	(1.347, 1.528, 1.573, 1.753)	(1.572, 1.752, 1.797, 1.978)	(1.797, 1.978, 2, 2)
	P4	1.8	(1.08, 1.08, 1.098, 1.242)	(1.098, 1.242, 1.278, 1.422)	(1.278, 1.422, 1.458, 1.602)	(1.458, 1.602, 1.638, 1.782)	(1.638, 1.782, 1.8, 1.8)
	P5	1.4	(1.04, 1.04, 1.049, 1.121)	(1.049, 1.121, 1.139, 1.211)	(1.139, 1.211, 1.229, 1.301)	(1.229, 1.301, 1.319, 1.391)	(1.319, 1.391, 1.4, 1.4)
	P6	1.2	(1.02, 1.02, 1.024, 1.06)	(1.024, 1.06, 1.069, 1.105)	(1.069, 1.105, 1.114, 1.15)	(1.115, 1.151, 1.159, 1.196)	(1.159, 1.196, 1.2, 1.2)
Окружающая среда	E	8	(1.7, 1.7, 1.857, 3.117)	(1.857, 3.117, 3.432, 4.693)	(3.433, 4.692, 5.007, 6.267)	(5.007, 6.268, 6.582, 7.843)	(6.583, 7.843, 8, 8)



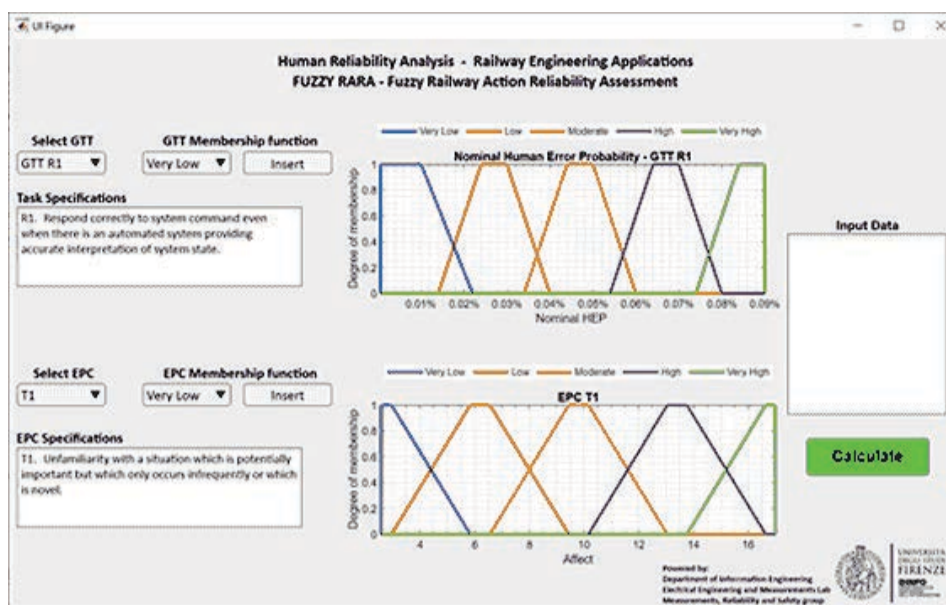


Рисунок 3. Графический пользовательский интерфейс MATLAB

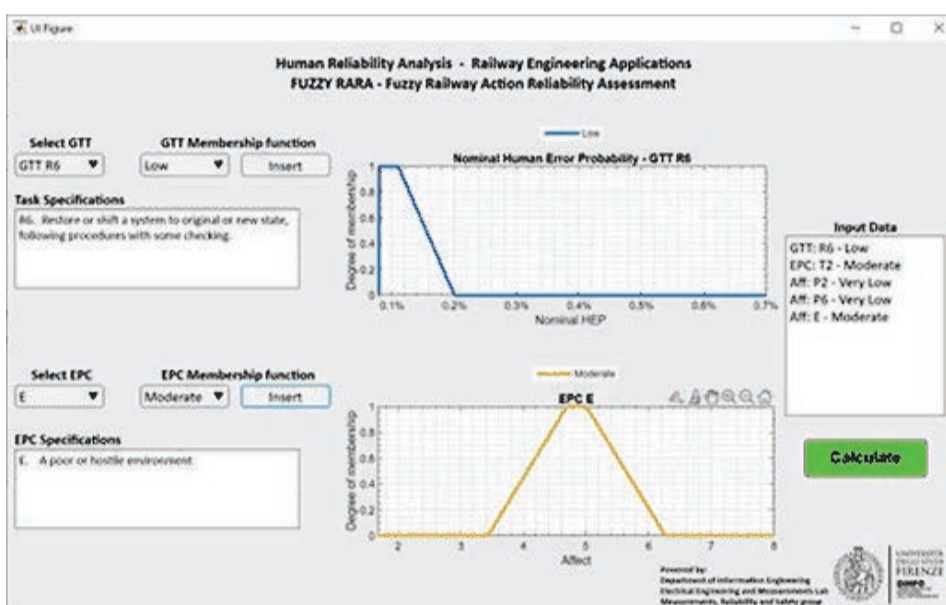


Рисунок 4. Скриншот инструмента MATLAB после выбора ОТЗ и УВПО

Два вышеописанных этапа являются предварительными этапами, выполняемыми только один раз. Нет необходимости повторять этапы фаззификации ОТЗ и УВПО каждый раз, когда вероятность человеческой ошибки оценивается с помощью предлагаемого метода. Поэтому был специально разработан подходящий инструмент с использованием MATLAB R2020b для автоматизации оценки с использованием предложенного метода. Скриншот графического пользовательского интерфейса представлен на рисунке 3.

Верхняя левая панель разработанного программного обеспечения позволяет выбрать общий тип задачи, который лучше описывает задачу, которую должен выполнить оператор. Затем панель также позволяет выбрать функцию членства, которая является оптимальным выбором (шаг 3) в соответствии с аналитиком, выполняющим оценку. Верхний рисунок в центре инструмента иллюстрирует функции принадлежности выбранной задачи.

Нижняя левая панель программного обеспечения позволяет выбрать EPC, которые влияют на производительность оператора. Это также позволяет выбрать функцию принадлежности, используя лингвистическую пе-

ременную, которая лучше описывает уровень влияния, выбранного УПВО (шаг 4).

Нижний рисунок в центре инструмента иллюстрирует функцию принадлежности выбранной задачи в соответствующем домене  $D_{УПВО_j}$ .

Шаг 4 можно повторить несколько раз, выбирая разные УПВО. Правая панель в разработанном инструменте возобновляет выбранную задачу и выбранный УПВО с их относительными функциями членства.

На рисунке 4 показано диалоговое окно ввода данных разработанного программного обеспечения после выбора ОТЗ и всех УПВО. Верхний подзаголовок на центральной панели инструмента иллюстрирует выбранную функцию принадлежности соответствующего ОТЗ (в данном случае задача R6, функция принадлежности 'Низкая').

Нижний подзаголовок показывает последний выбранный УПВО, в то время как полный список УПВО отображается на правой панели.

Следующий шаг (шаг 5) состоит в оценке нечеткой вероятности человеческой ошибки ВЧО с помощью нечеткой арифметики. Выбор нечеткого умножения, несмотря на методы, основанные на правилах, был сделан из-за его простоты и легкости реализации. >>>

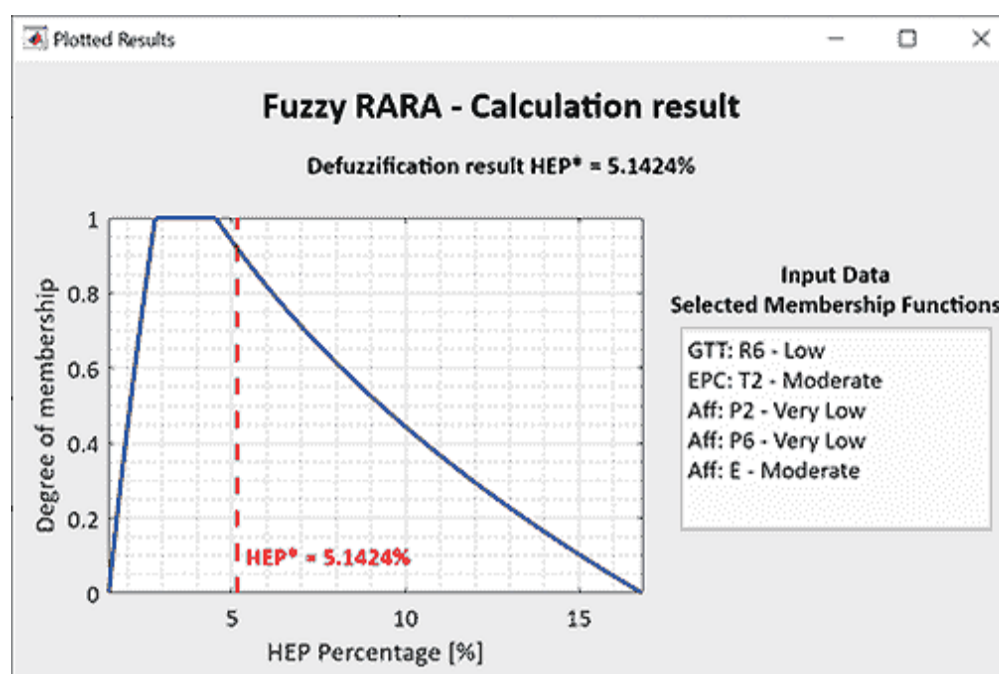


Рисунок 5. Окно вывода, разработанного графического пользовательского интерфейса MATLAB

Для выполнения нечетких арифметических операций была принята во внимание теория  $\alpha$ -разреза. Любое нечеткое множество может быть описано путем указания его  $\alpha$ -разреза. Более подробно, нечеткое множество может быть получено как верхняя огибающая его  $\alpha$ -разреза, где  $\alpha$ -разрез нечеткого множества  $X$  является четким множеством  $X_\alpha$ , которое содержит все элементы в домене, которые имеют степень принадлежности, большую или равную  $\alpha$ .

Вышеупомянутая теория нечеткого умножения была использована для оценки нечеткой вероятности человеческой ошибки ВЧО<sub>g</sub> (Шаг 5). В частности, последнее задается произведением нечеткой функции принадлежности выбранной задачи ВЧО<sub>bi</sub> (выбирается на этапе 3) с общим весовым коэффициентом  $W$ .

Весовой коэффициент  $W$  представляет собой нечеткий набор, который фактически учитывает каждое влияние  $Ae_j$ , выбранное на шаге 4.

Наконец, шаг 6 состоит в дефаззификации полученной нечеткой вероятности человеческой ошибки с использованием метода центраида.

Начиная с нечеткого числа и соответствующей ему функции принадлежности, процедура дефаззификации представляет собой процесс генерации четкого логического значения, связанного с исходным нечетким значением. Дефаззификация центраида является одним из наиболее часто применяемых методов дефаззификации в инженерии надежности в соответствии с [10]. Он возвращает ВЧО\*, который является центром тяжести нечеткого числа, описываемого функцией принадлежности  $\mu_{ВЧО}(z)$ .

Разработанный инструмент автоматически реализует шаг 5 и шаг 6 после выбора базового ВЧО и значения влияния соответствующих УПВО. Окно вывода разработанного инструмента проиллюстрировано на рисунке 5, где как нечеткая вероятность человеческой ошибки показаны ВЧО и дефаззифицированный ВЧО<sub>g</sub>\*.

## Выводы

Разработанное программное обеспечение позволяет легко и быстро реализовать предложенный нечеткий подход. Аналитик может выполнить оценку ВЧО, выполнив всего несколько простых шагов без необходимости иметь дело с численными оценками.

Лингвистические переменные, используемые в инструменте, позволяют легко проводить оценку способом, более подходящим для человеческого мышления, уменьшая субъективность и возможность ошибки во время оценки. Кроме того, эта процедура позволяет легко моделировать различные сценарии для рассматриваемой задачи, легко и быстро изменяя функции принадлежности выбранных УПВО или просто вводя или удаляя один или несколько УПВО. Программное обеспечение предоставляет нечеткий ВЧО и результат дефаззификации, а также примечание с выбранными функциями принадлежности, используемыми для оценки ВЧО. ■

## Список литературы

1. F. De Felice and A. Petrillo, *Human Factors and Reliability Engineering for Safety and Security in Critical Infrastructures: Decision Making, Theory, and Practice*. Cham, Switzerland: Springer-Verlag, 2018.
2. S. Qiu, M. Sallak, W. Schön, and Z. Cherfi-Boulanger, "Evaluation of human error probabilities based on classical HRA models: An application to railway systems," in *Proc. Qualita*, Nancy, France, Mar. 2015, pp. 1–9.
3. UIC Safety Report 2020. Significant Accident 2019 Public Report, UIC Saf.f Unit, Paris, France, 2020.
4. Стандарт ОАО РЖД № СТО РЖД 02.039-2011 от 21.09.2011 г. № 2068р [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://jd-doc.ru/2011/sentyabr-2011/5254-standart-oao-rzhd-n-sto-rzhd-02-039-2011-ot-21-09-2011-g-n-2068r>.
5. H. Gibson, "Railway action reliability assessment user manual—A technique for the quantification of human error in the rail industry," Rail Saf. Standards Board, London, U.K., Tech. Rep. T270 Manual, 2012, pp. 1–96.
6. J. Park, W. Jung, and J. Kim, "Inter-relationships between performance shaping factors for human reliability analysis of nuclear power plants," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 52, no. 1, pp. 87–100, Jan. 2020.
7. M. Grozdanovic, "Usage of human reliability quantification methods," *Int. J. Occupat. Saf. Ergonom.*, vol. 11, no. 2, pp. 153–159, Jan. 2005.
8. J. Wreathall, D. Bley, E. Roth, J. Multer, and T. Raslear, "Using an integrated process of data and modeling in HRA," *Rel. Eng. Syst. Saf.*, vol. 83, no. 2, pp. 221–228, Feb. 2004.
9. W. H. Gibson, M. W. Halliday, L. Sutton, J. Shelton, and M. Bond, "A train driving simulator experiment to investigate driver fault diagnosis," in *People and Rail Systems: Human Factors at the Heart of the Railway*, J. R. Wilson, B. Norris, T. Clarke, and A. Mills, Eds. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007.
10. S. Kabir and Y. Papadopoulos, "A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering," *Int. J. Approx. Reasoning*, vol. 100, pp. 29–55, Sep. 2018.
11. K.-Y. Cai, *Introduction to Fuzzy Reliability*. Norwell, MA, USA: Kluwer, 1996.

УДК: 528.9; 004.94

# Применение геоинформационной перколяции для исследования транспортного трафика

## The use of geoinformation percolation for the study of transport traffic

**Буравцев А.В.**, Заместитель начальника Управления, ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»,  
E-mail: mister\_j@mail.ru, Москва, Россия

**Buravtsev A.V.**, Deputy Head of Department, FSBI "Center for Geodesy, Cartography and SDI",  
E-mail: mister\_j@mail.ru, Moscow, Russia

### Аннотация

Исследуется применение геоинформационной перколяции, которая описывает лавинообразные процессы в дискретных сферах. Геоинформационная перколяция есть пространственная перколяция, которая может быть описана средствами геоинформатики, и проявляется в транспортном трафике мегаполиса – её результатом являются пробки и задержки движения. Выявление факторов перколяции позволяет прогнозировать и предотвращать возникновение пробок. Описан механизм перколяции применительно к транспортным потокам, даны примеры перколяции, для транспортного трафика вводятся понятия «перколяция 1» и «перколяция 2».

**Ключевые слова:** транспорт, транспортные потоки, перколяция, геоинформационная перколяция, занятые узлы, перколяционный кластер, информационная ситуация.

### Abstract

The application of geoinformation percolation, which describes avalanche-like processes in discrete spheres, is investigated. Geoinformation percolation is a spatial percolation, which can be described by means of geoinformatics, and manifests itself in the transport traffic of a metropolis – its result is traffic jams and traffic delays. Identification of percolation factors makes it possible to predict and prevent the occurrence of traffic jams. The mechanism of percolation in relation to transport streams is described, examples of percolation are given, for transport traffic the concepts of "percolation 1" and "percolation 2" are introduced.

**Keywords:** transport, traffic flows, percolation, geoinformation percolation, busy nodes, percolation cluster, information situatio.



## Введение

Теория перколяции является междисциплинарной теорией, как синергетика. Ее применяют при исследовании структур сложных систем. Ее применяют в математике [1, 2], физике [3], в исследовании Интернет [4], при исследовании компьютерных вирусов в сетях [5], Теория перколяции моделирует лавиноподобные эффекты. Ее применяют также в науках о земле [6], что дает основание говорить о геоинформационной перколяции. Теорию перколяции применяют для исследования сетевых структур и процессов в сетевых структурах [7].

Термин «геоинформационная перколяция» является новым. «Геоинформационная перколяция» описывает пространственный лавинообразный процесс, описываемый и исследуемый методами геоинформатики. Он относится к пространственным сетям, которые существуют в пространстве и изучают в геоинформатике и на транспорте. Основой изучения таких сетей является модель информационной ситуации. Термин транспортный трафик используется для того, чтобы подчеркнуть отличие от трафика коммуникационных сетей. Первоначально термин «трафик» возник в области транспорта [8], но затем его интенсивно стали применять в коммуникационных системах и информационно вычислительных сетях [9]. Этим термином обозначали информационно коммуникационные процессы в информационном поле [10] и информационные потоки. Транспортный трафик связан с материальными потоками. Наибольшие проблемы этот трафик имеет в мегаполисе, меньшие в сфере железнодорожного транспорта. В основном это пробки, заторы, аварии, то есть все, что вызывает нарушение штатного графика движения. Эти проблемы актуальны и их исследование представляет интерес для сферы транспорта.

## Элементы теории перколяции

Перколяция (percolation) интерпретируется процессуально как протекание, реже как просачивание. Применение теории перколяции описано широко. Однако, несмотря на это, многие практические результаты получено на основе численного моделирования. То есть эта теория близка к численным и эвристическим методам, а также к методам мета эвристики [11].

В теории перколяции существуют две основные задачи для узлов и для связей сети. Сети могут иметь регулярную или не регулярную структуру. Дискретный транспортный поток [12, 13] также можно рассматривать как поток в сети. Теория перколяции также интерпретируют как модель, отображающую фазовый переход. Применение теории перколяции облегчает понимание развития многих физических систем. В частности, концепция фракталов, которая тесно связана с проблемой теории перколяции, интерпретируется методами теории перколяции.

С информационных позиций исходное и последующие состояния в теории перколяции можно рассматривать как информационную ситуацию [13]. Это позволяет подключать при необходимости методы информационного моделирования [15]. Исходной посылкой является

то, что задается состояние занятости узла и соответствующая ему вероятность ( $p$ ). В общепринятой теории перколяции в ее исходных положениях это состояние занятости. Оппозицией занятости является состояние свободы узла. Тем не менее, можно считать исходное состояние свободным. Это имеет прямое отношение к трафику транспорта. Эта дискретная структура или матрица свободных узлов приведена на рис.1. Свободный узел обозначен символом 0.

0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0
0	0	0	0

Рисунок 1. Исходное состояние свободных узлов, предшествующее перколяции

Соответственно, вероятность того, что узел будет свободным, равна  $(1 - p)$ . В исходной информационной ситуации все узлы считаются свободно независимыми, то есть состояние одного узла не влияет на занятость других.

При воздействии внешней среды в матрице (рис.1) начинают добавляться «проводящие элементы», однако поначалу их недостаточно для перколяции. Следует отметить, что с точки зрения просачивания (классической теории перколяции) эти элементы являются проводящими. С точки зрения трафика (или геоинформационной перколяции) эти элементы являются тормозящими. На рис.1 и последующих 0 обозначает свободный узел, а 1 занятый узел. На рисунке 2 показано появление занятых узлов.

0	0	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1
1	0	0	0
0	0	0	0

Рисунок 2. Изменение состояния дискретной структуры, предпосылки перколяции

По мере увеличения числа проводящих (занятых) узлов наступает такой критический момент, когда происходит перколяция, как показано ниже.

0	0	0	0
0	0	1	0
1	1	1	1
1	1	0	0
0	0	0	0

Рисунок 3. Появление перколяции

Видно, что от левой к правой границе последней дискретной структуры имеется цепочка элементов, которая обеспечивает протекание материального потока по проводящим узлам (единицам), непрерывно >>>

следующим друг за другом. По сути дела, эти элементы перекрывают матрицу. Это и есть явление перколяции. Перколяция может наблюдаться как в решётках и дискретных структурах. Соответствующие математические модели называются решёточными.

Если рассматривать примеры на рис.1–3 как пористую среду, то они показывают просачивание и прохождение жидкости (единицы в ячейках) через объёмный пористый образец, пока не обрадуется канал (рис.3). Канал представляет собой кластер. Два занятых узла считаются принадлежащими к одному кластеру, если они соединены цепочкой соседних занятых узлов. При увеличении значения параметра (p) все большее количество узлов будут заняты, что влечет появление кластеров большего размера.

При исследовании перколяционных процессов используют два подхода описательный (модельный) и сравнительный (аналоговый). Описательный подход использует теорию вероятностей и теорию графов. Он использует формальные описания и логические доказательства. Сравнительный подход использует методы аналогий. Теория перколяции решает две задачи для узлов и для связей сети. То есть можно рассматривать структуру узлов или структуру связей. Сети могут иметь регулярную или не регулярную структуру, включая случайную. Эта теория позволяет определить долю связей, которая приводит к распадению сети на несвязанные части или кластеры. В ней существует понятие заблокированных узлов.

Для задачи узлов доля заблокированных узлов или для задачи связей доля связей, при которых исчезает проводимость между двумя произвольно выбранными узлами сети в целом, называется порогом перколяции (протекания).

### Применение теории перколяции для анализа транспортного трафика

При анализе транспортного трафика условия перколяции меняются на противоположные. Свободный узел означает возможность свободного движения. Рис.1 можно рассматривать как полосу четырех полосного движения. Каждый квадрат есть участок свободного движения. Однако для транспорта необходимо вводит два типа перколяции. Перколяция 2 это аналог ситуации на рис.3. Она означает полное прерывание движения сторонним потоком. Перколяция 1 не имеет аналогов в физической или сетевой перколяции. Она означает существенное торможение движения, но приводящее к нарушению графика движения. На рис.4 показано свободное движение по шоссе с четырьмя полосами без замедления и пробок.

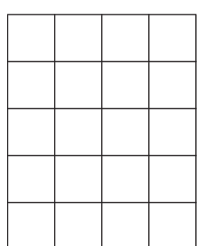


Рисунок 4. Исходное состояние свободного движения

Прямоугольники означают некую дистанцию и пространство перемещения, на которой находится транспортное средство. Сверху вниз это габариты и тормозной путь. Влево вправо это возможность маневра.

Введем обозначения. Светлый прямоугольник означает свободное движение или свободный узел сети. Заштрихованный прямоугольник означает замедленное (нештатное) движение. Черный прямоугольник означает прерывание движения. Совокупность перекрывающихся узлов создает кластер, влияющий на движение. На рис.4 кластеров нет. На рис.5 имеется кластер, существенно тормозящий движение.

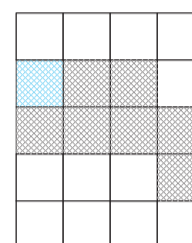


Рисунок 5. Перколяция 1 – замедленное движение

Информационная пространственная ситуация на рис.5 характеризует движение, но с резким замедлением. Имеет место кластер, объезд которого невозможен. Например, небольшое наводнение поперек дороги и движение на этом участке происходит с меньшей скоростью. Имеется ситуация перколяции, которая отличается от ситуации полной остановки. Поэтому такую ситуацию называют перколяцией 1. Возможен второй вариант перколяции, когда движение полностью остановлено. На рис.6 показан пространственный кластер, прерывающий движение. Он соответствует либо пробке, либо повреждению дороги (сель, землетрясение).

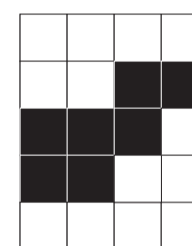


Рисунок 6. Перколяция 2 – прерывание движения

Связанные узлы на рис.5 и рис.6 препятствуют нормальному движению. Их называют перколяционными кластерами. Кластер образуется не сразу. Первоначально появляются заблокированные узлы (рис.2) Использование показателя «доля заблокированных узлов» и тенденция их развития дают возможность оценить появление перколяционного кластера.

Совокупность элементов, по которым происходит протекание в теории перколяции и торможение в теории транспортного трафика, называется перколяционным кластером. Структурно он является связным случайным графом, и может иметь различную форму. Например, столкновение нескольких автомобилей на трассе может иметь разную конфигурацию. Если это столкновение перекрывает все полосы движения, то возникает перколяция 2. Перколяция и перколяционный кластер возникают только при отсутствии свободной полосы движения (все узлы поперек полосы заняты). Поэтому принято >>>



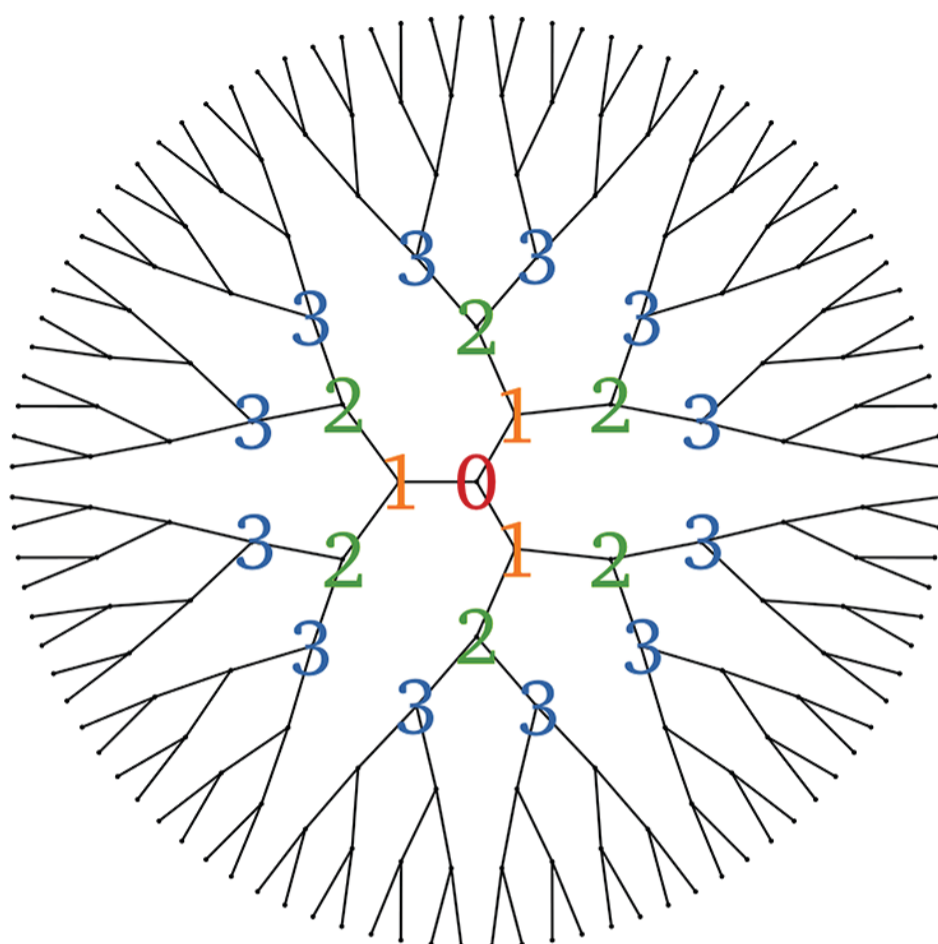


Рисунок 8. Решетка Бете с координационным числом  $z = 3$

характеризовать его общий размер кластера. Порогом перколяции называется минимальная концентрация заблокированных узлов, при которой возникает пробка. Пробка – это физический объект.

Появление перколяционного кластера связана с другим показателем «порог перколяции». Это аналитический объект, имеющий физическую реализацию. Величина порога перколяции определяет вероятность аномального движения в транспортной сети. Она определяется, если задана средняя вероятность блокирования узла. Характер перехода через порог перколяции зависит от размера сети.

На рис.7 приведена типовая зависимость [13–17] вероятности возникновения порога перколяции ( $P$ ) от доли заблокированных узлов ( $E$ ). Для конечной сети она имеет вид сигмоиды. Сигмоида (рис.7) соответствует сети конечного размера, а ступенчатый график соответствует бесконечной сети.

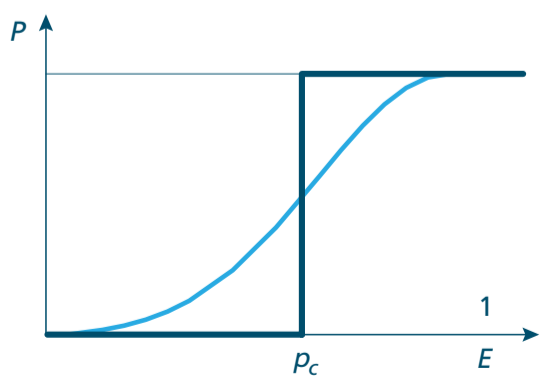


Рисунок 7. Зависимость вероятности возникновения порога перколяции от доли заблокированных узлов

Процесс перколяции является саморазвивающейся системой [18]. Однако при этом существуют и внешние факторы, которые способствуют перколяции. Например, сильный ветер, мокрое покрытие дороги – способствуют столкновению транспортных средств и развитию перколяции. Перколяция происходит как стохастический процесс. Случайный характер ее развития не позволяет говорить об определенных размерах или определенной конфигурации критического кластера. Можно говорить о критической области заблокированных узлов, в которой возникает порога перколяции. Например, если рассмотреть четырехполосное движение рис.4, то перколяция возникает только при авариях на всех четырех полосах. При одностороннем движении достаточно столкновение двух автомобилей, которые перекрывают движение по полосе. Следовательно, чем больше полос движения, тем меньше вероятность возникновения перколяции.

Для бесконечных систем  $p_c$  равно некоторому фиксированному значению – при всех  $p < p_c$ , стягивающий кластер в системе отсутствует, при  $p > p_c$  он всегда присутствует. Однако аналитический расчет критической концентрации возможен только для ограниченного числа конфигураций решеток. Например, в одномерном случае (решетка представляет собой бесконечную цепочку узлов)  $p_c = 1$ , для структуры, называемой решеткой Бете (регулярное дерево) [19]  $p_c = 1/(z-1)$ , где  $z$  – координационное число (рис.8).

В статистической механике решетка Бете представляет собой бесконечный связный граф без циклов, в котором все вершины имеют одинаковое количество >>>

соседей. Решетка Бете была введена в физическую литературу Гансом Бете в 1935 году. В таком графе каждый узел соединен с  $z$  соседями; число  $z$  называется либо координационным числом, либо степенью, в зависимости от поля.

Из-за своей отличительной топологической структуры статистическую механику решетчатых моделей на этом графе часто легче решить, чем на других решетках. Решения связаны с часто используемым приближением Бете для этих систем. В остальных случаях возможен численный расчет на основе имитационного моделирования на больших дискретных структурах.

В критической точке  $p = p_c$  многие важные характеристики кластера: корреляционная длина (длина вдоль трассы), средний размер кластера (условная площадь), мощность стягивающего кластера (количество заблокированных узлов) являются сингулярными. В околукритической области они управляются степенными законами вида  $(p - p_c)^x$ . В качестве показателя степени  $x$  выступают критические индексы. Они зависят только от типа перколяционной модели и размерности пространства и не зависят от геометрии решетки.

При решении задачи связей или задачи узлов важно изучить процессы образования напрямую связанных физических кластеров заблокированных узлов или связей любого размера и определить количественные характеристики для зависимости вероятности их образования от топологии сети (например, от ее плотности, т.е. среднего числа связей в расчете на один узел) и вероятности блокирования ее единичных узлов.

Перколяция невозможная на независимых событиях. Два события  $A_1$  и  $A_2$  независимы если их совместная вероятность равна их произведению.

$$P(A_1, A_2) = P(A_1) \cdot P(A_2).$$

Для возникновения перколяции должна действовать формула Байеса:

$$P(A|B) = [P(B|A) \cdot P(A)] / P(B),$$

где  $P(A)$  – априорная вероятность гипотезы  $A$ .  $P(A|B)$  – вероятность гипотезы  $A$  при наступлении события  $B$  (апостериорная вероятность);  $P(B|A)$  – вероятность наступления события  $B$  при истинности гипотезы  $A$ ;  $P(B)$  – полная вероятность наступления события  $B$ .

Это приводит к необходимости определения вероятностей на каждом узле и применения теории массового обслуживания.

Сложность вычислений вероятностей заключается в том, что суммирование предполагает знание всех возможных конфигураций и периметров. Тем не менее известны некоторые асимптотические результаты для очень больших кластеров ряда регулярных структур [15, 17, 20].

Порог протекания (перколяции) равен значению  $C_i$  (для одного узла), при достижении которого все связи, приходящиеся на данный узел, теряют свою работоспособность (выключаются из передачи данных по тем или иным причинам). При малых  $C_i$  перегруженные узлы в основном изолированы. С ростом  $C_i$  появляются кластеры большого числа групп.

Перколяционные кластеры самоподобны, независимо от масштаба. Они инвариантны при изменении масштабов и сохраняют соразмерности [21, 22], что, по сути, является характеристикой симметрии свойств. Критическое значение  $C_t$ , при котором это происходит, определяет порог перколяции. С позиции маршрутизации трафика интерес представляют два предельных случая. Первый – это образование кластеров малых размеров. При этом начинается блокировка транспортной сети, которая приводит к потере ее работоспособности. Второй, когда достигается порог перколяции, т.е. сеть заблокирована.

Геоинформационная перколяция на транспорте отличается от классической перколяции в сетях и в твердых телах. В сетях и стохастическом пространстве примером является образование фракталов как нечто существенное. Геоинформационная перколяция на транспорте чаще имеет негативную характеристику. Например, если в реальном пространстве автомобиль терпит аварию, то это означает появление занятого узла. Цепь транспортных средств в пространстве, потерпевших аварию и связанных между собой, образует кластер. Если этот кластер перекрывает движение, то это геоинформационный перколяционный кластер. Такой же кластер образуется при сходе селя или оползня на трассу. Он имеет конкретные пространственные характеристики и описывается геоданными [23, 24]. Описание перколяционного кластера геоданными отличительная особенность геоинформационной перколяции.

## Заключение

Процесс перколяции не возникает сам по себе. Он происходит при существовании информационных отношений [25] и информационных взаимодействий [26, 27]. Отношения предшествуют взаимодействиям. Развитие перколяции основано на информационных отношениях, которые можно смоделировать, и, самое важное, можно по ним сделать прогноз развития. С помощью методов теории перколяции может быть решена задача по исследованию влияния среднего числа связей, приходящегося на один узел сети и появление в ней порога перколяции и образование кластеров заблокированных узлов любого размера.

Для транспортного трафика важны узлы малых размеров. При этом, если в классической теории перколяции просачивание играет позитивную роль, то в геоинформационной перколяции применительно к транспорту просачивание играет диссипативную, негативную роль. Прогнозируя нагрузку и время достижения критических значений параметров работы транспортной сети, можно заранее рассчитать модели блокировки узлов. Это позволяет оценить, например, вероятность пробок в мегаполисе по его сетевой структуре. Пока решение задач перколяции. Особенно для мегаполиса осуществляется на основе накопленного опыта. Поэтому данное направление требует дальнейших исследований. ■



## Список литературы

1. Duminil-Copin H. Sixty years of percolation // Proceedings of the International Congress of Mathematicians: Rio de Janeiro 2018. – 2018. – С. 2829-2856.
2. Basu R., Hoffman C., Sly A. Nonexistence of bigeodesics in planar exponential last passage percolation // Communications in Mathematical Physics. – 2022. – Т. 389. – №. 1. – С. 1-30.
3. Zhou A., Maleti S., Zhao Y. Robustness and percolation of holes in complex networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – Volume 502. – 15 July 2018. – P. 459-468.
4. Bagnoli F. et al. Percolation and internet science // Future Internet. – 2019. – Т. 11. – №. 2. – С. 35.
5. Shang Y. Modeling epidemic spread with awareness and heterogeneous transmission rates in networks // Journal of Biological Physics. – 2013. – № 39(3). – P. 489–500.
6. Fischer G., Papathanassiou K. P., Hajnsek I. Modeling multifrequency Pol-InSAR data from the percolation zone of the Greenland Ice Sheet // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2018. – Т. 57. – №. 4. – С. 1963-1976.
7. Li M. et al. Percolation on complex networks: Theory and application // Physics Reports. – 2021. – Т. 907. – С. 1-68.
8. Greenshields B. D. et al. A study of traffic capacity // Highway research board proceedings. – National Research Council (USA), Highway Research Board, 1935. – Т. 1935.
9. Татарникова Т. М. Статистические методы исследования сетевого трафика // Информационно-управляющие системы. – 2018. – №. 5 (96). – С. 35-43.
10. Tsvetkov V. Ya. Information Space, Information Field, Information Environment // European researcher. 2014. № 8-1(80). p.1416-1422.
11. Abd Elaziz M. et al. Advanced metaheuristic techniques for mechanical design problems // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2022. – Т. 29. – №. 1. – С. 695-716.
12. Цветков В.Я., Дешко И.П. Дискретные пространственные структуры // Славянский форум. 2022, 2(36). С. 153-162.
13. Козлов А.В. Применение методов геоинформатики для исследования дискретных потоков // Вектор ГеоНаук. 2022. Т. 5. № 2. С. 45-52.
14. Цветков В. Я. Ситуационное моделирование в геоинформатике // Информационные технологии. – 2014. – №6. – с.64-69.
12. Максудова Л.Г., Цветков В.Я. Информационное моделирование как фундаментальный метод познания // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2001. – №1. – с.102-106.
13. Christensen K. Percolation theory // Imperial College London. – 2002. – 40p.
14. Lee D. et al. Recent advances of percolation theory in complex networks // Journal of the Korean Physical Society. – 2018. – Т. 73. – №. 2. – С. 152-164.
15. Sahimi M. Applications of Percolation Theory. – London : Tailor & Francis, 1992.
16. Shante V.K.S., Kirkpatrick S. An Introduction to Percolation Theory // Advances in Physics. – 1971. – Т. 85, XX. – P. 325–357.
17. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы. – М. : Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
18. Цветков В.Я. Теория систем. – М.: МАКС Пресс, 2018. – 88 с.
19. Bethe H. A. Statistical theory of superlattices // Proceedings of the Royal Society of London. Series A-Mathematical and Physical Sciences. – 1935. – Т. 150. – №. 871. – С. 552-575.
20. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. – London : Tailor&Francis, 1992.
21. Цветков В.Я. Соразмерность как качественное и когнитивное отношение // Славянский форум. 2021, 2(32). С.244–250.
22. Раев В.К. Соразмерность в информационном поле // Славянский форум. 2021, 3(33). С. 105-114.
23. Кудж А.С. Сбор и измерение геоданных в науках о Земле // Славянский форум. – 2013. – 2(4). – с.135-139.
24. Коваленко Н.И. Пространственные рассуждения с применением геоданных // Славянский форум. –2020. – 4(30). –с. 273-283.
25. Tsvetkov V. Ya. Information Relations // Modeling of Artificial Intelligence. 2015. № 4(8). – p.252-260.
26. Tsvetkov V. Ya. Information interaction // European researcher. 2013. № 11-1 (62). С. 2573-2577.
27. Кудж С.А. Информационное взаимодействие и его атрибуты // Славянский форум. – 2017. -4(18). – С.27-33.

УДК: 528.02; 528.06

# Пространственный мониторинг транспортной инфраструктуры

## Spatial monitoring of transport infrastructure

**Ознамец В.В.**, д.т.н., доцент, зав. кафедрой, Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК), E-mail: voznam@bk.ru, Москва, Россия

**Oznamets V.V.**, D.ofSci(Tech.), Assoc. Professor, Head of the chair, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAiK), E-mail: voznam@bk.ru, Moscow, Russia

### Аннотация



В статье в форме литературного обзора исследуется пространственный мониторинг транспортной инфраструктуры как обобщенный мониторинг, включающий разные типы. Описан структурный и функциональный пространственный мониторинг. Дана систематика геоданных, применяемых в пространственном мониторинге. Описаны геоданные состояния объекта транспортной инфраструктуры, геоданные ситуации, габаритные геоданные. Описано применение пространственного мониторинга при решении современных задач транспорта и инфраструктуры. Показано, что пространственный мониторинг обеспечивает устойчивость функционирования транспортной инфраструктуры. Описаны проблемы дальнейшего развития этого направления.

**Ключевые слова:** транспорт, транспортная инфраструктура, пространственный мониторинг, структурный мониторинг, функциональный мониторинг.

### Abstract

In the article, in the form of a literature review, the spatial monitoring of transport infrastructure is studied as a generalized monitoring, including different types. There are two main directions of transport monitoring: space monitoring of transport and geotechnical monitoring of transport. Each of the directions has its own specifics and complements the other direction. The structure and content of transport monitoring is disclosed. A systematic analysis of monitoring is given. The article describes the structure and content of transport monitoring. The content of space monitoring of transport is described. The content and geotechnical monitoring of transport are revealed. The difference between both geotechnical monitoring and geotechnical monitoring of transport is shown. It is shown, that the digital transformation of society is causing a change in transport monitoring.

**Keywords:** transport, transport infrastructure, spatial monitoring, structural monitoring, functional monitoring.



## Введение

Для управления транспортной инфраструктурой необходима информационная поддержка, включающая пространственную информацию. Пространственный мониторинг выполняет функции информационной и управленческой поддержки. Пространственный мониторинг является обобщенным понятием, включающим разные виды мониторинга. Можно выделить несколько аспектов его рассмотрения: по отношению к поверхности Земли, по научным направлениям, по объектам мониторинга, по масштабам, по методам мониторинга, по типам мониторинга. По отношению к поверхности Земли выделяют подземный [1], наземный [2], воздушный [3] и космический мониторинг [4-7]. Обобщением многих видов наземного мониторинга является геомониторинг [8, 9]. По научным направлениям разделяют геодезический мониторинг [10], геоинформационный мониторинг [11, 12], экологический мониторинг [13], мониторинг в кадастре, геотехнический мониторинг [14, 15], мониторинг транспорта [16] и др.

По масштабам мониторинга разделяют: локальный мониторинг [14], региональный мониторинг [18], национальный мониторинг [19], глобальный мониторинг [20]. По объектам мониторинга разделяют: мониторинг подвижных объектов [21], мониторинг стационарных объектов [22], мониторинг ситуаций [23- 25], (например, пожароопасных ситуации), мониторинг процессов [26], и так далее. В последнее время развивается бизнес геодезия [27] и геосервис. Многие виды пространственного мониторинга применяют как геосервис [28, 29]. Общий вывод пространственный мониторинг многообразен и его нельзя сводит к одному виду мониторинга.

## Моделирование в пространственном мониторинге

Пространственный мониторинг (ПМ) имеет много типов. ПМ характеризуется общими и частными признаками. На основе общих признаков можно дать определение ПМ. Пространственный мониторинг – это мониторинг контроля объектов, для которого основой данных является пространственно -временная информация и для которого основой анализа является пространственное моделирование, информационное моделирование и пространственная логика.

Таким образом, общими признаками ПМ являются: пространственная первичная информация, пространственное моделирование, информационное моделирование и пространственная логика.

Пространственная первичная информация собирается с помощью разных информационно- измерительных систем [30] и разных технологий. Поэтому основной задачей является интеграция этой информации в единую информационную среду.

Информационное моделирование рассматривают как фундаментальный метод познания [31, 32], поэтому

оно служит отправной точкой для пространственного моделирования. Информационное моделирование выполняют в пространстве параметров. Оно служит основой и дополняет пространственное моделирование.

Пространственное моделирование [33] выполняют в реальном пространстве или для реального пространства. Оно характеризуется геометрическими и топологическими факторами. Часто с его помощью выполняют пространственное моделирование и конструирование [34]. Во многих случаях основой пространственного моделирования является геоинформационное моделирование [35, 36].

Пространственная логика [37] включает обычную логику и пространственные рассуждения. Она служит для контроля и для организации системы правил управления движением.

Моделирование является основным информационных процессом в ПМ. Оно использует разные модели: модели представления (репрезентационные); модели информационных конструкций, модели коммуникаций; модели процессов, модели ситуаций; модели взаимодействий; обобщающие метамоделю, модели информационных единиц и другие.

При геоинформационном моделировании используют геоинформационные системы. Поэтому пространственные и информационные модели должны отвечать требованиям интерфейса ГИС. Второй их качество состоит в том, что они должны объединять и интегрировать разнообразные данные в интегрированную информационную основу [38].

Основой методического обеспечения ПМ является методическое обеспечение геоинформационного мониторинга. Среди разных видов моделирования в ПМ значение имеет цифровое моделирование [39-41]. Оно является основой построения трехмерных объектов. В последнее время расширяется применение моделирования на основе мобильного лазерного сканирования.

В техническом плане развивается моделирование с использованием БПЛА. Для задач управления и прогнозирования значение имеет ситуационное моделирование [42, 43].

В ПМ широко применяют эвристические методы [44]. в частности, интерактивное моделирование при помощи ГИС. Как дополнение интерактивного моделирования применяют методы обработки изображений и визуальное моделирование. В этом направлении развивается применение виртуальной реальности, дополненной реальности и смешанной реальности. При обучении или переподготовке специалистов применяют иммерсивные среды и технологии. Это также основано на пространственном моделировании.

Визуальное моделирование требует применение когнитивного анализа. Это обуславливает применение в ПМ методов когнитивного моделирования [45]. Накопление опыта в ПМ требует обобщения и написания теорий. Эти функции выполняет метамоделювание [46, 47].



## Интегрированная основа ПМ

Пространственная первичная информация ПМ разнообразна. На стадии сбора первоочередной задачей является интеграция пространственных данных в единую информационную систему данных. Такими системам являются интегрированная информационная основа и геоданные.

Основой интеграции пространственных данных являются геоданные. Интегрированная информационная основа является аналогом базы данных. Она предназначена для хранения и дескриптивного описания. Геоданные выполняют процессуальные функции. Именно с их помощью производят расчеты и оценки. Модель геоданных выполняет селективную и интегрированную функции. Селекция заключается в том, что огромная разнородная масса данных группируется в три группы: «метрические данные», «временные данные», «прочие тематические данные». Такая селекция упрощает обработку, поскольку эти группы по-разному обрабатывают и представляют.

Геоданные являются прерогативой геоинформатики, в которой они возникли и совершенствовались. Современное применение геоданных использует разные технологии: интеллектуальный анализ [48], эвристический анализ [44], визуальный анализ, цифровое моделирование, логический анализ.

Анализ геоданных ПМ помогает решать ретроспективные и прогнозные задачи. Например, накопленные данные служат основой прогнозирования. Накопленные данные служат основой обобщения опыта, метамоделирования и написания теорий. Для инфраструктуры разделяют геоданные для стационарных объектов и геоданные для подвижных объектов или динамические геоданные. Динамические геоданные позволяют отслеживать объект в реальном времени в любой точке мира.

В реальности геоданные все являются условно динамическими. Если отслеживается неподвижный объект, то он может быть либо в стационарном состоянии, либо характеризоваться осадками смещениями или трещинами. Для стационарного состояния геоданные стационарны. В случае перемещения подвижного объекта все геоданные являются динамическими. Для подвижных объектов характерны динамические геоданные. Однако необходимо различать геоданные о состоянии объекта и геоданные о движении объекта.

Существует специальный тип геоданных – габаритные геоданные. Они являются важными для подвижных объектов, поскольку определяют возможность их перемещения относительно неподвижных объектов. Габаритные геоданные используют пространственные отношения между подвижным объектом и объектом вдоль трассы или на трассе. Помехи движению также описываются габаритными геоданными.

Появление цифровой железной дороги (ЦЖД) привело к появлению нового типа геоданных – геоданные цифровой железной дороги. Развитие цифровой логистики [49, 50] привело к появлению нового типа геоданных – геоданные цифровой логистики. Развитие транспортных сетей привело к появлению топологических моделей геоданных. ПМ является сложной системой. Это дает воз-

можность использовать системный подход для анализа ПМ и для анализа объектов ПМ.

В настоящее время при обработке пространственной информации существует проблема больших геоданных [52, 53]. Она решается применением специального пространственного обеспечения.

## Современные приложения ПМ

Организационный аспект ПМ позволяет рассматривать его как сложную организационно-техническую систему [53]. Технический аспект ПМ позволяет рассматривать его как сложную техническую систему. Технологический аспект ПМ позволяет рассматривать его как сложную технологическую систему. Многоаспектность ПМ определяет многообразие его применения и многообразие методов его анализа. В этом его преимущество.

В развитие ПМ мегаполиса [54] для мониторинга городской инфраструктуры предлагается создание автоматически обновляемой в режиме реального времени информационную систему контроля продолжительности прохождения дорожных участков. Такая информационная система мониторинга городского транспорта, включает сеть датчиков, системы связи сбора данных и системы обработки данных. В работе доказано, измерение плотности движения существенно не повышают точность прогнозирования времени прохождения улицы. Для решения задач прогнозирования достаточно измерить скорость транспорта в характерных точках маршрута.

Интересная социальная задача с помощью ПМ описана в работе [55]. В ней выполнено изучение схем городских транспортных сетей с точки зрения справедливости. В качестве основы используется метрика, определяемая как отношение расстояния маршрута в сети к евклидову расстоянию от пункта отправления до пункта назначения. Показано, что сетевой маршрут, влияет на поведение пассажиров. Длинный сетевой маршрут приводит к более длительному времени, проведенному в пути, а для сетей, в которых стоимость проезда зависит от пройденного расстояния, существует более высокую плату за то же самое евклидово расстояние.

Это делает целесообразность исследования схемы движения городского транспорта с точки зрения справедливости. Была исследована городская транспортная сети Амстердама в Нидерландах.

На основе результата ПМ произведена оценка транзитных схем в несоответствии пройденного расстояния в зависимости от профиля дохода путешественников и его влияние на время в пути и затраты для сетей с тарифами на основе расстояния. Анализ основан на схемах поездок на основе данных смарт-карт для автобусов, трамваев и метро в сочетании с данными о доходах на уровне районов. Результаты показывают, что в Амстердаме, чем выше доля людей с высоким доходом, проживающих поблизости от транзитной остановки, тем ниже цикличность поездок от остановки с учетом пройденного евклидова расстояния и пространственной автокорреляции. Объяснение простое. Люди с высоким доходом предпочитают личные автомобили. >>>

Неравномерное распределение дорожных сборов усугубляет неравенство в пройденном расстоянии и, следовательно, в оплате проезда между группами по доходам. Однако время в пути на евклидово расстояние благоприятствует группе с низким доходом, возможно, из-за того, что обходные маршруты, обслуживающие эти районы, компенсируются более высокими скоростями движения. В этом исследовании подчеркивается роль проекта сети в определении результатов ее справедливости и подчеркивается важность учета справедливости при планировании маршрутов и тарифов.

Предлагается развитие изучения справедливости в отношении других городских сетей – чем выше доля людей с высоким доходом, проживающих вблизи транзитной остановки, тем ниже цикличность поездок от остановки с учетом пройденного евклидова расстояния и пространственной автокорреляции. Неравномерное распределение дорожных сборов усугубляет неравенство в пройденном расстоянии и, следовательно, в оплате проезда между группами по доходам.

Применение ПМ транспортной инфраструктуры в аспекте рисков и опасностей движения раскрыто в работе [56]. Констатируется, что применение ПМ повышает устойчивость в управлении транспортом. Постулируется, что сочетание ПМ с новыми технологиями и цифровыми данными еще не полностью изучено. Предполагается, что оптимальное сочетание ПМ и цифровых технологий может обеспечить быструю количественную и инженерную оценку устойчивости транспортной инфраструктуры

Транспортная инфраструктура подвергается множеству природных и техногенных опасностей и различным нагрузкам на протяжении всего своего жизненного цикла. Физический ущерб и нарушение работы транспортных сетей приводят негативным эффектам влияющих на экономику и общество.

В работе [56] описано изменение требований к оценке рисков и устойчивости транспортной инфраструктуры. Предложена модель оценки риска в режиме реального времени с высокой точностью, с целью максимизации функциональности и минимизации потерь.

Авторы, развивают понятие ПМ и вводят новые типы мониторинга транспортной инфраструктуры – структурного и функционального мониторинга (structural and functionality monitoring – SHFM). Этот вид мониторинга более модельнопригоден и позволяет оценивать качественные и количественные оценки устойчивости транспортной инфраструктуры. Системы ПМ широко использовались в транспортной инфраструктуре, но SHFM дает более подробную оценку рисков.

Данные ПМ могут облегчить прогноз состояния активов и функциональности транспортной сети, обновляя компьютерные модели активов и трафика, которые могут помочь в определении действенных показателей эффективности, для диагностики и для определения рисков и убытков целесообразно и точно. Работа [56] эмпирически доказывает, что SHFM, то есть вид пространственного мониторинга является фактором устойчивости, однако аналитические исследования в поддержку оценки устойчивости на основе мониторинга в управлении транспортной инфраструктурой отсутствуют.

В работе [56] предлагается дорожная карта для количественной оценки устойчивости транспортной инфраструктуры на основе мониторинга, основанная на всестороннем обзоре текущего состояния дел. Это целостная дорожная карта управления активами транспортной инфраструктуры, которая определяет взаимодействие между проектированием, мониторингом, оценкой рисков и количественной оценкой устойчивости к множеству опасностей. Пространственный мониторинг рассматривается как обязательный компонент управления транспортной инфраструктурой

В работе [57] пространственный мониторинг рассмотрен как прикладная система. ПМ применяют для решения прикладных задач. С этой точки зрения ПМ можно рассматривать как прикладную систему [58]. В работе [57] рассмотрена прикладная задача автоматизированного пространственного мониторинга функциональности подвижных мостов. Функциональность разводного моста, как и любой технической системы, во многом зависит от работы механических компонентов. Поэтому текущий ремонт этих узлов крайне важен для бесперебойной работы разводных мостов. Такая же проблема существует при эксплуатации турбин тепловых электростанций.

Отмечается небольшое число исследований по мониторингу механических компонентов разводных мостов. В работе [57] предлагается статистическая основа для непрерывного мониторинга технического обслуживания механических компонентов. Эффективность этой структуры проверяется с использованием долгосрочных данных, собранных как с редуктора, так и с двигателя разводного моста. На первом этапе критические функции извлекаются из огромного количества данных мониторинга состояния конструкции (Structural Health Monitoring – SHM). Следующий этап включает использование данных с использованием анализа движущихся основных компонентов (Moving Principal Component Analysis – MPCA) и рассчитывается индекс, чувствительный к условию остановки. Фактически решается задача оптимизации технической системы в разрезе работа/остановка на ремонт.

В ходе мониторинга и анализа результатов выявлено, что существует сильная корреляция между критическими действиями по техническому обслуживанию, о которых индивидуально сообщает обслуживающий персонал, и индексом состояния, рассчитанным с помощью предлагаемой структуры и данных SHM. То есть результаты мониторинга дали возможность корректировки работы операторов по обслуживанию технического средства.

## Заключение

Системный подход позволяет анализировать ПМ как сложную систему. Доказано, что пространственный мониторинг является фактором устойчивости функционирования транспортной инфраструктуры. В тоже время глубокие аналитические исследования устойчивости на основе ПМ отсутствуют. Это мотивирует дальнейшие исследования в этой области. Потребности в пространственном мониторинге продолжают расти, >>>

что обусловлено развитием бизнес-геодезии и геосервиса. Пространственный мониторинг широко применяет системы спутниковой навигации, что осталось за пределами данной статьи.

Геоданные являются интеграционной основой обработки информации в ПМ. Важным является то, что в пространственном мониторинге существуют разные типы геоданных: объектные, ситуационные, геоданные состо-

яний, геоданные ЦЖД, геоданные цифровой логистики. На содержание пространственного мониторинга влияет развитие науки и техники. Появились новые виды пространственного мониторинга: структурный и функциональный. Это подчеркивает, что ПМ это не только технология измерений, но технология анализа и управления. Цифровая трансформация инфраструктуры также является мотивом совершенствования ПМ. ■

## Список литературы

1. Gong H. et al. Advances in fibre optic based geotechnical monitoring systems for underground excavations //International Journal of Mining Science and Technology. – 2019. – Т. 29. – №. 2. – С. 229-238.
2. Бобыкина В. П. К методике наземного мониторинга берегов //Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. – 2018. – №. 4. – С. 87-93.
3. Choi K. A., Lee J. H., Lee I. P. Development of a close-range real-time aerial monitoring system based on a low altitude unmanned air vehicle // Spatial Information Research. – 2011. – Т. 19. – №. 4. – С. 21-31.
4. Цветков В.Я. Анализ применения космического мониторинга // Перспективы науки и образования. – 2015. – №3(15). – С.48-55.
5. Цветков В.Я. Космический мониторинг: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2015. – 68 с
6. Бондур В.Г., Лёвин Б.А., Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Космический мониторинг транспортных объектов. Учебное пособие. – Москва, 2015. – 72 с.
7. Lyovin V. A. Earth Exploration from Space for Solving Transport Problems // Russian Journal of Astrophysical Research. Series A. 2017. -3(1). С.13-28.
8. Ознамец В. В. Геомониторинг на транспорте с использованием БПЛА// Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.43-53.
9. Маркелов В.М., Цветков В. Я. Геомониторинг// Славянский форум, 2015. – 2(8). – С.177-184.
10. Hamza V. et al. Testing multi-frequency low-cost gnss receivers for geodetic monitoring purposes //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 16. – С. 4375.
11. Охотников А. Л. Геоинформационный мониторинг транспортных объектов // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 3(3). – С.35-47.
12. Скнарина Н.А. Решение задач расстановки сети датчиков при организации геоинформационной системы мониторинга оползнеопасных склонов // Кибернетика. -2011. – № 6.- С.34-37. Гановер: Kybernetika-verlag.
13. Затягалова В.В. Геоэкологический мониторинг загрязнений моря по данным дистанционного зондирования // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – №5(8). – С.94-99.
14. Цветков В.Я. Геоинформационный геотехнический мониторинг // Науки о Земле. – 2012. – №4. – С.054-058.
15. Булгаков С.В. Геотехнический мониторинг транспорта // Наука и технологии железных дорог. 2021. Т. 5. №1 (17). – С.42-49.
16. Лёвин Б.А. Комплексный мониторинг транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 1(1). – С.14-21.
17. Tomasini S., Theilade I. Local ecological knowledge indicators for wild plant management: autonomous local monitoring in Prespa, Albania // Ecological Indicators. – 2019. – Т. 101. – С.1064-1076.
18. Avdiushchenko A. Toward a circular economy regional monitoring framework for European regions: conceptual approach //Sustainability. – 2018. – Т. 10. – №. 12. – С.4398.
19. Ogle S. M. et al. From research to policy: optimizing the design of a national monitoring system to mitigate soil nitrous oxide emissions //Current Opinion in Environmental Sustainability. – 2020. – Т. 47. – С.28-36.
20. Tsvetkov V. Ya. Global Monitoring // European researcher. 2012. № 11-1 (33). С. 1843-1851
21. Zhou W., Li Z., Gao P. Research on moving object detection and matching technology in multi-angle monitoring video //2019 IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). – IEEE, 2019. – С.741-744.
22. Liang X. et al. SFA-based ELM for remote detection of stationary objects //Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2022. – Т. 13. – №. 6. – С.2963-2981.
23. Guerra B. M. V. et al. Automatic pose recognition for monitoring dangerous situations in Ambient-Assisted Living //Frontiers in Bioengineering and Biotechnology. – 2020. – Т. 8. – С.415.
24. Цветков В. Я. Ситуационное моделирование в геоинформатике // Информационные технологии. – 2014. – №6. – С.64-69.
25. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Объектные и ситуационные модели при управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 2(2). – С.2-10.
26. Tse P. et al. Review of on-line and near real-time spectroscopic monitoring of processes relevant to nuclear material management //Analytica chimica acta. – 2020. – Т. 1107. – С.1-13.
27. Ознамец В.В. Развитие «Бизнес геодезии» // Науки о Земле. – 2018. – №2. – С.81-89.
28. Кудж С.А. Геосервис как сложная организационно техническая система// Славянский форум. -2020. – 2(28). – С.55-64.
29. Ознамец В.В. Геодезическое обеспечение как геосервис // Славянский форум. -2020. – 2(28). – С.237-245.





30. Цветков В.Я. Информационно измерительные системы и технологии в геоинформатике. – М.: МАКС Пресс, 2016. – 94с.
31. Раев В.К. Информационные модели как метод познания // Славянский форум. -2020. – 2(28). -С.84-93.
32. Максудова Л.Г., Цветков В.Я. Информационное моделирование как фундаментальный метод познания // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2001. – №1. – С.102-106.
33. Лотоцкий В.Л. Пространственное информационное моделирование // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. – 3 (15). – С.114-122.
34. Шайтура С.В. Моделирование и конструирование // Славянский форум. -2019. – 1(23). – С.68-79.
35. Цветков В.Я. Основы геоинформационного моделирования // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1999. – №4. – С.147 -157.
36. Савиных В.П. Геоинформационное моделирование в космических исследованиях // Образовательные ресурсы и технологии – 2017. -3 (20). – С.109-117.
37. Aiello M., Pratt-Hartmann I., Benthem J. V. What is spatial logic? //Handbook of spatial logics. – Springer, Dordrecht, 2007. – С.1-11.
38. Цветков В.Я. Создание интегрированной информационной основы ГИС// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2000. – №4. – С.150-154.
39. Павлов А.И. Цифровое моделирование пространственных объектов // Славянский форум, 2015. – 4(10) – С.275-282.
40. Сеницын А.В. Цифровое моделирование железнодорожного пути// Славянский форум. – 2017. -4(18). – С.84-90.
41. Бучкин В.А. Цифровое моделирование и геоинформационное моделирование // Славянский форум. -2020. – 2(28). – С.15-23.
42. Титов Е.К. Информационное ситуационное моделирование // Славянский форум. 2021, 3(33). С.162-171.
43. Савиных В.П. Пространственное ситуационное моделирование // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. № 1. С.92-104.
44. Martí R., Reinelt G. Heuristic methods //Exact and Heuristic Methods in Combinatorial Optimization. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2022. – С.27-57.
45. Болбаков Р.Г. Когнитивное пространственное моделирование // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении – 2019.- № 3 (13). – С.3-9.
46. Цветков В.Я., Булгаков С.В., Титов Е.К., Рогов И.Е. Метамоделирование в геоинформатике // Информация и космос. 2020. – №1. – С.112-119.
47. Tsvetkov V.Ya., Shaitura S.V., Minitaeva A.M., Feoktistova V.M., Kozhaev Yu.P., Belyu L.P. Metamodelling in the information field // Amazonia Investiga. 2020. Т. 9. № 25. С.395-402.
48. Шайтура С.В. Интеллектуальный анализ геоданных // Перспективы науки и образования. – 2015. – №6. – С.24-30.
49. Булгаков С.В. Интегрированная логистика // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 3(7). – С.57-63.
50. Лёвин Б. А., Ефимова О. В. Цифровая логистика и электронный обмен данными в грузовых перевозках // Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – №. 2. – С.142-149.
51. Буравцев А.В., Цветков В.Я. Облачные вычисления для больших геопространственных данных // Информация и космос. 2019. – №3. – С.110-115.
52. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Информационные процессы в пространстве «больших данных» // Мир транспорта. 2017. – Т.15, №6(73). – С.20-30.
53. Розенберг И.Н., Соловьев И.В., Цветков В.Я. Комплексные инновации в управлении сложными организационно-техническими системами. /под ред. В.И. Якунина – М.: Феория, 2010. – 248с.
54. Daunoras J., Bagdonas V., Gargasas V. City transport monitoring and routes optimal management system //Transport. – 2008. – Т. 23. – №. 2. – С.144-149.
55. Dixit M. et al. Examining circuitry of urban transit networks from an equity perspective //Journal of Transport Geography. – 2021. – Т. 91. – С.102980.
56. Dimitra V. A., Stergios A. M., Sotirios A. A. Ying Wang: monitoring of transport infrastructure exposed to multiple hazards: a roadmap for building resilience //Sci. Total Environ. – 2020. – Т. 746.
57. Malekzadeh M., Catbas F. N. A machine learning framework for automated functionality monitoring of movable bridges //Dynamics of Civil Structures, Volume 2. – Springer, Cham, 2016. – С.57-63.
58. Цветков В.Я. Прикладные системы // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005.- №3. – С.76- 85.

УДК: 528.8, 004.932

# Фильтрация изображений земляного полотна, полученных с помощью лазерного сканирования

## Filtering roadbed images obtained by laser scanning

**Броневи́ч А.Г.**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, АО «НИИАС»,  
E-mail: brone@mail.ru, Москва, Россия  
**Bronevich A.G.**, Dr.ofSci.(Phys-Math), Chief Researcher, JSC "NIIAS",  
E-mail: brone@mail.ru, Moscow, Russia

### Аннотация

В статье предлагается процедура фильтрации (сглаживания) трехмерного изображения земляного полотна, основанная на решении оптимизационной задачи методом градиентного спуска.

**Ключевые слова:** транспорт, лазерное сканирование, триангуляция, фильтрация изображений земляного полотна.

### Abstract

The paper proposes the filtering (smoothing) of 3-D image of roadbed based on solving an optimization problem by the gradient descent method.

**Keywords:** transport, laser scanning data, triangulation, filtration of roadbed.



## 1. Введение

В настоящее время, в связи с интенсификацией железнодорожных перевозок, особое значение приобретает автоматизированный мониторинг верхнего строения железнодорожного пути и земляного полотна [1,2]. Данный мониторинг может осуществляться воздушным путем с помощью самолета или вертолета [3], но наиболее перспективным является мобильное лазерное сканирование [4-6], когда антенны устанавливаются на последний вагон движущегося поезда. В результате сканирования мы получаем так называемое облако точек, часть из которых принадлежит поверхности земли, или инфраструктурным объектам – таким, как опоры контактной сети, железнодорожные платформы и пр.

При этом важное значение приобретает распознавание структуры земляного полотна, её дефектов для своевременного проведения ремонтных работ. Хотя в настоящее время и разработаны алгоритмы восстановления поверхностей [3, 7-9], основанные на выявлении и фильтрации точек, принадлежащих поверхности, с последующей триангуляцией, удовлетворяющих условию Делоне [10,11], но они не являются достаточно эффективными, так как не удается автоматически качественно выделить точки, принадлежащие поверхности, и после фильтрации приходится в ручном режиме удалять точки, полученные в результате отражения от кустов, деревьев и прочей растительности.

С учетом этого, задача сглаживания и фильтрации полученного описания земляного полотна является важной и актуальной. При этом следует иметь в виду, что шумы, искажающие истинную конфигурацию земляного полотна, не подчиняются традиционным вероятностным моделям, имеющим гауссову составляющую. С учетом этого, является логичным применение фильтра, являющегося аналогом медианного при обработке обычных изображений.

В статье предлагается фильтрация (сглаживание) трехмерного изображения земляного полотна на основе минимизации так называемой меры информативности с помощью метода градиентного спуска. Как показывают вычисления, итерационная процедура минимизации меры информативности сводится к применению преобразований триангуляционного описания земляного полотна, которые аналогичны применению медианного фильтра.

Статья имеет следующую структуру. В разделе 2 дается краткий обзор известных алгоритмов построения поверхностей по облаку точек. Раздел 3 посвящен описанию предлагаемого метода, которое включает вводные замечания (подраздел 3.1), введение меры информативности (подраздел 3.2) и процедуру минимизации меры информативности градиентным методом (подраздел 3.3). В конце статьи приводятся краткие выводы, связанные с полученными результатами.

## 2. Построение трехмерного изображения земляного полотна

Обычно выделяют следующие основные задачи лазерного сканирования: построение поверхностей, классификацию наземных объектов и визуализацию результатов

лазерных измерений. В этом разделе мы дадим краткий обзор методов, которые применялись для построения триангуляционных представлений поверхностей, покрытых растительностью (травой, кустарниками, деревьями) по данным лазерного сканирования [3, 7-9].

2.1. *Метод глобального минимума.* Множество полученных лазерных точек разбивается на группы. Каждую группу составляют точки, координаты которых попадают в одну из ячеек квадратной формы. Ячейки образованы в горизонтальной плоскости и без промежутков, как решетка, покрывают всю поверхность сцены наблюдения. Алгоритм построения поверхности в данном методе состоит в следующем: в каждой группе из всех принадлежащих ей лазерных точек выделяется одна, имеющая минимальное значение геодезической высоты и эта точка считается принадлежащей поверхности.

2.2. *Метод конуса.* От каждой точки облака, как от вершины, строится конус с вертикальной осью и фиксированным значением раствора. Точка, попадающая внутрь конуса, образованного от другого конуса, исключается из рассмотрения. Оставшиеся точки считаются принадлежащими поверхности.

Достоинством выше рассмотренных алгоритмов является простота описания и программной реализации. Главный недостаток в том, что нет гарантии, что поверхность, построенная с применением этих алгоритмов, будет истинной.

2.3. *Метод молдинга.* Идея метода основана на:

- итерационном построении поверхности земли с постоянным контролем сходимости;
- использовании триангуляционной формы представления;
- использовании аналитических ограничений, отражающих гладкость поверхности.

При построении триангуляционной сети пытаются добиться выполнения нескольких условий, в частности, условия Делоне [10,11], согласно которому общая длина ребер для фиксированной площади поверхности, покрываемой триангуляционной моделью, минимальна.

К достоинствам алгоритма можно отнести сравнительную простоту реализации, которая приводит к хорошо предсказуемым результатам. При небольших модификациях алгоритма могут быть получены качественные результаты, позволяющие получить хорошо структурированную модель местности, в частности, выделить контуры зданий и структурные линии рельефа.

Другим преимуществом алгоритма молдинга является то, что одновременно с построением поверхности рельефа, также производится селекция лазерных точек, т.е. выделение точек, которые принадлежат поверхности. Отметим также недостатки данного алгоритма, ограничивающие его применение:

- итерационная схема вычислений может привести к недопустимой вычислительной сложности при практической реализации;
- в алгоритме есть параметры, оптимальные значения которых неизвестны, их оценивание в соответствии с видом обследуемого рельефа в рамках предлагаемой процедуры не предусмотрено;
- в алгоритме не оценивается достоверность полученного решения.



#### 2.4. Метод анализа пространственного спектра.

Алгоритм включает следующие этапы:

- получение очередной порции лазерных точек;
- спектральный анализ отобранного множества точек, отбраковка ложных точек и построение аппроксимирующей поверхности для текущей порции;
- определение условий набора нового множества точек из смежных областей по результатам выполнения текущей итерации.

Отобранное множество точек аппроксимируется аналитической функцией с ограниченным спектром, т.е. выполняется низкочастотная фильтрация, что дает следующие положительные результаты:

- на основе расстояний от найденной поверхности до облака точек проводится селекция лазерных точек, которые ближе расположены к аппроксимируемой поверхности. Это позволяет провести аппроксимацию повторно, не учитывая отбракованные точки, добиваясь лучшей оценки поверхности;
- полученная аппроксимация представляет собой математически гладкое описание поверхности рельефа для выделенного фрагмента. Точность представления описывается среднеквадратической ошибкой положения точек, использованных при аппроксимации, относительно построенной поверхности;
- есть объективный критерий оценки достоверности и точности найденного решения.

Несмотря на то, что метод анализа пространственного спектра использует достаточно сложные в математическом отношении процедуры обработки данных, которые представляют значительную вычислительную сложность, эта проблема компенсируется рядом преимуществ:

- полученная поверхность является в определенном смысле «окончательной» и не требует проведения коррекции;
- результатом работы алгоритма является не только селекция лазерных точек, но и построение триангуляционной сети;
- важное значение имеет упомянутая возможность оценки точности и достоверности получаемого решения.

Следует подчеркнуть, что все рассмотренные подходы разрабатывались для решения задачи построения поверхности в общей постановке. При анализе данных сканирования земляного полотна имеется априорная информация о её геометрической форме, которая должна учитываться при разработке алгоритмов статистической обработки. Кроме того, рассматриваемые алгоритмы дают относительно «грубую» аппроксимацию поверхности, которая могла бы быть значительно улучшена за счет использования более тонких статистических методов, например, предложенных в [12,13], в которых была бы заложена предположительная геометрическая форма земляного полотна.

Вместе с тем, несмотря на то, что направление исследований, связанное с автоматическим мониторингом профиля полотна, является очень актуальным, эффек-

тивных методов и алгоритмов комплексной обработки «лазерных» данных, вычислительно эффективных в практическом плане, еще до сих пор не разработано. В большинстве технических систем реализованы лишь простейшие алгоритмы построения поверхностей (например, с помощью триангуляции Делоне [10,11]), причем со значительным объемом предварительной ручной обработки данных, связанных с удалением артефактных точек.

### 3. Алгоритм сглаживания на основе меры информативности

#### 3.1. Краткое описание алгоритма

В качестве исходных данных имеется облако точек, по которому можно приближённо аппроксимировать поверхность земляного полотна, например, с помощью методов триангуляции. Однако, как правило, прямое использование триангуляции не позволяет качественно аппроксимировать поверхность наблюдаемого рельефа. Это вызвано множеством случайных отражений от растительности и посторонних предметов на поверхности. Отметим, что данный шум вряд ли можно описать с помощью стандартной модели аддитивного гауссовского шума. В этом случае оказываются более пригодными методы медианной фильтрации.

В данной статье предлагается фильтр, очень близкий по свойствам к медианному фильтру, основанный на минимизации меры информативности изображения земляного полотна. Согласно этому подходу на множестве изображений вводится функционал, представляющий собой интегральную оценку перепадов высот на изображении земляного полотна. Такая оценка строится как усредненное значение квадрата модуля градиента по всему изображению. В дискретной форме данный функционал представляет собой поверхность второго порядка в  $n$ -мерном пространстве. Множество допустимых представлений изображения в этом случае определяется окрестностью исходного изображения, которое учитывает перепады высот в соседних точках. Сглаживание (фильтрация) изображения в этом случае сводится к минимизации меры информативности в окрестности изображения градиентным методом.

Данный метод показал высокую эффективность при фильтрации сильно зашумленных изображений земляного полотна при достаточно быстрой сходимости. При этом на каждой итерации градиентного метода фактически происходит адаптивное применение медианного фильтра. В разработанном методе фильтрация производится непосредственно над всем облаком сканированных точек. Для этого вначале необходимо найти триангуляцию поверхности земляного полотна, а затем мера информативности строится на основе графа связей между точками, который строится на этапе триангуляции. Далее производится сглаживание поверхности с помощью градиентного метода. При этом минимизируется функционал, представляющий квадратическую функцию внутри области допустимых триангуляций. >>>

### 3.2. Мера информативности земляного полотна

Будем описывать исходную триангуляцию с помощью планарного неориентированного графа  $G=(X, U)$ , в котором множество  $X=\{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$  – это множество точек в  $\mathbb{R}^3$ , по которым произведена триангуляция, а  $U$  – это множество связей между точками. Предполагается, что точки  $\mathbf{x}_i$  и  $\mathbf{x}_j$  связаны между собой, т.е.  $(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \in U$ , если имеется треугольник, который является частью поверхности, причем точки  $\mathbf{x}_i$  и  $\mathbf{x}_j$  являются вершинами данного треугольника. Следует отметить, что поверхность будет гладкой, если значения высот в соседних точках  $(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \in U$  ненамного отличаются друг от друга. Условимся, что высоты являются третьими координатами точек  $\mathbf{x}_i$  и  $\mathbf{x}_j$ , и обозначаются соответственно  $z_i$  и  $z_j$ . В дальнейшем для удобства будем рассматривать вспомогательный граф  $\tilde{G}=(N, \tilde{U})$ , в котором  $N=\{1, \dots, n\}$  и  $(i, j) \in \tilde{U}$ , если  $(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \in U$ . Тогда меру информативности поверхности земляного полотна можно определить следующим образом:

$$Q(G) = \sum_{(i,j) \in \tilde{U}} (z_i - z_j)^2 \quad (1)$$

Определим теперь множество допустимых поверхностей. Будем считать, что при измерениях имеют место погрешности, однако в реальности высота близких точек меняется незначительно. Будем называть, измеренные точки  $\mathbf{x}_i=(x_i, y_i, z_i)$  и  $\mathbf{x}_j=(x_j, y_j, z_j)$  близкими, если расстояние  $d_{Oxy}(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ , измеренное между ними в плоскости  $Oxy$  не больше  $\varepsilon$ , где положительное число  $\varepsilon$  выбирается из анализа экспериментальных данных моделирования. С учетом этого, будем считать представление поверхности  $G(X, U)$  допустимым, если каждое  $z_i$  удовлетворяет неравенству:  $z_i^{low} \leq z_i \leq z_i^{up}$ , где числа  $z_i^{low}$ ,  $z_i^{up}$  рассчитываются по исходной триангуляции поверхности  $G^{(0)}=(X^{(0)}, U)$ , где  $X^{(0)} = \{\mathbf{x}_1^{(0)}, \dots, \mathbf{x}_n^{(0)}\}$  следующим образом:

$$z_i^{low} = \min\{z_j^{(0)} \mid d_{Oxy}(\mathbf{x}_i^{(0)}, \mathbf{x}_j^{(0)}) \leq \varepsilon, j \in \{1, \dots, n\}\}, \quad (2)$$

$$z_i^{up} = \max\{z_j^{(0)} \mid d_{Oxy}(\mathbf{x}_i^{(0)}, \mathbf{x}_j^{(0)}) \leq \varepsilon, j \in \{1, \dots, n\}\}, \quad (3)$$

Обозначим через  $\mathcal{G}$  множество всех допустимых представлений земляного полотна, тогда поиск наименее информативного представления связан с решением следующей оптимизационной задачи:  $G^{opt} = \operatorname{argmin}_{G \in \mathcal{G}} Q(G)$ .

### 3.3. Решение оптимизационной задачи методом градиентного спуска

Фактически при решении задачи нам необходимо найти вектор высот  $Z=\{z_1, \dots, z_n\}$ , а функционал  $Q(Z)$  есть квадратичная форма от  $Z$ . Классический метод градиентного спуска состоит в следующем:

1. Выбирается начальное приближение оптимального решения  $Z^{(0)}$  (для нашего случая это вектор высот  $Z^{(0)} = (z_1^{(0)}, \dots, z_n^{(0)})$ , получаемый из исходной триангуляции), номер итерации  $k:=0$ .
2. Приближенное оптимальное решение найдено, если  $|\operatorname{grad}Q|_{Z=Z^{(k)}}| < \delta$ , где  $\delta > 0$  – это параметр алгоритма. Если последнее условие не выполняется, то перейти к шагу 3.

3. Пусть мы имеем решение  $Z^{(k)}$  на итерации  $k$ , тогда функционал  $Q(Z)$  минимизируется в направлении  $V^{(k)} = -\operatorname{grad}Q|_{Z=Z^{(k)}}$ , обратном направлению градиента. Для этого решается следующая оптимизационная задача  $Q(Z^{(k)} + \alpha V^{(k)}) \rightarrow \min$  относительно  $\alpha \in \mathbb{R}$ . Найденное  $\alpha^{(k)}$  используется для вычисления следующего приближения:  $Z^{(k+1)} = Z^{(k)} + \alpha^{(k)} V^{(k)}$ . Заметим, что исходя из выбора направления  $V^{(k)}$  следует, что значение  $\alpha_k$  должно быть неотрицательным.

Для нашего случая есть определенные особенности при вычислении направления минимизации, поскольку минимизационная задача решается в области допустимых значений  $Z$ , которые определяются неравенствами  $z_i^{low} \leq z_i \leq z_i^{up}$ . Поэтому при решении нашей задачи координата  $v_i^{(k)}$  вектора  $V^{(k)}$  обнуляется, если  $z_i^{(k)} = z_i^{up}$  и  $v_i^{(k)} > 0$  или  $z_i^{(k)} = z_i^{low}$  и  $v_i^{(k)} < 0$ . Возможна также ситуация, когда после коррекции координата  $z_i^{(k)}$  не будет удовлетворять неравенству:  $z_i^{low} \leq z_i \leq z_i^{up}$  в этом случае нужно скорректировать значение  $z_i^{(k)}$  следующим образом:  $z_i^{(k)} := z_i^{up}$ , если  $z_i^{(k)} > z_i^{up}$ , и  $z_i^{(k)} := z_i^{low}$ , если  $z_i^{(k)} < z_i^{low}$ .

Рассмотрим более подробно вычисление вектора  $V^{(k)}$  и параметра  $\alpha$ . Очевидно, что

$$V^{(k)} = -\left(\frac{\partial Q}{\partial z_1}\bigg|_{Z=Z^{(k)}}, \dots, \frac{\partial Q}{\partial z_n}\bigg|_{Z=Z^{(k)}}\right), \quad (4)$$

где  $\frac{\partial Q}{\partial z_i}\bigg|_{Z=Z^{(k)}} = 2 \sum_{(i,j) \in \tilde{U}} (z_i^{(k)} - z_j^{(k)})$ .

Далее после коррекции  $V^{(k)}$  находится параметр  $\alpha$  как решение следующей оптимизационной задачи относительно  $\alpha$ :

$$Q(Z^{(k)} + \alpha V^{(k)}) = \sum_{(i,j) \in \tilde{U}} (z_i^k - z_j^k + \alpha(v_i^k - v_j^k))^2 \rightarrow \min$$

Значение  $\alpha^{(k)}$ , доставляющее минимум для данной оптимизационной задачи, находится из уравнения:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} Q(Z^{(k)} + \alpha V^{(k)}) = 2 \sum_{(i,j) \in \tilde{U}} (v_i^k - v_j^k)(z_i^k - z_j^k + \alpha(v_i^k - v_j^k)) = 0, \quad (5)$$

Откуда находим, что  $\alpha = -A/B$ , где

$$A = \sum_{(i,j) \in \tilde{U}} (v_i^k - v_j^k)(z_i^k - z_j^k) \text{ и } B = \sum_{(i,j) \in \tilde{U}} (v_i^k - v_j^k)^2, \quad (6)$$

## 4. Заключение

Рассмотренный метод фильтрации и сглаживания показал хорошие результаты при фильтрации земляного полотна. При анализе данных с высокочастотных лазеров, когда имеется много точек, целесообразно комбинирование рассмотренного метода со стандартным фильтром, например, основанным на вычислении оконного среднего. В этом случае получается лучше фильтровать артефактные точки, не стирая важные детали геометрической конфигурации профиля. Применение данного метода позволит значительно улучшить точность распознавания структуры земляного полотна и других объектов инфраструктуры с помощью ранее предложенных методов [14-17]. ■



## Список литературы

1. Сазонов В.Н., Кармалин Б. В., Лебедев, А. В., Игонькин С. Н., Паснов А.А. Современные направления диагностики и мониторинга земляного полотна // Путь и путевое хозяйство. 2009, № 6, С. 34-37.
2. Загитов Э.Д., Игонькин С.Н. Мониторинг верхнего строения пути и земляного полотна // Мир транспорта, 2012, т. 10. № 5 (43), С. 124-128.
3. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: учебное пособие. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007.
4. Уманский В.И., Дулин С.К., Трусков С.В., Якушев Д.А. Автоматизация сбора и обработки пространственных данных железнодорожной инфраструктуры // Железнодорожный транспорт, 2017, № 10, С. 46-49.
5. Розенберг И.Н., Дулин С.К., Якушев Д.А. Технологии мобильного лазерного сканирования для железнодорожной инфраструктуры // Железнодорожный транспорт, 2018, № 8, С. 32-35.
6. Izvoltova J., Pisca P., Kotka V., Mancovic M.. 3D laser scanning of railway line. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina 2013, vol. 15(4), pp. 80-84.
7. TerraScan User's Guide [Electronic resource]. The document is created in August, 2020. URL:<http://www.terrasolid.com/download/tscan.pdf>.
8. Новаковский Б.А., Ковач Н.С., Энтин А.Л., Калиновский Л.В. Геоинформационное картографирование лесного покрова по материалам воздушного лазерного сканирования // Геоинформатика, 2017, №1, С. 32–39.
9. Калиновский Л.В., Новаковский Б.А. Геоинформационное моделирование лесного покрова по материалам воздушного лазерного сканирования // Научные исследования молодых ученых-картографов, выполненные под руководством сотрудников кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова. Сборник научных работ. Москва, 2017, С. 53-60.
10. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и ее применение. Томск: Изд-во Томского университета, 2002.
11. Su P., Scot Drysdale R.L. A comparison of sequential Delaunay triangulation algorithms // Computational Geometry, vol. 7(5–6) 1997, pp. 361-385.
12. Броневиц А.Г., Каркищенко А.Н., Уманский В.И. Статистический метод восстановления профиля по данным лазерного сканирования // Цифровая обработка сигналов, 2011, № 4, С. 42-49.
13. Броневиц А.Г., Каркищенко А.Н., Уманский В.И., Якушев Д.А. Применение локального метода обнаружения краев изображений для восстановления профиля земляного полотна // Проблемы управления, 2012, № 6, С. 56-62.
14. Уманский В.И., Дулин С.К., Якушев Д.А., Трусков С.В. Разработка интеллектуальных методов решения проблем анализа и сравнения проектных и фактических геоданных, полученных по результатам мобильного лазерного сканирования // Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2018). Труды седьмой научно-технической конференции, 2018, С. 122-125.
15. Дулин С.К., Дулина Н.Г., Якушев Д.А. Адаптивная идентификация пространственных объектов в информационно-измерительной системе мобильного лазерного сканирования // Информационно-измерительные и управляющие системы, 2016, т. 14, № 8, С. 26-35.
16. Bronevich A.G., Lepskiy A.E., Umansky V.I., Yakushev D.A. Recognition of cross profiles of roadbed based on polygonal representations // Lecture Notes in Computer Science, 2013, vol. 8251, LNCS, pp. 270-276.
17. Bronevich A.G., Umansky V.I., Yakushev D.A. The recognition of roadbed based on fuzzy etalons // Proceedings of the 2015 Conference of the International Fuzzy Systems Association and the European Society for Fuzzy Logic and Technology, vol. 89, Atlantis Press, 2015, pp. 1184-1188.

УДК: 656.004.89; 656.052/625.173.1

# Современное производственно-нормативное планирование ресурсов путевого хозяйства линейных предприятий ОАО «РЖД»

## Modern production and normative planning of resources for the track facilities of linear enterprises of Russian Railways

**Коваленко Н.И.**, д.т.н., профессор, Российский университет транспорта (МИИТ),

E-mail: kni50@mail.ru, Москва, Россия

**Kovalenko N.I.**, D.ofSci.(Tech.), Professor, Russian University of Transport (MIIT),

E-mail: kni50@mail.ru, Moscow, Russia

**Коваленко А.Н.**, менеджер, АО «Уголь-Транс»,

E-mail: alexnikkovalenko@gmail.com, Москва, Россия

**Kovalenko A.N.**, Manager, Transportation Organization JSC "Ugol-Trans",

E-mail: alexnikkovalenko@gmail.com, Moscow, Russia

### Аннотация



В линейных предприятиях путевого хозяйства ОАО «РЖД» в настоящее время не в полной мере учитываются ресурсы, например, прямые затраты, на техническое обслуживание пути. Современная специализация и классификация путей обуславливает необходимость внесения изменений в порядок распределения ресурсов. Предлагается система производственно-нормативного планирования ресурсов прямых затрат на техническое обслуживание железнодорожного пути на линейном, региональном и центральном уровнях. Разработаны коэффициенты для учёта классификации железнодорожных линий для адресного производственно-нормативного планирования прямых затрат на техническое обслуживание пути.

**Ключевые слова:** транспорт, техническое обслуживание пути, специализация и классификация железнодорожных путей, производственно-нормативное планирование и распределение ресурсов.



### Abstract

Currently, the line enterprises of the track facilities of Russian Railways do not fully take into account the resources, for example, direct costs, for the maintenance of the track. The modern specialization and classification of paths necessitates changes in the distribution of resources. A system of production-normative resource planning of direct costs for the maintenance of the railway track at the linear, regional and central levels is proposed. Coefficients have been developed to take into account the classification of railway lines for targeted production and regulatory planning of direct track maintenance costs.

**Keywords:** transport, track maintenance, specialization and classification of railway tracks, production and regulatory planning and resource allocation.



## Введение

Существующие методы планирования ресурсов, (в первую очередь прямых затрат на техническое обслуживание пути) на дистанциях пути (ПЧ), дистанциях инфраструктуры (ИЧ), дистанциях по искусственным сооружениям (ПЧИССО) не в полной мере учитывают современные подходы сбалансированного распределения ресурсов [1, 2, 3].

При планировании ресурсов на техническое обслуживание железнодорожного пути применяется «Методика планирования расходов на текущую эксплуатацию пути», утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 30.12.2008г. №2897р (далее, предшествующая Методика), в которой при планировании прямых затрат применяется нормативно-целевой метод, утвержденный распоряжением ОАО «РЖД» от 04 февраля 2014 года №266р (в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 02.09.2016 г. №1806р), который базируется на отчетно-статистической информации по результатам фактического выполнения ранее запланированных показателей [4, 5, 6].

В современный период в путевом хозяйстве железных дорог при создании условий для обеспечения конкурентоспособных перевозок грузов и пассажиров организация производственных процессов технического обслуживания железнодорожного пути должна быть направлена на оптимизацию распределения ресурсов [7, 8, 9].

Существующая практика распределения ресурсов нормативно-целевым методом планирования не позволяет учитывать особенности работы конкретных предприятий в планируемом периоде, таких как: возможное изменение штата и/или квалификации работников, совмещение профессий, применение передовых приемов, повышающих производительность труда, местные особенности технологических процессов выполнения работ [5, 10, 11, 12, 13].

В результате запланированное распределение ресурсов, в части прямых затрат на техническое обслуживание железнодорожного пути, не стимулируют материальную заинтересованность непосредственных исполнителей и причастных работников в росте производительности труда [5, 14, 15].

Недостатком существующего метода планирования также является ограниченность возможностей оперативного управления трудовыми ресурсами, в частности, сложности изменения штатного расписания, совмещения профессий, применения стимулирующих выплат за повышение производительности труда и так далее [16, 17, 18].

Для современной системы ведения путевого хозяйства особенностью является специализация и классификация путей, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 31.12.2015г. № 3188р (далее, распоряжение от 31 декабря 2015г. № 3188), которая обуславливает необходимость внесения изменений в порядок распределения ресурсов [19, 20, 21].

**Основные задачи настоящей работы** состоят в следующем:

- разработка системы производственно-нормативного планирования ресурсов прямых затрат на техническое обслуживание железнодорожного пути на линейном, региональном и центральном уровнях;

- разработка коэффициентов учёта современной классификации железнодорожных линий, их специализацию и классификацию путей, направленных на адресное производственно-нормативное планирование использования ресурсов прямых затрат по техническому обслуживанию железнодорожного пути.

## Материалы и методы

Коэффициенты влияния классов и специализации железнодорожных линий разработаны по результатам сопоставления трудозатрат работников, занятых на текущем содержании объектов инфраструктуры (рисунки 1, 2) на основании анализа объемов выполняемых работ по текущему содержанию пути на линейном уровне на участках пути Куйбышевской, Южно-Уральской, Московской и Октябрьской Дирекций инфраструктур-филиалов ОАО «РЖД». Источниками информации служили данные отчетных форм ПУ-74, отчетов ЕК АСУИ за период 2–3 года.

Выполненным анализом распределения объемов работ по текущему содержанию объектов инфраструктуры на дистанции пути установлено, что в сезон: весна-лето-осень всю совокупность работ можно сгруппировать по следующим основным видам: 1 – работы по одиночной замене дефектных элементов (рельсов, шпал, скреплений), а также смазки и закрепления элементов скреплений; 2 – работы по ликвидации выплесков и разжижения балласта; 3 – работы по регулировке геометрии рельсовой колеи по ширине (шаблон); 4 – работы по регулировке рельсошпальной решетки (далее, РШР) в плане; 5 – работы по исправлению просадок, перекосов и устранения отступлений по уровню.

Определение объемов отдельных работ определялись по количеству необходимого устранения отказов, дефектов и повреждений элементов пути, имевших место на рассмотренных участках.

Объемы отдельных планово-предупредительных работ определялись на основе фактических материалов по дефектам и повреждениям пути за год, которые были собраны по дистанциям пути, а затем статистически обработаны и объединены по пропущенному тоннажу в пять подгрупп. В одну подгруппу объединялись однотипные участки пути по параметрам плана и профиля, имеющие близкую по величине грузонапряженность и скорости движения поездов, а также близкий по величине пропущенный тоннаж.

По материалам об отказах, дефектах и повреждениях для каждой подгруппы были выполнены расчеты по определению удельных значений (на 1 км или на 10 км пути) дефектов и повреждений элементов верхнего строения пути (далее, ВСП) и параметров геометрии рельсовой колеи (далее, ГРК). При этом учитывалась продолжительность сезонов выполнения работ (круглогодичные – 12 месяцев, или сезонные, например, – 5 месяцев для Южно-Уральской дирекции инфраструктуры-филиала ОАО «РЖД» и 6 месяцев для Куйбышевской и Московской дирекций инфраструктуры-филиалов ОАО «РЖД»).





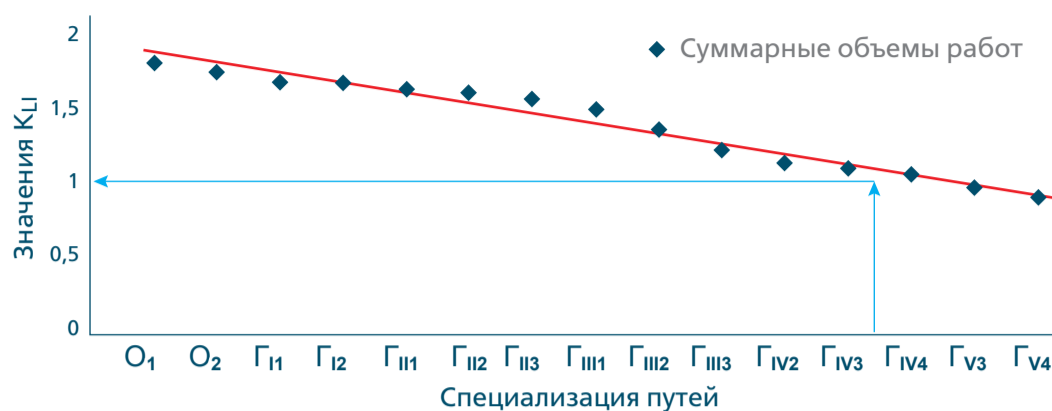


Рисунок 1. Коэффициенты ( $K_{Li}$ ) влияния класса и специализации для участков преимущественного грузового движения поездов

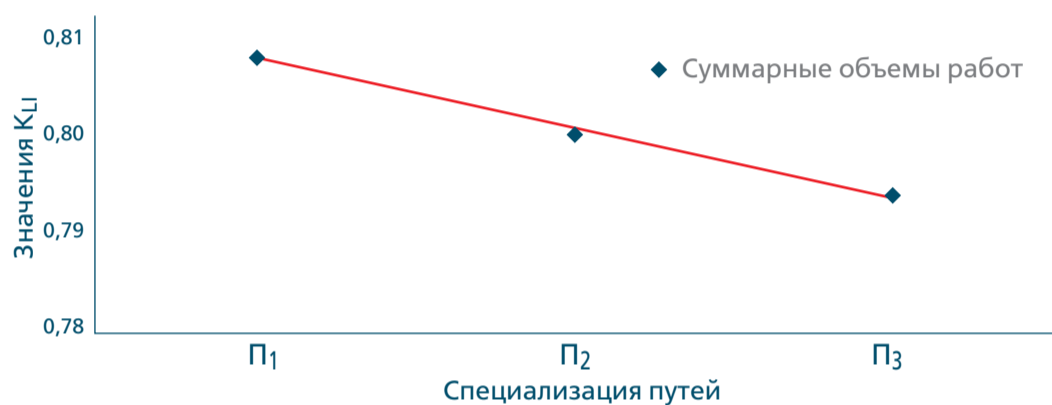


Рисунок 2. Коэффициенты ( $K_{Li}$ ) влияния класса и специализации для участков преимущественного пассажирского движения поездов

## Результаты

Обработкой фактических материалов по соотношению объемов работ на участках, имеющих различный класс и специализацию для линий грузонапряженного и преимущественного грузового движения (рисунок 1), получена зависимость (1) для определения коэффициента ( $K_{Li}$ ):

$$K_{Li} = 7,6 \times 10^{-2} \times Q_{trzgr} + 1,8 \quad (1)$$

где  $Q_{trzgr}$  – суммарные объемы работ по техническому обслуживанию пути на участках особогрузонапряженного движения 1 класса в сравнении с участками особогрузонапряженного движения 2 класса и участками преимущественного грузового движения 1, 2, 3, 4 и 5-ой групп.

Исследованиями установлено, что можно принять  $Q_{trzgr} = 1,0$  для участков пути, отнесённых по классификации к IV группе преимущественного грузового движения поездов (рисунок 1).

Для линий I, II и III-ого классов преимущественного пассажирского движения обработкой соответствующих статистических материалов, построен график (рисунок 2) и получена зависимость (2) для определения коэффициента ( $K_{Li}$ ):

$$K_{Li} = 0,81 - 7 \times 10^{-3} \times Q_{trzpas} \quad (2)$$

где  $Q_{trzpas}$  – суммарные объемы работ технического обслуживания пути на участках преимущественного пассажирского движения 2 и 3-его классов в сравнении с участками 1-ого класса.

Для участков пути высокоскоростного движения для определения коэффициента ( $K_{Li}$ ) получена зависимость (3):

$$K_{Li} = 1,04 + 0,1 \times Q_{trvys} \quad (3)$$

где  $Q_{trvys}$  – базовые суммарные объемы работ технического обслуживания пути на участках преимущественного скоростного пассажирского движения 1-ого класса.

Для линий малоинтенсивного движения (малодеятельные участки) 4-ого класса для определения коэффициента ( $K_{Li}$ ) получена зависимость (4):

$$K_{Li} = 0,38 + 0,1 \times Q_{trvmal} \quad (4)$$

где  $Q_{trvmal}$  – суммарные объемы работ технического обслуживания пути на малоинтенсивных участках 5-ого класса.

## Выводы

Материалы исследований по определению коэффициентов (таблица 1) были учтены при разработке «Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути, введенной распоряжением ОАО «РЖД» от 14.11.2016 года № 2288р» (таблица П.11.6 данной Инструкции). >>>

Таблица 1  
**Коэффициенты (KLi) влияния класса и специализации железнодорожных линий на величину объемов работ, при текущем содержании объектов инфраструктуры**

Специализация железнодорожной линии в соответствии с Приказом Минтранс России от 09 февраля 2018 года №54 (ПТЭ-2018)	Обозначение специализации линии	Класс линии	Классификационный признак	Значения коэффициента	
Высокоскоростное движение	<b>В</b>	1	В1	1,240	
Участки скоростного движения	<b>С</b>	1	С1	1,140	
Направления преимущественного движения пассажирских поездов	<b>П</b>	1	П1	0,808	
		2	П2	0,800	
		3	П3	0,794	
Линии грузонапряженного движения	<b>О</b>	1	О1	1,770	
		2	О2	1,710	
Направления преимущественного грузового движения поездов	<b>I группа</b>	1	П1	1,650	
		2	П2	1,640	
	<b>II группа</b>	1	П11	1,600	
		2	П12	1,580	
		3	П13	1,540	
	<b>III группа</b>	1	П111	1,470	
		2	П112	1,340	
		3	П113	1,210	
	<b>IV группа</b>	2	П112	1,120	
		3	П113	1,080	
		4	П114	1,040	
	<b>V группа</b>	3	П113	0,960	
		4	П114	0,900	
	Линии малоинтенсивного движения (малодеятельные участки)	<b>М</b>	4	М4	0,400
			5	М5	0,390



## Список литературы

1. Kovalenko Nikolay, Volkov Boris, Kovalenko Aleksandr, Kovalenko Nina (2020). Budgeting Direct Costs of Track Complex of JSC "Russian Railways" in the Light of Modern Classification of Railway Lines. / In: Popovic Z., Manakov A., Breskich V. (eds) VIII International Scientific Siberian Transport Forum. TransSiberia 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1115. Springer Cham 05 January 2020, pp 177-183.
2. Коваленко Н. И., Коваленко А. Н. Предложения технического обслуживания малоинтенсивных железных дорог в современных условиях. В кн. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог. Секция 2. Железнодорожный путь для тяжеловесного движения. – М.: МИИТ, 2017. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35052400>. Доступ 19.04.2020.
3. Tsvetkov, V. Ya. Conceptual Model of the Innovative Projects Efficiency Estimation // European Journal of Economic Studies, 2012, Vol. 1, pp. 45–50. [Электронный ресурс]: <https://docplayer.ru/72314679-European-journal-of-economic-studies-2012-vol-1-1-conceptual-model-of-the-innovative-projects-efficiency-estimation-victor-ya.html>. Доступ 19.04.2020.
4. Коваленко А.Н. Современные особенности бюджетирования в путевом комплексе // В кн. Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации земляного полотна железных дорог / Секция 2. Железнодорожный путь для высокоскоростного и тяжеловесного движения. М: МИИТ 2019.
5. Методика планирования расходов на текущую эксплуатацию железнодорожных путей и сооружений в зависимости от классификации железнодорожных линий, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 21 августа 2017 года № 1692р.
6. Технически обоснованные нормы времени на работы по текущему содержанию пути (в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 05.08.2015 года №1976р) (7-е издание, исправленное и дополненное) в 2-х частях.
7. Нормативы численности работников, занятых на текущем содержании железнодорожного пути, утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 26 декабря 2016 г. №2667р;
8. Порядок ведения раздельного учёта доходов и расходов субъектами естественных монополий в сфере железнодорожных перевозок, утвержденный Приказом Министерства транспорта РФ от 12 августа 2014 года № 225.
9. Нормативно-методическая документация по укрупнённому виду работ «Содержание и эксплуатация инфраструктуры железнодорожного транспорта» хозяйства пути для внедрения нормативно-целевого бюджета затрат, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 04 февраля 2014 года №266р в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 02.09.2016 г. №1806р.
10. Розенберг И. Н., Цветков В. Я. Социальная кибернетика в цифровизации транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. – 2020. – № 3(15). – Т. 3. – С. 3–14.
11. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Информационные процессы в пространстве «больших данных» // Мир транспорта. 2017. – Т.15, №6(73). – С.20-30.
12. Волков Б.А., Коваленко Н.И., Добрин А.Ю., Коваленко А.Н. Сокращение затрат на текущую эксплуатацию пути в зависимости от классификации железнодорожных линий // Путь и путевое хозяйство – 2019. – № 6. – С. 15-19.
13. Волков Б.А., Коваленко Н.И., Добрин А.Ю., Коваленко А.Н. О методике планирования расходов на текущую эксплуатацию пути // Путь и путевое хозяйство – 2018. – № 5. – С. 23-26.
14. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. – 2018. Т. 16. № 2 (75). – С.138-145.
15. Ознамец В.В. Размещение пространственных объектов с использованием теории массового обслуживания // ИТНОУ. 2018. № 3. С.95-100.
16. Методика классификации и специализации железнодорожных линий ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 23.12.2015 №3048р;
17. О комплексной оценке состояния пути. Распоряжение ОАО «РЖД» от 14 декабря 2009 года № 2536р (в редакции распоряжения ОАО «РЖД» от 20 января 2012 года № 72р).
18. Коваленко Н. И., Гринь Е. Н. Технология предотвращает угрозу // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 138–142.
19. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути, распоряжение ОАО «РЖД» от 14.11.2016 года № 2288р.
20. Коваленко, А.Н., Коваленко, Н.И., Замуховский, А.В. Организация технического обслуживания пути на ВСМ-2 // Мир транспорта – 2017. – № 6. – С. 132÷139.
21. Коваленко, А.Н., Коваленко, Н.И. Особенности текущего содержания пути в условиях обращения поездов повышенной массы // Труды XIV международной научно-технической конференции «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути». М.: МИИТ, 2016. – С 188-190.

УДК: 656.212

# Технологические и методические аспекты развития методики определения стоимости вагоно-часа

## Technological and methodological aspects of the development of the methodology for determining the cost of a wagon-hour

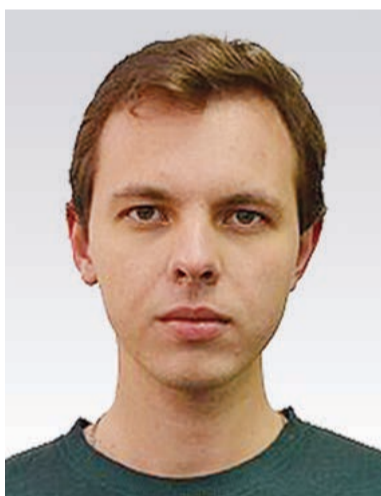
**Дятчин П.А.**, аспирант, Российский университет транспорта (МИИТ),  
E-mail: dyatchin.pavel@yandex.ru, Москва, Россия

**Dyatchin P.A.**, Postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT),  
E-mail: dyatchin.pavel@yandex.ru, Москва, Россия

**Коваленко Н. А.**, к.т.н., доцент, Российский университет транспорта (РУТ),  
E-mail: nina-alex-kov@mail.ru, Москва, Россия

**Kovalenko N.A.**, Ph.D.(Tech.), Associate Professor, Russian University of Transport (MIIT),  
E-mail: nina-alex-kov@mail.ru, Moscow, Russia

### Аннотация



Проведен анализ существующей методики определения расходной ставки «стоимость вагоно-часа». Установлено, что данная методика подходит для владельцев подвижного состава, но не для перевозчика, так как включает в себя расходы, связанные с содержанием вагонов, и не учитывает времени нахождения вагона на инфраструктуре перевозчика и возникающие с этим расходы, а также технологические особенности его работы. Рассмотрены вопросы целесообразности применения расходной ставки «стоимость вагоно-часа» для технико-экономического обоснования различных мероприятий по увеличению производительности работы подвижного состава с учётом принадлежности вагонного парка, для экономической оценки вариантов плана формирования грузовых поездов, а также для повышения обоснованности принимаемых управленческих решений.

**Ключевые слова:** транспорт, формирование поездов, вагоно-час, перевозчик, владелец подвижного состава.

### Abstract



An analysis of the existing methodology for determining the expenditure rate "the cost of a car-hour". It has been established that this methodology is suitable for owners of rolling stock, but not for the carrier, since it includes costs associated with the maintenance of wagons, and does not take into account the time spent by the car on the carrier's infrastructure and the costs arising from this, as well as the technological features of its operation. The issues of expediency of applying the expenditure rate "cost of a car-hour" for a feasibility study of various measures to increase the productivity of rolling stock, taking into account the ownership of the car fleet, for the economic assessment of the options for the formation of freight trains, as well as for improving the validity of management decisions, are considered.

**Keywords:** transport, train formation, wagon-hour, carrier, rolling stock owner.



## Введение

В результате реформирования железнодорожного транспорта изменились многие бизнес-процессы, однако системы оценки эффективности этих процессов зачастую основываются на методиках, не учитывающих особенности сегодняшнего дня. Ситуация с экономической оценкой времени нахождения вагонов на инфраструктуре перевозчика ярким тому пример.

Используемый в настоящее время метод расходной ставки «стоимость вагоно-часа» был полностью оправдан до приватизации вагонного парка. Министерство путей сообщения закупало вагоны, оно же несло расходы по их содержанию и ремонту, а в случае несоблюдения нормативного срока доставки – оплачивало штрафы.

Однако с приватизацией вагонного парка ситуация изменилась. Операторы стали закупать и ремонтировать подвижной состав самостоятельно, а на ответственности перевозчика осталось соблюдение срока доставки груза, и штрафные санкции за его невыполнение.

### **Материалы, методы, примеры.**

Существующая методика определения стоимости вагоно-часа была разработана Комплексным отделением экономики и финансов ВНИИЖТ с определением следующих основных задач, для решения которых применяется расходная ставка «стоимость вагоно-часа»:

- Оценка экономической эффективности деятельности ОАО «РЖД» в целом и его филиалов в частности;
- Оценка и прогнозирование экономической эффективности различных мероприятий.

При этом авторы [1] оговаривают, что данная ставка может применяться только для вагонов, находящихся на балансе ОАО «РЖД» и его филиалов, так как она включает расходы на амортизацию, капитальный ремонт и текущее содержание, то есть расходы, которые несёт собственник подвижного состава. Однако такие вагоны используются для собственных нужд компании и в перевозочном процессе, практически, не участвуют.

То есть данная методика подходит для владельцев подвижного состава, но не для перевозчика, так как включает в себя расходы, связанные с содержанием вагонов, и не учитывает времени нахождения вагона на инфраструктуре перевозчика и возникающие с этим расходы, а также технологические особенности его работы.

При этом расходная ставка стоимости вагоно-часа применяется при:

- экономической оценке вариантов плана формирования поездов, в особенности при определении целесообразности формирования отправительских маршрутов;
- оценке экономической эффективности различных мероприятий по развитию и реконструкции инфраструктуры, а также изменению технологии работы станций и участков.

Экономическую оценку плана формирования следует рассмотреть более подробно, так как организация вагонопотоков является одной из важнейших технологических задач функционирования железнодорожного транспорта и должна быть ориентирована на снижение эксплуатационных расходов и повышение прибыли

ОАО «РЖД», что достигается учётом экономических критериев как при расчете плана формирования грузовых поездов, так и при управлении продвижением вагонопотоков [1,2,3].

Для того, чтобы определить насколько целесообразно применять расходную ставку «стоимость вагоно-часа» для экономической оценки вариантов плана формирования грузовых поездов, а также эффективности различных мероприятий по увеличению производительности работы подвижного состава с учётом принадлежности вагонного парка, рассмотрим следующий наглядный пример.

**Пример 1.** Представим, что мы покупаем машину за 1 млн. рублей и планируем ее продать за 600 тыс. рублей через 5 лет. То есть за 5 лет мы в номинальном выражении потеряем 400 тыс. рублей. Чтобы найти, сколько мы теряем в час нужно 400 тыс. разделить на количество лет (5), на количество дней в году (365) и на количество часов в сутках (24). Получим 9,1 руб. в час. Однако, мы не откладываем каждый час 9 руб. и 10 коп., а заплатили 1 млн. рублей при покупке и получим 600 тыс. руб. при продаже. Конечно, амортизацию необходимо учитывать в себестоимости, но при экономическом анализе учитывается только денежные потоки, а в данном случае их всего два: инвестиционный и ликвидационный (рисунок 1).

Почасовая расходная ставка может учитываться в другом случае. Например, если мы оставляем машину на стоянке в центре Москвы, один час которой стоит 450 рублей, то расходная ставка и будет равняться 450 рублям в час (рисунок 2).

В тот момент, когда мы нажмём «завершить стоянку» показатель «ставка машино-часа» перестанет существовать, потому что мы не платим за аренду собственной машины. Мы платим за бензин, то есть в этом случае уместно вспомнить о стоимости «машино-километра», но никто из нас не рассчитывает стоимость проезда одного километра на машине. Мы знаем, расход бензина, знаем примерное расстояние, которое собираемся проехать – вычисляем общий объём необходимого топлива и умножаем на цену одного литра. Да, чтобы рассчитать стоимость одного «машино-километра», можно рассчитать расход бензина на один километр и умножить на цену одного литра, но никто из нас не откладывает по 3,87 рубля каждый километр, вместо этого мы несём хоть и регулярные, но одномоментные расходы на АЗС.

При этом стоимость «машино-километра» может быть полезной, если мы предположим, что на какой-то платной дороге плата взимается пропорционально километражу.

Теперь представим, что мы владельцы как раз такой магистрали, а единственная обязанность, которая у нас есть перед водителями, – это пропустить автомобиль за заранее установленное время. Нам предлагают какие-либо мероприятия по улучшению работы магистрали. Какую из вышеперечисленных ставок мы можем применить, чтобы рассчитать коммерческую эффективность предлагаемых мероприятий? Правильный ответ: никакую – так как: >>>

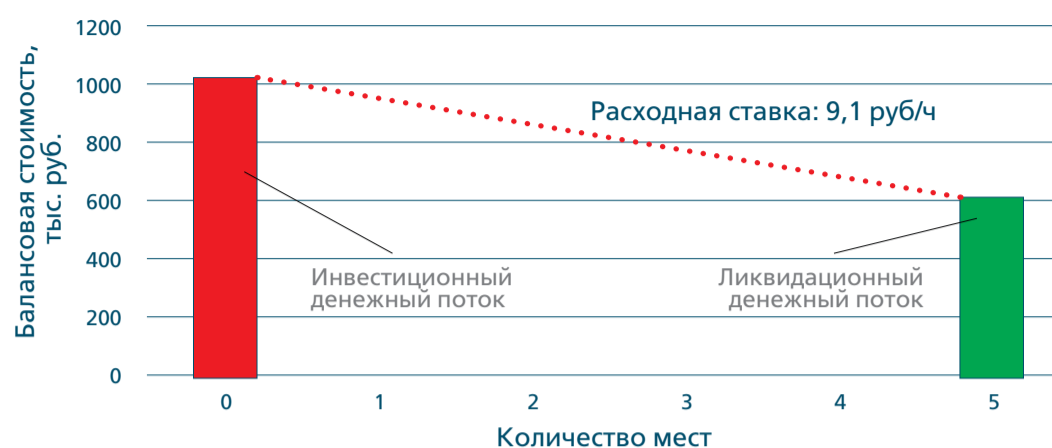


Рисунок 1. Снижение балансовой стоимости автомобиля за 5 лет



Рисунок 2. Различные расходные ставки для владельца автомобиля

- Расходная ставка машино-часа (аналог ставки «стоимость вагоно-часа»), рассчитанная на основе уменьшения стоимости автомобиля за 5 лет, в практическом плане малоинтересна даже собственнику, и тем более владельцу инфраструктуры;
- Расходная ставка машино-часа на стоянку в центре Москвы никакого отношения к нашей магистрали не имеет (аналог ставки за простой вагонов);
- Расходная ставка «машино-километр», рассчитанная по расходу бензина на один километр, также мало интересна собственнику и абсолютно бесполезна владельцу инфраструктуры (аналог вагоно-километра).
- Расходная ставка «машино-километр» на проезд по магистрали напрямую связана с владельцем инфраструктуры, но она применяется для расчета его дохода, а не расхода (аналог тарифа на перевозку).

На основании рассмотренного примера можно сделать следующие выводы:

- Ни одна из рассмотренных расходных ставок не учитывает риск возникновения у владельца инфраструктуры штрафных санкций за несоблюдение установленного срока доставки грузов.
- В расчёте экономической эффективности необходимо учитывать риски превышения общего времени нахождения автомобиля на магистрали сверх заранее установленного.

В следующем примере рассмотрим, как величина расходной ставки стоимости вагоно-часа влияет на принятие управленческих решений.

**Пример 2.** Допустим, на подразделении железной дороги среднесуточный вагонопоток 1000 вагонов, нормативный срок доставки равняется 10 суткам, фактический срок доставки – 11 суток, штрафы за несоблюдение сро-

ка доставки грузов – 7 млн руб. в год, расходная ставка – 25 руб./ваг-ч, простой транзитного вагона с переработкой на станции А – 15 часов. Имеется проект мероприятий, реализация которых позволит снизить простой транзитного вагона с переработкой на станции А до 11 часов, а фактический срок доставки – до нормативного. Реализация данного проекта требует капиталовложений в размере 100 млн. руб., а также увеличения штата работников ПТО и фонда оплаты их труда на 10 млн. руб./год. Необходимо оценить целесообразность реализации предлагаемого проекта мероприятий при использовании расходной ставки стоимости вагоно-часа (Св-ч) равной 25 руб./ваг-ч (1 вариант) и 5 руб./ваг.-час (2 вариант).

Таким образом, рассмотренный пример 2 позволяет сделать следующий вывод: величина расходной ставки «стоимость вагоно-часа» оказывает существенное влияние на принимаемые управленческие решения.

Для того, чтобы продемонстрировать необходимость учёта штрафов при расчёте экономической эффективности плана формирования и мероприятий, обратимся к ежегодной финансовой отчетности ОАО «РЖД» [3]. Согласно диаграмме изменения резервов под иски и претензии ОАО «РЖД», представленной на рисунке 3, за 2021 год их сумма составила 3,83 млрд. рублей.

**Предложения, результаты.**

Таким образом, размер средств, закладываемых для выплат по штрафам за несоблюдение сроков доставки, достаточно велик и влияет непосредственно на чистую прибыль компании. Поэтому одной из главных своих задач авторы видят в определении зависимости таких расходов от технологических особенностей работы объектов железнодорожного транспорта.

Необходимо учитывать, что при увеличении времени нахождения вагона на инфраструктуре перевоз-



Таблица 1

## Сравнение двух вариантов экономической эффективности

Параметр	Вариант с применением расходной ставки Св-ч=25 руб.	Вариант с применением расходной ставки Св-ч=5 руб.
Сокращение вагоночасов простоя на станции А, ваг-час/сут.	4000	4000
Сокращение расходов, связанных с простоем вагона на станции А, руб. в год	36 500 000	7 300 000
Сокращение расходов на оплату штрафов, руб. в год	7 000 000	7 000 000
Увеличение ФОТ работников ПТО на ст. А, руб. в год	10 000 000	10 000 000
Суммарная экономия эксплуатационных расходов, руб. в год	33 500 000	4 300 000
Капиталовложения, руб.	100 000 000	100 000 000
Срок окупаемости, лет	2,99	23,26
Результат	Принятие проекта <b>целесообразно</b>	Принятие проекта <b>нецелесообразно</b>

Резервы под иски и претензии по РСБУ, млн руб.

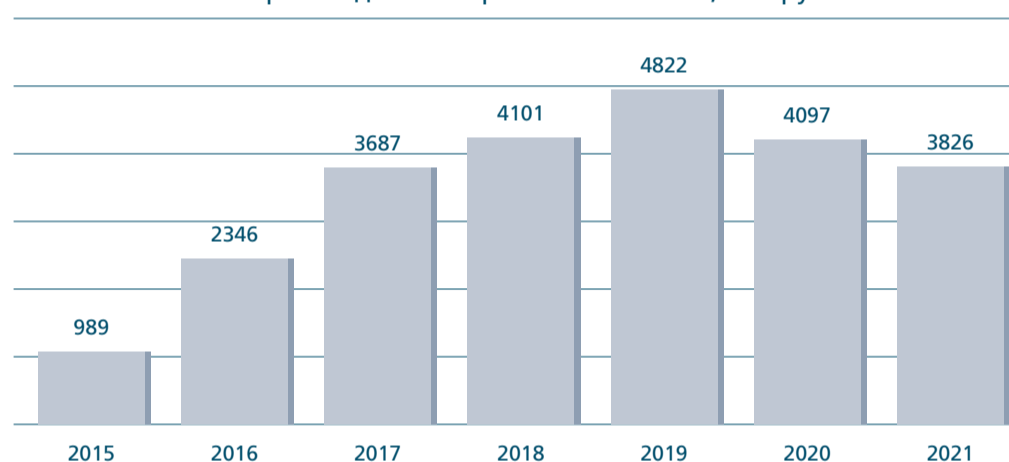


Рисунок 3. Динамика изменения резервов ОАО «РЖД» под иски и претензии по РСБУ

чика возрастает не только риск нарушения сроков доставки, но и риск возникновения дополнительных расходов в других элементах железнодорожного транспорта. Например, при увеличении простоя вагонов в парке приема, растет вероятность того, что все пути парка окажутся занятыми и прибывающие поезда будут задержаны «по неприему» у входных сигналов, что приведет к дополнительным эксплуатационным расходам на работу поездных локомотивов и оплату труда работникам локомотивных бригад [4, 5].

Однако стремление любой ценой сократить простой вагона чревато неоправданными капитальными и эксплуатационными расходами. Например, для сокращения простоя транзитных вагонов без переработки можно предложить увеличить количество работников бригад ПТО. В этом случае пропускная способность одной отдельной станции может увеличиться, вместе с этим увеличатся и расходы на заработную плату сотрудников, а расходы на оплату штрафов могут не сократиться или сократиться незначительно, так как прилегающие участки или станции не смогут поддержать увеличившуюся интенсивность вагонопотока.

Для нахождения рационального и экономически обоснованного решения и установления эффективности тех или иных мероприятий (а оптимальный план формирования поездов тоже можно отнести к мероприятиям) необходимо определить основной критерий эффективности инвестиционного проекта, вычисляющийся по формуле:

$$NPV = \sum_{k=1}^n \frac{(E_{w0} - E_{w1}) + (E_{э0} - E_{э1})}{(1-d)^k} - I_0 > 0, \quad (1)$$

где  $(E_{w0} - E_{w1})$  – сокращение расходов на оплату штрафов, руб.;  $(E_{э0} - E_{э1})$  – сокращение эксплуатационных расходов, руб.;  $(E_{w0} - E_{w1}) + (E_{э0} - E_{э1})$  – чистый операционный денежный поток ( $CFO_k$ );  $I_0$  – инвестиционные затраты, руб.

Наибольшую сложность при расчете представленного критерия представляет чистый операционный денежный поток, определяемый суммой денежных потоков, возникающих непосредственно на инфраструктуре перевозчика и денежных потоков, направленных на оплату штрафов за нарушения нормативного срока доставки.

В зависимости от величин заявленных денежных потоков возможно несколько сценариев их распределения: >>>

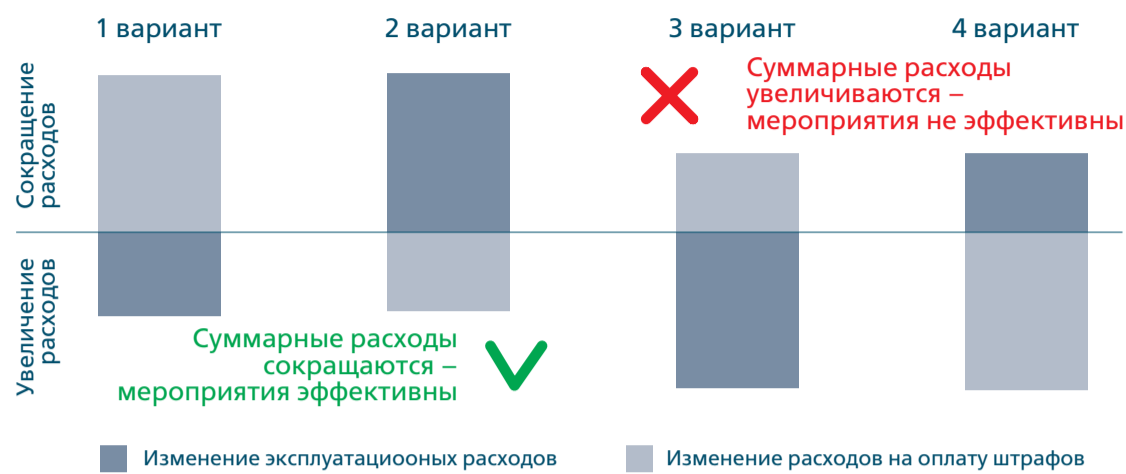


Рисунок 4. Возможные варианты изменений расходов на оплату штрафов и эксплуатационных расходов

- 1) Сокращение расходов на штрафы больше чем увеличение эксплуатационных расходов:

$$\begin{cases} (E_{ш0} - E_{ш1}) > 0 \\ (E_{э0} - E_{э1}) < 0 \\ |E_{ш0} - E_{ш1}| > |E_{э0} - E_{э1}| \end{cases}, \quad (2)$$

- 2) Увеличение расходов на штрафы меньше чем сокращение эксплуатационных расходов:

$$\begin{cases} (E_{ш0} - A_1) < 0 \\ (E_{э0} - C_1) > 0 \\ |E_{ш0} - E_{ш1}| < |E_{э0} - E_{э1}| \end{cases}, \quad (3)$$

- 3) Сокращение расходов на штрафы меньше чем увеличение эксплуатационных расходов:

$$\begin{cases} (E_{ш0} - A_1) > 0 \\ (E_{э0} - C_1) < 0 \\ |E_{ш0} - E_{ш1}| < |E_{э0} - E_{э1}| \end{cases}, \quad (4)$$

- 4) Увеличение расходов на штрафы больше чем сокращение эксплуатационных расходов:

$$\begin{cases} (E_{ш0} - E_{ш1}) < 0 \\ (E_{э0} - C_1) > 0 \\ |E_{ш0} - E_{ш1}| > |E_{э0} - E_{э1}| \end{cases}, \quad (5)$$

Согласно представленным неравенствам, в первых двух случаях проект может быть эффективным, а в других двух – нет. На рисунке 4 приводится наглядное сравнение 4 вариантов.

Размер штрафа за несоблюдение нормативных сроков доставки груза зависит от времени задержки, то есть:

$$\begin{cases} E_{ш} = 0, \text{ если } \tau_{\phi} \leq \tau_n \\ E_{ш} = (\tau_{\phi} - \tau_n) \cdot e \cdot E, \text{ если } \tau_{\phi} > \tau_n \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\tau_{\phi}$  – фактический срок доставки, сут.;  $\tau_n$  – нормативный срок доставки, сут.;  $e$  – ставка штрафов за каждые сутки доставки;  $E$  – плата за перевозку, руб.

При этом размер штрафов не может превышать размер платы за перевозку. Фактический срок доставки можно определить по формуле:

$$\tau_{\phi} = \frac{t_M^n + \frac{l_{\phi}}{V_{уч}} + \sum_{i=1}^n t_{mpi} + t_M^s}{24}, \quad (7)$$

где  $t_M^n$  – простой вагона на станции погрузки, ч;  $l_{\phi}$  – фактическое расстояние, км;  $V_{уч}$  – средняя участковая скорость по пути следования, км/ч;  $\sum_{i=1}^n t_{mpi}$  – сумма простоя вагона на попутных технических станциях, ч;  $t_M^s$  – простой вагона на станции погрузки, ч.

Также необходимо сказать о том, что себестоимость переработки вагона не всегда коррелирует с общими расходами железной дороги. Например, при одинаковом простое себестоимость вагона, который расформировали через горку, будет существенно выше, чем для вагона в составе брошенного поезда, который находится на путях. Однако, возможная задержка в доставке груза, а следовательно, и размер штрафов, в обоих случаях будут одинаковыми. Обратная ситуация, когда вагоны с одинаковой себестоимостью переработки имеют разное время простоя и, как следствие, размеры штрафов.

Однако ситуация осложняется тем, что есть множество вариантов продвижения вагонопотока, а сам он неоднороден по своей структуре: разные виды отправок, разный подвижной состав и др. Помимо этих факторов необходимо учитывать и взаимное влияние вагонопотоков друг на друга. Так, приоритет в расформировании/окончании формирования вагонов одной категории увеличивает простой всех остальных.

Таким образом, при расчете плана формирования одного руководствоваться одним критерием минимальных затрат вагоно-часов недостаточно, необходимо учитывать возможные финансовые потери.

Как было сказано выше, существуют две категории таких потерь: эксплуатационные расходы на попутных технических станциях и штрафы за несоблюдение срока доставки, то есть общие затраты можно рассчитать по формуле:

$$E_{общ} = E_{э} + E_{ш} \quad (8) \quad \ggg$$



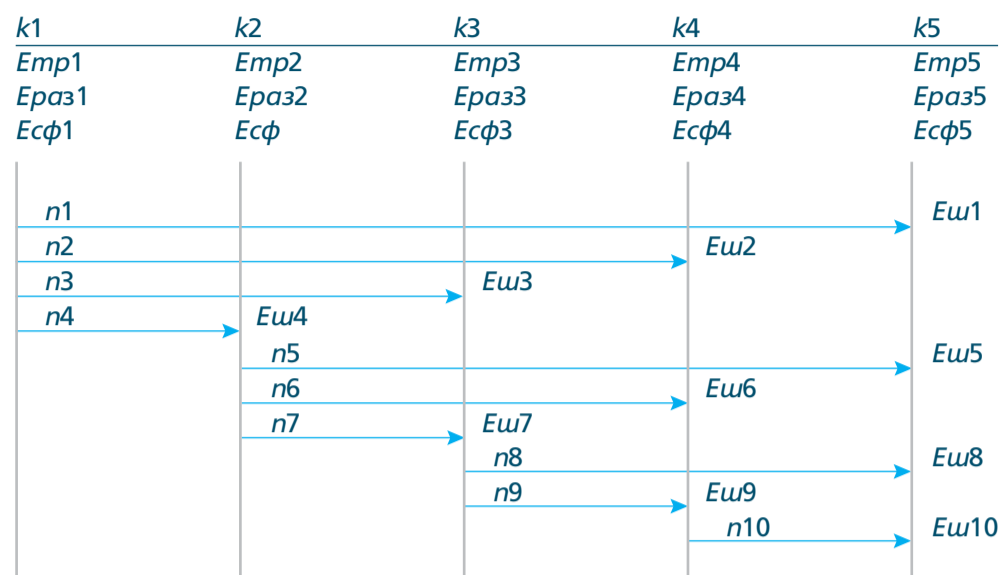


Рисунок 5. Пример расчётного направления

Рассмотрим более подробнее каждую из них.

Расходы, возникающие на попутных технических станциях, в первую очередь сортировочных и участковых, делятся на зависящие от величины перерабатываемого вагонопотока и независящие. Например, расходы на топливо для маневрового локомотива будут являться зависящими, а расходы на оплату локомотивных бригад – независящими. При этом зависящие расходы нужно считать отдельно для транзитных поездов, разборочных и поездов своего формирования (рис. 5).

$$E_{\Sigma} = \sum_{j=0}^k E_{H3j} + \sum_{j=0}^k E_{3j}, \quad (9)$$

где  $E_{H3j}$  – эксплуатационные независящие расходы на  $j$ -ой станции, руб.;  $E_{3j}$  – эксплуатационные зависящие расходы на  $j$ -ой станции, руб.

$$\sum_{j=0}^k E_{3j} = \sum_{j=0}^k E_{мпj} \cdot N_{мпj} + \sum_{j=0}^k E_{разj} \cdot N_{разj} + \sum_{j=0}^k E_{сфj} \cdot N_{сфj}, \quad (10)$$

где  $E_{мпj}, E_{разj}, E_{сфj}$  – эксплуатационные зависящие затраты, приходящиеся на один транзитный, разборочный, своего формирования поезд на  $j$ -ой станции, руб.;  $N_{мпj}, N_{разj}, N_{сфj}$  – среднесуточное количество транзитных, разборочных, своего формирования поездов на  $j$ -ой станции, руб.

Размер штрафов определяется по каждой вагонной струе:

$$E_{w} = \sum_{i=0}^n E_{wi} \quad (11)$$

Учитывая, что в одной вагонной струе следуют вагоны разного типа, вида отправки, погруженные различными грузами и другие факторы, приводящие к тому, что груженные вагоны одинакового назначения имеют разную стоимость перевозки, следовательно, и размер штрафов необходимо считать отдельно с разделением вагонопотока на категории с учетом влияющих факторов.

Этот же принцип можно применять и для расчета экономической эффективности различных мероприятий организационного и технологического характера. Для более точной оценки необходимо корректировать и план формирования грузовых поездов, так как в результате реализации рассматриваемых мероприятий могут из-

мениться расходы по какой-то станции, простой вагона на станции, а следовательно, и оптимальный план формирования поездов (ОПФП) будет другим.

## Выводы

Экономическая оценка различных организационно-технологических мероприятий, а также определение ОПФП с использованием расходной ставки «стоимость вагоно-часа», рассчитанной по существующей методике, не может гарантировать обоснованность получаемых результатов и объективность принимаемых управленческих решений, так как ее величина учитывает расходы, которые несёт собственник, и не учитывает риски перевозчика.

Определенная по существующей методике расходная ставка «стоимость вагоно-часа» не учитывает технологические особенности работы перевозчика и теряет для него практический смысл, а игнорирование этой расходной ставки не позволяет объективно оценивать эффективность работы железных дорог, инвестиционных проектов, а также ведёт к неверным управленческим решениям. ■



## Список литературы

1. Бородин А.Ф. Комплексные решения проблем развития инфраструктуры и перевозочных ресурсов. //Мир транспорта.- 2017.- Т.15, №1.-С.6-17.
2. Бородин А.Ф., Панин В.В. Автоматизированная система прогноза ресурсов сети.// Железнодорожный транспорт.- 2017.- №4.- С.18-27.
3. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД», утвержденные распоряжением ОАО «РЖД» от 16 октября 2006 г. М.: Техинформ, 527 с.
4. Прокофьева Е.С. Стоимостная оценка вагоно-часа с учетом рисков в производственной деятельности ОАО «РЖД»//Экономика железных дорог. 2018.№4. С.19-28.
5. Бородин А.Ф., Панин В.В., Максимова Е.С., Лаханкин Е.А. Техничко-экономические модели управления перевозочным процессом //Железнодорожный транспорт. 2021. № 7. С.23-27.

# Контакты

## Редакция

8 (916) 433-60-72  
journal@vniias.ru

## АО «НИИАС»

Россия, Москва, 109029,  
Нижегородская ул. 27, стр 1

+7 (495) 967 77 06

info@vniias.ru