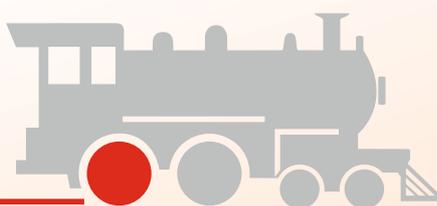


сетевое издание

# НАУКА И ТЕХНОЛОГИИ

ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ



ЕЖЕКВАРТАЛЬНОЕ СЕТЕВОЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ИЗДАНИЕ

## В ВЫПУСКЕ

### СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

РОЗЕНБЕРГ И.Н., ЦВЕТКОВ В.Я.

«ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВТОНОМНОГО ПОЕЗДА»

### ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ НА ТРАНСПОРТЕ

БОЖЕНЮК А.В., БЕЛЯКОВ С.Л., КОСЕНКО О.В.

«МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ  
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ»

РОГОВ И.Е.

«КОНСТРУКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ»

КОЗЛОВ А.В.

«СУБСИДИАРНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ»

### ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ НА ТРАНСПОРТЕ

ОЗНАМЕЦ В.В.

«ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ВОЗДУШНОЙ СЪЕМКЕ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ»

АНДРЕЕВА О.А.

«ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ»

БУЧКИН В.А.

«ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО В ТРАНСПОРТНОЙ СФЕРЕ»

### ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

ОХОТНИКОВ А.Л., ЦВЕТКОВ В.Я.

«ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЕЗДОМ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НА СЕТЕВОЕ  
РАЗВИТИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ»

САМОЙЛОВ Л.К., ЗАЛИЛОВ Э.Ф., БЕЛЯКОВА М.Л., ЗУБКОВ С.А.

«ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЩИТНОГО КОНТЕКСТА В ПРОЦЕССЕ СИТУАЦИОННОГО АНАЛИЗА»

### ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

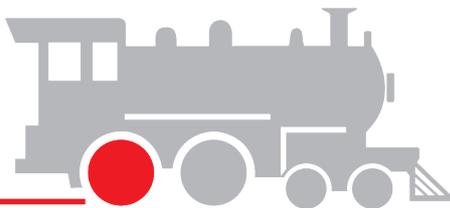
КОВАЛЕНКО Н.И., КОВАЛЕНКО Н.А.

«ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО ВЫПРАВКЕ ПУТИ  
ОДИНОЧНЫМИ ПУТЕВЫМИ МАШИНАМИ»

№ 2

Июнь 2020





### Стратегия развития железных дорог

- Розенберг Игорь Наумович, Цветков Виктор Яковлевич* 3  
Тенденции развития автономного поезда

### Интеллектуальные системы и технологии на транспорте

- Боженюк Александр Витальевич, Беляков Станислав Леонидович,  
Косенко Олеся Валентиновна* 13  
Модель управления транспортно-распределительной системой в условиях неопределенности

- Рогов Игорь Евгеньевич* 21  
Конструктивное моделирование объектов транспортной инфраструктуры

- Козлов Александр Вячеславович* 34  
Субсидиарность транспортных кибер-физических систем

### Геоинформационные технологии и системы на транспорте

- Ознамец Владимир Владимирович* 45  
Геоинформационное моделирование при комплексной воздушной съемке железнодорожного пути

- Андреева Ольга Александровна* 57  
Пространственное моделирование объектов транспортной инфраструктуры

- Бучкин Виталий Алексеевич* 70  
Геоинформационное пространство в транспортной сфере

### Цифровые методы на железнодорожном транспорте

- Охотников Андрей Леонидович, Цветков Виктор Яковлевич* 76  
Влияние системы управления поездом в автоматическом режиме на сетевое развитие железных дорог

- Самойлов Леонтий Константинович, Залилов Эльдар Фаридович,  
Белякова Марина Леонтьевна, Зубков Сергей Александрович* 84  
Применение защитного контекста в процессе ситуационного анализа

### Организация работ и безопасность движения на транспорте

- Коваленко Николай Иванович, Коваленко Нина Александровна* 94  
Особенности выполнения работ по выправке пути одиночными путевыми машинами



УДК: 656, 004.89, 656.052

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АВТОНОМНОГО ПОЕЗДА

- Розенберг И.Н.** д.т.н., профессор, Научный руководитель, АО «НИИАС»,  
E-mail: I.Rozenberg@vniias.ru, Москва, Россия
- Цветков В.Я.** д.т.н., профессор, зам. руководителя Центра, АО «НИИАС»,  
E-mail: cvj2@mail.ru, Москва, Россия
- Аннотация.** В статье приведен аналитический обзор развития технологии автономного поезда. Исследования показали, что модель автономного поезда не является полностью «автономной», а является субсидиарной. Феномен автономный поезд можно рассматривать как сложную организационно-техническую систему, которая исследуется методами моделирования и системного анализа. Большое значение для автономного поезда имеет современное программно-аппаратное обеспечение, в первую очередь обеспечивающее техническое зрение в различных диапазонах.
- Ключевые слова:** транспорт, управление, автономный поезд, кибер-физические системы, субсидиарность, ситуационная модель, ситуационный анализ, беспроводные сети.

## TRENDS FOR THE DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS TRAIN

- Rosenberg I.N.** D.ofSci.(Tech), Professor, Scientific director, JSC «NIIAS»,  
E-mail: I.Rozenberg@vniias.ru, Moscow, Russia
- Tsvetkov V.Ya.** D.ofSci.(Tech), Professor, deputy head of Center, JSC "NIIAS",  
E-mail: cvj2@mail.ru, Moscow, Russia
- Annotation.** The article provides an analytical overview of the development of autonomous train technology. Studies have shown that the autonomous train model is not completely “autonomous”, but is subsidiary. The phenomenon of an autonomous train can be considered as a complex organizational and technical system, which is studied by modeling and system analysis methods. Modern software and hardware is of great importance for an autonomous train, primarily providing technical vision in various ranges.
- Keywords:** transport, operation, autonomous train, cyber-physical systems, subsidiarity, situational model, situational analysis, wireless networks.

### Введение

Идея автономного поезда существовала с 1993 [1]. Однако первоначально главным в этой концепции было не управление, а распознавание. В другой постановке идеи автономного поезда отражены в работах [2-4]. Развитие автономных транспортных систем является основным стратегическим фактором конкурентоспособности во всех секторах транспорта. С одной стороны, развитие технических и компьютерных возможностей является мотивацией для владельцев транспортных средств рассматривать достижения в области интеллектуальных систем [5, 6] и коммуникационных технологий (ИКТ), встроенных систем и транспортных кибер-физических систем [7, 8] как возможности для разработки автономных транспортных систем. С другой стороны, экономические и социальные ограничения, а также экологические

ограничения действуют в качестве «движущих сил», побуждая этих промышленников и операторов флота разрабатывать и эксплуатировать более безопасные, более надежные и доступные транспортные системы с меньшим воздействием на окружающую среду, включая более низкий уровень потребления энергии. В дополнение к этой ситуации, сообщества (такие как города) сталкиваются с более высокой урбанизацией и демографической эволюцией, приводящей к все более насыщенной транспортной инфраструктуре. Следовательно, современные технологии управления транспортном достигают своих пределов, и крупные игроки ищут прорывные концепции в управлении транспортом и транспортировке. Автономные транспортные системы рассматриваются среди возможных решений [4] повышения эффективности и удовлетворения требованиям современности в экологии и транспортировке.

### **Особенности и задачи при создании автономного поезда.**

Автономные системы становятся все более и более важными в современном транспортном секторе. Они часто работают в динамических средах, в которых непредсказуемые события могут произойти в любое время. Эти события могут повлиять на безопасную эксплуатацию транспортных средств, требуя высокоэффективного программного обеспечения управления технологии рассуждать и реагировать на их появление. Важнейшим параметром эффективности управления и транспортировки является оперативность, поскольку транспортные средства часто работают на высокой скорости. Большой вклад в развитие автономных систем вносит программное обеспечение [9]. Именно оно играет важную роль в обеспечении динамического управления автономным поездом. Это достигается с помощью идеологии кибер-физических систем, включающих программную среду самоадаптации, предназначенной для автономных поездов [9].

Следует отметить что разработка концепции автономного поезда началась [2] с разработки технологий бортовой компьютерной системы автономного поезда. Эта технология автономной децентрализованной системы управления поездом, которая осуществляет перевозки с высокой плотностью и безопасностью.

При эксплуатации автономного поезда возникает необходимость разработки специальных технологий, таких как точное трехмерное зрение для обнаружения препятствий для автономного поезда [10]. Система выдает данные о глубине в режиме реального времени из стереокамеры с базовой линией 1,4м, чтобы выполнить требования к точности для надежного обнаружения препятствий 80 м впереди. В существующем высокоскоростном режиме было применено несколько модификаций, чтобы значительно улучшить общую производительность системы. Маски иерархического стереосогласования или информационного соответствия [11] образа и наблюдаемого объекта повысили качество данных о глубине зрения таким образом, что коэффициент обнаружения препятствий увеличился с 89,4% до 97,75%, тогда как уровень ложноположительных результатов обнаружения был сохранен на значении 0,25%. Результаты оценки были получены из обширных реальных данных испытаний [10]. В дополнении к обработке информации в видимом диапазоне в автономных поездах применяют инфракрасный (тепловой диапазон) для автономной системы обнаружения препятствий при движении поездов [12]. Эта система особенно эффективная в условиях слабого освещения и в ночных условиях. Ее основой является тепловизионная камера со специальным алгоритмом обработки и трансформации изображения теплового диапазона в видимый диапазон. Развитием систем компьютерного зрения является технология глубокого обучения в железнодорожной сфере для

автономной остановки поездов [13].

Еще одной задачей является высокоточное позиционирование автономного поезда. Она содержит две комплементарные [14] друг другу подзадачи. Первая состоит в оценке неопределенности при позиционировании поездов, в частности, с гибридной GNSS [15]. Вторая задача состоит в точном позиционировании поездов при высокоскоростном движении и применении анти-помех способность обеспечить точность и надежность поезда позиционирования за счет использования спутниковых GNSS и инерциальных систем INS, интегрированных в общий комплекс [16].

По существу, автономный поезд является моделью субсидиарного управления [17, 18] с переносом большей части принятия решений управления из центра управления на борт поезда. В силу этого возрастает потребность и значение технологий обеспечения бортовой компьютерной системы автономного поезда [19]. Наличие субсидиарности создает необходимость переключения управления с бортовой системы на центральную или обратно.

Решение и моделирование такой задачи осуществляется с применением полуавтономного робота [20]. Были проведены исследования условно названного «полуавтономного» коммуникационного робота на железнодорожной станции. Использовался специальный механизм запроса оператора для достижения полуавтономной работы робота связи, работающего в реальных условиях. Механизм запроса оператора автономно обнаруживает ситуации, с которыми робот не может справиться самостоятельно. В этих случаях человек-оператор берет на себя управление роботом. Такой подход дает полуавтономным роботам возможность естественного функционирования с опорой на человеческий интеллект. Эта модель применима к автономному поезду и помогает накопить информацию субсидиарного взаимодействия «человек – подвижная система».

В исследовании [21] система состоит из человекоподобного робота и многочисленных датчиков. Робот имеет такие основные коммуникативные поведения, как приветствие и руководство по маршруту. Результаты эксперимента показали, что запрашивающий оператор механизма правильно запрашивал помощь оператора в 85% необходимых ситуаций; оператор должен был контролировать только 25% времени эксперимента в полуавтономном режиме с помощью роботизированной системы, которая успешно управляла 68% пассажиров. В то же время, это испытание дало возможность собрать пользовательские данные для дальнейшего развития естественного поведения таких роботов, работающих в реальных условиях. По существу, эта модель является обучающей для транспортной кибер-физической системы. Она может быть рассмотрена как гибридная кибер-физическая система «человек – ТКФС»

Несмотря на автономность в поезде присутствует человек, контролирующий движение, и для автономного поезда возникает проблема «человек – машина», переходящая в плоскость «человек - встроенное компьютерное оборудование» [21]. Эта проблема имеет качественно иное значение при высоко скоростном движении, так реакции человека начинает не хватать для принятия оперативных решений. Это обстоятельство приводит к разработке новых требований и технологий не только автономных система контроля движения поездов, но новых методов оперативного контроля цепей [22]. Как оперативная поддержка принятия решений центром управления и человеком машинистом предлагается способ обеспечения эксплуатационной безопасности автономного поезда при поиске случайных сценариев [23]. Суть идеи, описанной также в [23], состоит в том, что от точечного управления по текущему положению транспортного средства (которое можно изобразить точкой на графике движения) при

движении поезда переходят к интервальным моделям, которые заранее готовят при известной пространственной модели трассы. Для скоростного движения обозримому моменту времени соответствует интервал движения. Аналогом может служить смазанное изображение при съемке движущего объекта. Его размер по направлению движения может быть значительно больше размера неподвижного объекта.

Переход к сценарному (сложное управление) или интервальному (более простое управление) требует не только создания сценариев или интервальных моделей управления, но и систематизацию, классификацию и хранение этих сценариев в специальной базе данных. Такая база данных должна периодически обновляться и возникает проблема обновления или регенерации [24] такой базы данных. Термин «регенерация» более уместный поскольку в это м случае имеет место не замена одних данных другими, но и одновременная замена технологий применения этих данных и согласование новых технологий и новых сценариев с теми, которые сохраняются после обновления или регенерации.

Автономный поезд и скоростное движение выдвигают новые требования к коммуникационным технологиям, информационным взаимодействиям [25] «центр управления - поезд», «поезд - поезд» и обмену информацией. Одним из решений этой задачи является технология повышение скорости передачи на основе гибридного предварительного кодирования «поезд – поезд». За рубежом такие технологии идентифицируют как T2T, что означает «train to train» или «transport to transport». Она означает связь между подвижными объектами. Решение, предлагаемое в [26], предположительно ускоряет обмен данными между поездами (T2T), повышает эффективность работы поездов и сократит стоимость жизненного цикла при строительстве городской железнодорожной транзитной системы.

Передача осуществляется в области миллиметровых волн и при использовании системы множественных входов и множественных выходов (MIMO) для повышения надежности и пропускной способности связи T2T. Благодаря применению гибридного предварительного кодирования на приемопередатчиках T2T стоимость конструкции системы и энергопотребление значительно снижаются при одновременном удовлетворении требований спектральной эффективности и отношения сигнал / шум (SNR). Результаты моделирования показывают, что производительность предлагаемого прекодера с ограничением спектрального диапазона приближается к производительности при неограниченном цифровом прекодере. По сравнению с аналоговой схемой предварительного кодирования, предложенная технология позволяет добиться как минимум 7-кратного увеличения спектральной эффективности [26].

Автономный поезд и автономное вождение требует разработки специального программного обеспечения, которое требует проведения специального тестирования [27]. Автономный поезд основан на системе автоматического управления поездом (АТС) [10], состоящей из трех функциональных уровней: Автоматическая защита поезда (АТП), Автоматическая эксплуатация поезда (АТО) и Автоматическое наблюдение за поездом (АТС).

Если сравнивать автономный поезд с цифровой железной дорогой [28-30] и кибер-физическими системами [7, 8], то его идеология ближе к транспортным кибер-физическим системам, чем к цифровой железной дороге.

Следует отметить, что развитие высокоскоростного движения также находит отражение в технологии автономного поезда. Одним из вариантов применения данной технологии в высокоскоростном движении является распределенное оптимальное управление для нескольких высокоскоростных поездов [31].

### **Технологии коммуникационного управления автономным поездом.**

В настоящее время системы управления движением поездов переходят от централизованного управления и централизованных коммуникаций к бортовым коммуникациям и бортовому управлению. Новейшая система управления поездом, система СВТС [32], обладает высокой эффективностью для интервального контроля, основанного на двусторонней радиосвязи между бортовыми и путевыми системами. Communications-based train control (СВТС) это система железнодорожного сигнального управления, которая использует телекоммуникации между поездом и путевым оборудованием для управления движением и контроля инфраструктуры. С помощью систем СВТС определяют точное местоположение поезда более точно, чем с помощью традиционных систем сигнализации. Это приводит к более эффективному и безопасному способу управления железнодорожным движением. Метро и другие железнодорожные системы способны улучшать трафик, сохраняя безопасность.

Система СВТС является «непрерывной, автоматической управлением движением поездов система, использующая определение поезда местоположения высокого разрешения, независимо от рельсовых цепей; непрерывная, с высокой пропускной способностью и передачей данных, а также транспортную инфраструктуру типа транспортных коридоров способная реализовать автоматическую защиту поезда (АТР), а также дополнительные функции автоматического управления поездом (АТО) и автоматического контроля поезда (АТС) », как определено в стандарте IEEE 1474 [33].

Транспортная система включает центром управления, который осуществляет многоцелевое управление [34]. При этом приходится сталкиваться с ситуацией, при которой количество входных поездов ограничено из-за циклических информационных потоков управления между бортовыми и диспетчерскими системами. Это является ограничением пропускной способности улучшение продвижения вперед ограничено. В работе [32] предлагается решение проблемы управления интервалом между поездами и распределенной блокировкой для поезда для автономной системы управления движением поездов за счет специально разработанного алгоритма. Автономное управление движением поезда осуществляется за счет управления интервалом между поездами посредством прямой связи T2T (между поездами) и T2G (между поездами и приборами на пути). Такая возможность появляется при создании единой среды «транспорт- инфраструктура» вместо традиционного управления от диспетчерских систем управления. Предложенный алгоритм блокировки задает режим работы семафора из бортового устройства подвижного объекта с использованием уникального ключа для общего ресурса. При этом предусмотрен субсидиарный переключатель «диспетчерский центр- бортовое устройство».

Результаты моделирования [32] показали, что предлагаемая автономная система управления движением поезда улучшает характеристики интервального управления, и безопасное управление поездом возможно с помощью упрощенного алгоритма блокировки путем сравнения предложенного алгоритма распределенной блокировки, ориентированного на поезд, и различных типов логики блокировки, выполняемой в существующих системах блокировки.

Основная цель СВТС заключается в увеличении интенсивности трафика за счет уменьшения временного интервала (Headway) между поездами. Традиционные системы сигнализации обнаруживают поезда в отдельных участках пути, называемых «блоками», каждый из которых защищен сигнальными устройствами, препятствующими входу поезда в занятый блок. Поскольку каждый блок является фиксированным участком пути, эти системы называются

системами фиксированных блоков. В системе СВТС с подвижным блоком защищенная секция для каждого поезда представляет собой «блок», который движется вместе с ним и движется позади него и обеспечивает непрерывную передачу точного положения поезда по радио, индуктивной петле и т. д. [35]. Одна из первых систем СВТС была открыта фирмой Bombardier в аэропорту Сан - Франциско в феврале 2003 г.

Как всегда, в случае с применением новой технологии в начале возникали некоторые проблемы, главным образом из-за аспектов совместимости [36] и комплементарности. Однако с тех пор произошли соответствующие улучшения, и в настоящее время надежность систем радиосвязи значительно возросла.

Важно подчеркнуть, что не все системы, использующие технологию радиосвязи, считаются системами СВТС. Эта технология включает только принцип на основе движущегося блока (истинный движущийся блок или виртуальный блок [37]), поэтому не зависит от пути движения поездов. В технологии СВТС разделяют ботовое оборудование и диспетчерское оборудование.

Системы СВТС - это современные системы железнодорожной сигнализации, которые могут использоваться на городских и пригородных железнодорожных линиях. Для магистральных линий подобной системой может быть Европейская система управления железнодорожным движением ERTMS уровня 3.

В современных системах СВТС бортовое оборудование поезда непрерывно вычисляет и сообщает о положении поезда по радио на оборудовании, расположенном вдоль линии (рис.1). Эти расчеты включают, помимо прочих параметров, точное положение, скорость, направление движения и тормозной путь.

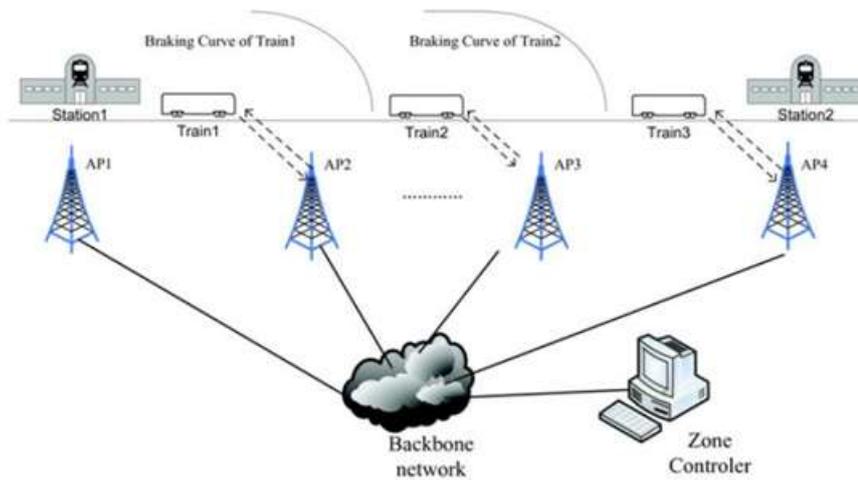


Рисунок 1. Схема функционирования технологии СВТС

Информация, получаемая при первичных расчетах, позволяет рассчитать место, потенциально занимаемое поездом на пути. Эта информация также позволяет диспетчерскому оборудованию определять точки на линии, которые никогда не должны пересекаться другими поездами на этой трассе. Эти точки сообщают другим поездам, чтобы поезда автоматически и непрерывно регулировали свою скорость, сохраняя при этом требования безопасности и комфорта (рис.2). Таким образом, поезда непрерывно получают информацию о расстоянии до предыдущего поезда, а затем могут соответствующим образом корректировать безопасное расстояние  $L_s$  (см. рис.2).

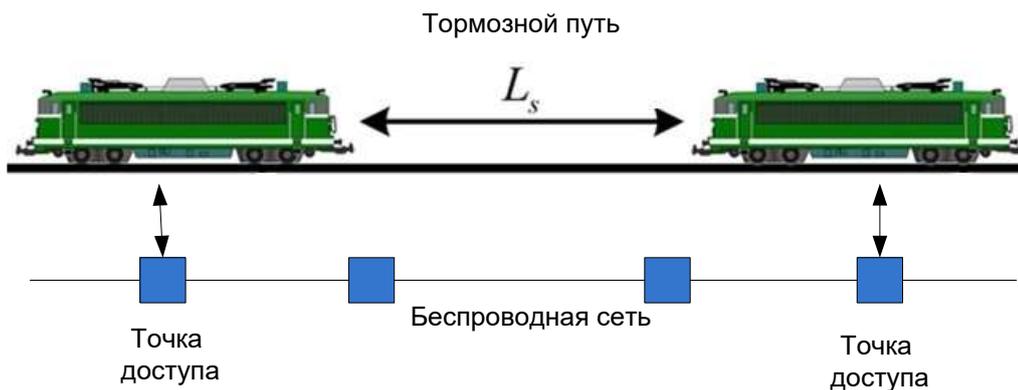


Рисунок 2. Схема коммуникаций при СВТС

В системе подвижных блоков, как показано на рис. 2, положение поезда и его кривая торможения непрерывно рассчитываются поездами, а затем передаются по радио на путевое оборудование.

Таким образом, диспетчерское оборудование способно устанавливать охраняемые зоны, каждая из которых называется зоной ограничения движения (LMA), вплоть до ближайшего препятствия (на рисунке 2 хвост предшествующего поезда впереди). Управление движением (МА) - это разрешение для движения поезда в определенное место в пределах ограничений инфраструктуры и с контролем скорости [38]. Конец полномочий - это место, в которое поезду разрешено движение и где целевая скорость равна нулю. Конец движения - это место, в которое поезду разрешено движение согласно МА. При передаче МА это конец последнего раздела, указанного в МА [38].

#### Ситуационный анализ в автономном управлении.

При автономном управлении управляющее устройство должно оперативно давать оценку ситуации, в которой находится автономный поезд. Простейшей оперативной оценкой является оценка ситуации по признакам различия с целевой ситуацией - оппозиционным признакам [39]: штатная - не штатная ситуация. Другой оценкой ситуации является оценка ситуации по признакам сходства текущей ситуации с целевой: степень комплементарности.

Одним из средств оценки ситуации являются спутниковые технологии и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и технологии БПЛА [40]. Они дополняются данными с мобильных комплексов, включающих в себя комплекты телевизионных камер различного назначения, аппаратуру обработки видеоизображения и передачи информации в ситуационный центр при помощи разных каналов связи. Это позволяет повысить достоверность информации, поступающей в ситуационный центр, определить оптимальные варианты расположения восстановительных средств с учетом местных условий, и наметить пути их подвода.

Прагматическое значение ситуационного моделирования и управления состоит в разработке методов и технологий анализа и управления, снижающего нагрузку на ЛПР. Это направление использует информационные модели, которые легко поддаются компьютерной обработке. Рис.2 это фактически изображение информационной ситуации. Автономный поезд для анализа и управления использует пространственную информацию. В силу этого явно или неявно автономный поезд опирается на методы геоинформатики. В силу этого ситуационное

моделирование в управлении транспортом использует геоинформационное ситуационное моделирование [41].

### **Заключение**

Анализ показывает, что автономный поезд можно рассматривать как модель и как сложную организационно-техническую систему. С позиций управления, системы автономного поезда являются новыми моделями управления, предназначенными для тех трасс, которые оборудованы беспроводными сетями. Эти системы обеспечивают непрерывное управление автономным поездом, а также улучшенные эксплуатационные возможности. Технологической основой автономного поезда являются технологии СВТС. Обычные системы сигнализации/управления, которые не используют подход СВТС, обычно называются фиксированными блок-системами. На таких платформах расстояние между поездами вычисляется на основе секций с фиксированной длиной. Проблемой с этими системами является ограниченное количество поездов, которые могут двигаться на линии в одно время.

Технология СВТС преодолевает эту проблему, используя принцип движущегося блока: минимальное расстояние между последовательными поездами рассчитывается не на основе фиксированных секций, а с учетом расстояния до задней части предыдущего поезда. Это повышает эффективность автономного поезда. Автономный поезд опирается на модель ситуации, которая является подвижной или «плавающей». Важным является то обстоятельство, что модель автономного поезда не является полностью «автономной», а является субсидиарной. В силу этого в процессе ее функционирования происходит вариация между комплементарностью и субсидиарностью. Модель ситуации имеет варибельную структуру, отчего ее удобно использовать для описания вариативных явлений и процессов.

Недостатком технологии автономного поезда является обязательное обеспечение трассы беспроводной сетью. Для сравнения, на модели цифровой железной дороги используют радиорелейные линии и радиорелейное информационное пространство [42]. Другим методическим недостатком является недостаточное применение в программном обеспечении методов когнитивной и пространственной логики, отсутствуют работы по разработке специального информационного языка для автономного поезда. Это порождает разнотипность моделей автономного поезда. Автономный поезд является развивающейся моделью, и развитие технических средств способствует совершенствованию этой модели и ее все более широкому применению на транспорте.

### **Список литературы**

1. Rull P. H. BARRY: An autonomous train-spotter //Proc. Image and Vision Computing. – 1993. – С.499-506.
2. Matsumoto M. et al. Assurance technologies for autonomous train on-board computer system //Proceedings Eighth IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems. FTDCS 2001. – IEEE, 2001. – С.170-175.
3. Lagay R., Adell G. M. The Autonomous Train: a game changer for the railways industry //2018 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST). – IEEE, 2018. – С.1-5.
4. Trentesaux D. et al. The autonomous train //2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE). – IEEE, 2018. – С.514-520.

5. Цветков В.Я., Розенберг И.Н. Интеллектуальные транспортные системы - LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, Saarbrücken, Germany, 2012. – 297 с.
6. Щенников А.Н. Интеллектуальные транспортные системы как специализированные системы // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 4(4). – с.45-53.
7. Цветков В.Я. Управление с применением киберфизических систем // Перспективы науки и образования. - 2017. - №3(27). - С.55-60.
8. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. - 2018. Т. 16. № 2 (75). - С.138-145.
9. Svae A. et al. Self-adaptive control in cyber-physical systems: the autonomous train experiment //Proceedings of the Symposium on Applied Computing. – 2017. – С.1436-1443.
10. Weichselbaum J. et al. Accurate 3D-vision-based obstacle detection for an autonomous train //Computers in Industry. – 2013. – Т. 64. – №. 9. – С.1209-1220.
11. Цветков В.Я. Информационное соответствие // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №1 – 3. – С.454-455.
12. Pavlovich M. et al. Thermal Image Processing for Autonomous Train Operation Obstacle Detection System //Proceedings, XXVII МНТК „АДП-2018”, Sozopol, Bulgaria. – 2018.
13. Etxeberria-Garcia M. et al. Application of Computer Vision and Deep Learning in the railway domain for autonomous train stop operation //2020 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). – IEEE, 2020. – С.943-948.
14. Цветков В.Я. Комплементарность информационных ресурсов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №2. – С.182-185.
15. Spinsante S., Stallo C. Issues on Uncertainty to Train Positioning in Hybridized-GNSS Approaches //2019 IEEE 5th International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace). – IEEE, 2019. – С.387-392.
16. Wang J. et al. Research on deeply integrated GPS/INS for autonomous train positioning //2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – IEEE, 2011. – С. 687-690.
17. Цветков В.Я. Применение принципа субсидиарности в информационной экономике // Финансовый бизнес. -2012. - №6. - С.40-43.
18. Лёвин Б. А., Цветков В. Я., Дзюба Ю. В. Субсидиарное управление на железной дороге // Мир транспорта. - 2019. - Т. 17. - №4 (83). - С.22-35.
19. Shimagaki S., Watanabe D. Assurance Technologies for Autonomous Train on-Board Computer System //Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems. – 2001. – С.170.
20. Shiomi M. et al. A semi-autonomous communication robot—A field trial at a train station //2008 3rd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). – IEEE, 2008. – С. 303-310.
21. Shimagaki S., Watanabe D. Assurance Technologies for Autonomous Train on-Board Computer System //Proceedings of the 8th IEEE Workshop on Future Trends of Distributed Computing Systems. – 2001. – С.170.
22. Meunier J. K., Rolin A. Autonomous Train Control and Track Circuit Inspection System //2013 Joint Rail Conference. – American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2013.
23. Yan F., Zhang S., Tang T. Autonomous Train Operational Safety assurance by Accidental Scenarios Searching //2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). – IEEE,

2019. – С.3488-3495.

24. Магчин В. Т. Регенерация бортовых баз данных // Наука и технологии железных дорог.- 2019. - №3 . – С.20-29.

25. Tsvetkov V. Ya. Information interaction // European researcher. 2013. № 11-1 (62). С.2573-2577.

26. Zhao J. et al. Enhancing transmission on hybrid precoding based train-to-train communication //Mobile Networks and Applications. – 2019. – С.1-10.

27. Linz T. Testing Autonomous Systems //The Future of Software Quality Assurance. – Springer, Cham, 2020. – С.61-75.

28. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Цифровая железная дорога: принципы и технологии // Мир транспорта. - 2018. - Т. 16. - №3 (76). - С.50-61.

29. V. Ya. Tsvetkov, S.V. Shaytura, K.V. Ordov. Digital management railway // Advances in Economics, Business and Management Research, volume 105. 1st International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019), p.181- 185.

30. Уманский В. И., Павловский А. А., Дзюба Ю. В. Цифровая Железная Дорога. Технологический уровень // Перспективы науки и образования. – 2018. - №1 (31). – С.208-213/

31. Li S., Yang L., Gao Z. Distributed optimal control for multiple high-speed train movement: An alternating direction method of multipliers //Automatica. – 2020. – Т. 112. – С.108646.

32. Oh S., Kim K., Choi H. Train interval control and train-centric distributed interlocking algorithm for autonomous train driving control system //Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. – 2016. – Т. 17. – №. 11. – С.1-9.

33. IEEE Standard 1474.1-1999. Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, 1999.

34. Tsvetkov V. Ya. Multipurpose Management// European Journal of Economic Studies. 2012. № 2 (2). p.140-143.

35. Guillaumin B. Digital radio shows great potential for rail //international railway journal and rapid transit review. – 2001. – Т. 41. – № 5.

36. Sullivan T. CBTC Radios—What to Do? Which Way to Go? //Railway Age Magazine C&S Buyers Guide. – 2005.

37. Щенников А.Н. Применение виртуальных блоков в управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 1(9). – С.17 -26.

38. Macedo N. M., Cunha A. Validating the Hybrid ERTMS/ETCS Level 3 Concept with Electrum. – 2019.

39. Tsvetkov V.Y. Correlative analysis and opposition variables // European Journal Of Natural History, 2014. №1, С.48-52.

40. Ознамец В. В. Геомониторинг на транспорте с использованием БПЛА// Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.43-53.

41. Шайтура С.В. Информационная ситуация в геоинформатике// Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. - №5 (17). – С.103-108.

42. Ознамец В.В. Геодезическое обеспечение радиорелейного информационного пространства // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 1(9). – С.46 -52.

УДК: 519.852.33

## МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНО - РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

- Боженюк А.В.** д.т.н., профессор, Южный федеральный университет, E-mail: avb002@yandex.ru, Таганрог, Россия
- Беляков С.Л.** д.т.н., профессор, Южный федеральный университет, beliacov@yandex.ru, Таганрог, Россия
- Косенко О.В.** к.т.н., Южный федеральный университет, E-mail: o\_kosenko@mail.ru, Таганрог, Россия
- Аннотация.** В статье предложена модель управления распределительной задачей применительно к транспортным задачам в условиях неопределенности исходных данных. Описана постановка многоиндексной транспортно-распределительной задачи. Экспериментальным путем показана обоснованность применения приближенных методов для решения многоиндексных распределительных задач с нечеткими параметрами.
- Ключевые слова:** Распределительная задача, метод потенциалов, многоиндексность, приближенный метод, нечеткие интервалы, оптимизация.

## TRANSPORT-DISTRIBUTION SYSTEM MANAGEMENT MODEL UNDER UNCERTAINTY

- Bozhenyuk A.V.** Ph.D, Professor, Southern Federal University, E-mail: avb002@yandex.ru, Taganrog, Russia
- Belyakov S.L.** Ph.D, Professor, Southern Federal University, E-mail: beliacov@yandex.ru Taganrog, Russia
- Kosenko O.V.** Ph.D, Assistant Professor, Southern Federal University, E-mail: o\_kosenko@mail.ru, Taganrog, Russia
- Annotation.** This article proposes a model for managing a distribution task as applied to transport problems in the conditions of uncertainty of the initial data. The statement of the multi-index transportation and distribution problem is described. The validity of the application of approximate methods for solving multi-index distribution problems with fuzzy parameters has been shown experimentally.
- Keywords:** Distribution problem, method of potentials, multi-index, approximate method, fuzzy intervals, optimization.

### Введение

Железнодорожная транспортная система представляет собой многоотраслевое хозяйство, которое представляет собой не только подвижной состав, но и сложную распределенную инфраструктуру. Эффективность работы транспортной системы напрямую зависит от точности прогнозирования потребностей в перевозочных услугах на последующие периоды. Качественное планирование связано с необходимостью обеспечения регулярного движения поездов при любых условиях и четкого взаимодействия всех звеньев железнодорожного конвейера и отсутствия дорогостоящего простоя подвижного состава [1].

В настоящее время деятельность такого рода предприятий не может быть обособленной. Эффективность работы зависит от комплекса взаимодействующих элементов транспортной системы, а также от обстоятельств различного характера, которые не всегда возможно учесть при планировании деятельности предприятия на будущие периоды. Управление и планирование комплексом задач, связанных с оптимизацией деятельности, представляет собой не простую задачу. Корректная оценка определяющих параметров эффективного функционирования системы, осуществляемая в рамках взаимодействия элементов распределительной транспортной системы, является актуальной [2, 3]. Таким образом, использование моделей, где учитывается взаимозависимость и взаимодействие всех элементов системы, обусловлено необходимостью оптимизации деятельности, связанной с управлением крупными комплексами, с реинжинирингом предприятий или подготовкой нового производства и т.п.

### Определение многоиндексной задачи распределения

Методы линейного программирования, относящиеся к методам математической оптимизации, доказали свою эффективность в решении задач распределения ресурсов [4-6]. При этом в классической постановке целевая функция и ограничения, налагаемые на задачу, должны быть детерминированными и иметь возможность выражаться в линейной форме. Эти ограничения значительно сокращают число задач, которые могут быть решены классическими методами.

Распределительная задача является частным случаем задачи линейного программирования. При этом целевой функцией, как правило, является оптимальное перемещение ресурсов при минимальных издержках.

Решение задач данного класса обеспечивается одним из методов линейного программирования- методом потенциалов.

В двухиндексной транспортной задаче (первый индекс определяет производителей или поставщиков однородного ресурса, второй индекс определяет потребителей данного ресурса), решение уравнений вида (1), (2) можно получить достаточно просто:

$$v_j - u_i \leq c_{ij}, i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}, \quad (1)$$

$$v_j - u_i = c_{ij}, \forall x_{ij} > 0, \quad (2)$$

где  $u_i$  и  $v_j$  - потенциалы соответствующих пунктов производства и пунктов потребления [4].

Но классическая двухиндексная распределительная задача не в полной мере описывает специфику потребностей транспортных распределительных систем, так как классическая постановка транспортной задачи определяется лишь наличием однородного ресурса у производителей и спросом потребителей на этот ресурс. При этом в реальных условиях в перевозочном процессе возникает задача обозначения видов, перевозимого ресурса и как следствие, выбор типов транспортных средств.

Если формулировать оптимизационную задачу для железнодорожного транспорта, то помимо пунктов отправления, пунктов прибытия, сортировочных центров, существует также значительное количество видов перевозимых ресурсов и типов вагонов. При этом перечислены лишь основные элементы, влияющие на перевозочный процесс, которые в зависимости от различных условий могут быть дополнены.

Таким образом, классическую двухиндексную задачу необходимо преобразовать в многоиндексную. Общую формулировку многоиндексной распределительной задачи определим следующим образом [7-9]:

Необходимо найти набор  $X=(x_1, x_2, \dots, x_k)$ , минимизирующий функцию:

$$F(x) = \sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \dots \sum_{i_k=1}^{n_k} c_{i_1 i_2 \dots i_k} x_{i_1 i_2 \dots i_k}, \tag{3}$$

которая удовлетворяет ограничениям:

$$\sum_{i_1=1}^{n_1} x_{i_1 i_2 \dots i_k} = b_{i_2 i_3 \dots i_k}, i_q \in I_q, i_q = (2, 3, \dots, k),$$

$$\sum_{i_2=1}^{n_2} x_{i_1 i_2 \dots i_k} = b_{i_1 i_3 \dots i_k}, i_q \in I_q, i_q = (1, 3, \dots, k),$$

$$\dots \dots \dots$$

$$\sum_{i_k=1}^{n_k} x_{i_1 i_2 \dots i_k} = b_{i_1 i_2 \dots i_{k-1}}, i_q \in I_q, i_q = (1, 2, \dots, k - 1). \tag{4}$$

Объемы перевозок являются неотрицательными числами:

$$x_{i_1 i_2 \dots i_k} \geq 0, i_1 \in I_1, i_2 \in I_2, i_k \in I_k, \tag{5}$$

где  $c_{i_1 i_2 \dots i_k}$  – матрица стоимостей распределения единицы ресурса  $x_{i_1 i_2 \dots i_k}$  при условиях  $(i_1, i_2, \dots, i_k)$ ;  $b_{i_1 i_2 \dots i_{k-1}}$  – совокупный объем ресурсов, перемещаемых при условиях  $(i_1, i_2, \dots, i_k)$ .

В качестве существенного недостатка сформулированной многоиндексной распределительной задачи можно отметить то, что параметры, определяющие данную задачу, являются четко заданными. При этом на практике четко неопределенный характер исходных данных задачи может существенно повлиять на конечный результат. Следовательно, необходима формализация параметров задачи распределения с помощью аппарата нечеткой логики.

**Формализация многоиндексной задачи распределения ресурсов с нечеткими параметрами.**

Для корректного решения задачи оптимизации деятельности транспортной системы предлагается исходные параметры задать в виде нечеткого интервала, который будет записан следующим образом [10]:

$$(\alpha, \beta, A, B) \tag{6}$$

где  $\alpha$  – левый коэффициент нечеткости;  $\beta$  – правый коэффициент нечеткости,  $A$  – нижнее модальное значение;  $B$  – верхнее модальное значение нечеткого интервала. Параметры  $A$  и  $B$  определяют ядро нечеткого интервала [11].

На рисунке 1 представлен нечеткий интервал  $(L - R)$  – типа.

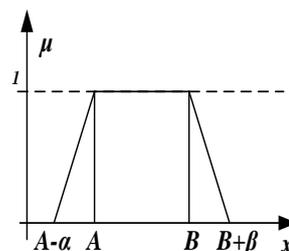


Рисунок 1. Нечеткий интервал  $(L - R)$  – типа

Функция принадлежности нечеткого интервала  $(L - R)$ - типа будет описана системой состоящей из функций  $L$  и  $R$  [10,11]:

$$\mu_Q(x) = \begin{cases} L\left(\frac{A-x}{\alpha}\right), & x \leq A \\ 1, & A \leq x \leq B \\ R\left(\frac{x-B}{\beta}\right), & x \geq B. \end{cases}$$

Предложенный аппарат формализации параметров задачи в виде нечетких интервалов представляет удобный инструмент для отображения исходных данных при прогнозировании загруженности транспортно- распределительной системы и соответствует интуитивным представлениям экспертов о прогнозируемых параметрах [7].

**Оценка предложенного метода решения задачи распределения в условиях неопределенности**

Ранее был предложен и описан в [3, 12, 13] метод для решения оптимального распределения многоиндексной задачи в условиях неопределенности. Предложенный метод основывался на приближенном методе решения распределительной трехиндексной задачи.

Рассмотрим предложенный метод индексных элементов, который учитывает неопределенность исходных данных задачи на примере пятииндексной распределительной задачи.

Множество  $I$  определим как множество отправителей (отправных станций), множество  $J$  – множество потребителей ресурса (станции прибытия),  $K$ - множество сортировочных станций,  $L$  – типы вагонов (пассажирские (купированные, плацкартные и т.д.), грузовые (платформы, полувагоны, цистерны, изотермические и т.п.)),  $R$  – типы перемещаемых ресурсов (пассажиры, грузы различного назначения). Для прогноза необходимости того или иного состава на рассматриваемый период исходные данные задачи будут заданы нечеткими интервалами (6). Таким образом, для определения параметров пятииндексной задачи распределения ресурсов, представим целевую функцию следующим образом:

$$\tilde{F}(X) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \sum_{r=1}^R \tilde{c}_{ijklr} \tilde{x}_{ijklr} \rightarrow \min,$$

где  $\tilde{c}_{ijklr}$ ,  $i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, r \in R$  – нечеткое множество, заданное на множестве действительных чисел  $\Theta_c$  и определяющее нечеткую стоимость перевозки единицы  $r$ -го ресурса от  $i$ -й станции отправления к  $j$ -й станции прибытия через  $k$ -й сортировочный узел вагоном  $l$ -го типа;  $\tilde{x}_{ijklr}$ ,  $i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, r \in R$  – нечеткое множество, заданное на множестве действительных чисел  $\Theta_x$  и определяющее нечеткое количество  $r$ -го ресурса, перевозимого от  $i$ -й станции отправления к  $j$ -й станции прибытия через  $k$ -й сортировочный узел вагоном  $l$ -го типа;

Нечеткая целевая функция (10) ограничена снизу на множестве допустимых нечетких планов, так как  $\tilde{x}_{ijklr} \gtrsim 0$  и  $\tilde{c}_{ijklr} \gtrsim 0$ .

Для нахождения оптимального решения представленной пятииндексной задачи распределения неоднородного ресурса с помощью различных вагонов от станций отправления к к станциям прибытия через сортировочные узлы, с учетом задания параметров в виде нечетких интервалов, необходимо определить ведущие индексные элементы, которые сформируют значение целевой функции, определяющей минимальную стоимость распределения ресурса.

Для определения минимальной стоимости перемещения ресурсов разработан метод решения многоиндексной задачи распределения ресурсов, определяемый следующими этапами [3, 7]:

Этап 1. Поиск в заданных сечениях матрицы тарифов элементов  $\tilde{\alpha}_i, \tilde{\beta}_j, \tilde{\gamma}_k, \tilde{\mu}_l, \tilde{\phi}_r$  с минимальными значениями.

Этап 2. Составление матрицы из элементов  $\tilde{c}^*_{ijklr}=0$ , так называемых нулевых индексных элементов.

Этап 3. Процедура определения ведущего индексного элемента  $\tilde{x}'_{ijklr}$ .

Этап 4. Перерасчет величин пороговых значений ведущего индексного элемента  $\tilde{x}'_{ijklr}$ .

Этап 5. Удаление из матрицы сечения, которое соответствует индексу с максимальным значением.

Этап 6. Определение элементов, которые будут записаны в план решения задачи.

Для сравнения и анализа результатов применения некоторых методов для нахождения оптимального решения задачи определенной в (7) рассмотрим пример.

Дана задача распределения ресурсов, со следующими множествами, определяющими индексность:

Первый индекс:  $A=\{a_i\}=\{7;7;16\}$  – множество, определяемое ограничения по станциям отправления.

Второй индекс:  $B=\{b_j\}=\{1;12;9;8\}$  – множество, определяемое ограничения по станциям прибытия.

Третий индекс:  $D=\{d_k\}=\{34\}$  – множество, определяемое ограничения по сортировочным центрам.

Четвертый индекс:  $V=\{v_r\}=\{3;5;22\}$  – множество, определяемое по типам перемещаемых ресурсов (грузов).

Пятый индекс:  $Q=\{q_l\}=\{6;4\}$  – множество, определяемое ограничения по типам вагонов.

Необходимо найти план решения данной задачи, который позволит определить минимальную стоимость распределения ресурсов. Решим предложенную пятииндексную задачу методом потенциалов, методом потенциалов с заданием параметров в виде нечетких интервалов, приближенным методом (нуль-преобразований) и предложенным методом индексных элементов в нечеткой постановке [10].

**Решение задачи методом потенциалов.** Классическим методом линейного программирования для решения задач транспортного типа является метод потенциалов. В специализированной литературе данный метод подробно описан для решения двух, реже трехиндексных задач. Решение задач большой размерности (при количестве элементов матрицы стоимостей  $> 10^3$ ) методом потенциалов достаточно затруднительно [7]. Сложности возникают из-за случаев вырожденности задач данного класса, так как решение методом потенциалов состоит из двух шагов: поиск опорного плана (методом северо-западного угла, методом наименьшей стоимости и т.д.), а затем поиск оптимального плана.

Для решения представленного примера было проведено 22 итераций (с учетом итераций поиска опорного плана методом северо-западного угла) и получен оптимальный план задачи распределения  $X^*=\{x^*_{ijklr}\}=\{x^*_{11111}=1, x^*_{12131}=6, x^*_{23121}=1, x^*_{23122}=1, x^*_{22131}=6, x^*_{33112}=2, x^*_{33122}=4, x^*_{33132}=2, x^*_{34131}=8\}$ . Целевая функция, определяющая минимальную стоимость распределения ресурсов  $F(X^*)=113$ .

**Решение пятииндексной задачи методом потенциалов в нечеткой постановке.** Решим данную задачу при условии задания исходных параметров в виде нечетких интервалов. Нечеткая целевая функция, которая определяет минимальную стоимость распределения ресурсов будет записана следующим образом:

$$\tilde{F}(\tilde{X}) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{r=1}^R \sum_{l=1}^L \tilde{c}_{ijkrl} \tilde{x}_{ijkrl}.$$

При этом решение данной задачи также будет определено в виде нечеткого интервала. Набор нечетких переменных задачи  $\tilde{X}^* = \{\tilde{x}_{ijkrl}^*\}$  сформирует нечеткий план распределительной задачи.

Исходные параметры задачи, согласно постановке, в условиях неопределенности будут определены четырьмя значениями, согласно формализации (6). Для адекватного сравнения величин исходных данных (для возможного их соотнесения в четкой постановке и в виде нечетких интервалов) параметры нечеткого интервала (левый и правый коэффициенты нечеткости, нижнее и верхнее модальные значения) запишем, таким образом, чтобы значение центра тяжести построенной трапеции по данным нечеткого интервала, по оси абсцисс, равнялось соответствующему значению задачи в четкой постановке [14].

Целевая функция, определяющая минимальную стоимость поставленной задачи в условиях неопределенности исходных данных, будет определена как  $\tilde{F}(\tilde{X}) = (31,98,132,38)$ .

**Решение поставленной многоиндексной задачи методом нуль-преобразований (приближенный метод).** В [7] проводились исследования об обоснованности применения приближенных методов для распределительных задач. Их применение обосновано для задач большой размерности, при этом время, затрачиваемое на решение многоиндексной распределительной задачи значительно меньше, чем при решении данной задачи методом потенциалов. Это объясняется тем, что при решении методом потенциалов для достижения оптимального плана необходимо больше итераций и в каждой итерации необходимо дважды решать систему уравнений. При этом, как было указано выше, метод потенциалов не пригоден для задач большой размерности из-за частого возникновения случаев вырожденности (при размерности от  $10^3$  число случаев вырожденности до 30% от общего числа решений) [7, 15].

При решении поставленной задачи методом линейного программирования- методом потенциалов, значения  $c_{ijkrl}$  не подвергаются преобразованиям. При этом в приближенном методе на каждой итерации производится перерасчет значений  $c_{ijkrl}$  по следующей формуле [7,12]:

$$c_{ijkrl}^1 = c_{ijkrl} - (\alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \phi_r + \mu_l).$$

Искомые параметры  $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k, \phi_r, \mu_l$ , соответствующие определенному сечению матрицы тарифов, будут записаны исходя из следующих вычислений:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \min_{jkr l} \{c_{ijkrl}\}, i \in \{1, 2, \dots, I\}, \\ \beta_j &= \min_{ikr l} \{c_{ijkrl} - \alpha_i\}, j \in \{1, 2, \dots, J\}, \\ \gamma_k &= \min_{ijr l} \{c_{ijkrl} - \alpha_i - \beta_j\}, k \in \{1, 2, \dots, K\}, \\ \phi_r &= \min_{ijkl} \{c_{ijkrl} - \alpha_i - \beta_j - \gamma_k\}, r \in \{1, 2, \dots, R\}, \end{aligned}$$

$$\mu_l = \min_{ijkl} \{c_{ijkl} - \alpha_i - \beta_j - \gamma_k - \phi_r\}, l \in \{1, 2, \dots, L\}.$$

После проведения восьми итераций был найден план задачи  $X^* = \{x_{ijkl}^*\} = \{x_{1111}^* = 1, x_{1311}^* = 1, x_{1213}^* = 5, x_{2213}^* = 7, x_{3312}^* = 1, x_{3312}^* = 5, x_{3313}^* = 2, x_{3413}^* = 8\}$ . Целевая функция, определяющая стоимость распределения ресурсов  $F(X^*) = 114$ .

**Решение задачи методом индексных элементов.** В соответствии с предложенным алгоритмом решения многоиндексной задачи распределения ресурсов в условиях неопределённости исходных параметров, вычислены ведущие индексные элементы и определен оптимальный план решения задачи распределения ресурсов  $\tilde{X}^* = \{\tilde{x}_{ijkl}^*\}$ , который позволит вычислить значение целевой функции, определяющей минимальную стоимость распределения ресурсов при задании исходных параметров задачи в виде нечетких интервалов  $\tilde{F}(\tilde{X}) = (32, 100, 136, 35)$ .

### Заключение

Классические методы линейного программирования, в частности метод потенциалов, подходят для решения двух-, трехиндексных распределительных задач. При этом для задач большой размерности метод потенциалов не всегда позволяет определить оптимальное решение поставленной задачи. При решении распределительных задач большой размерности хорошо себя зарекомендовали приближенные методы. Также для применения расчетов в реальных условиях обусловлено использование аппарата нечетких множеств. Экспериментальные расчеты показали, что решение задачи, разработанным методом индексных элементов при нечетко-интервальном задании параметров полностью охватывает результаты решений в четкой постановке, что согласуется с основным принципом нечетко-интервальной математики – охват всех возможных вариантов решений.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №18-01-00023, №19-07-00074.

### Список литературы

1. Розенберг И.Н., Матюхин В.Г., Шабунин А.Б., Уманский В.И. Цифровая трансформация управления перевозочным процессом / Автоматика, связь, информатика. 2019. № 7. С.2-6.
2. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Пространственная логика при управлении транспортом / Интеллектуальные системы управления на железнодорожном транспорте. Компьютерное и математическое моделирование (ИСУЖТ-2019) труды Восьмой научно-технической конференции. 2019. С.12-18.
3. Боженюк А.В., Косенко О.В., Алёхина О.М. Оптимизация распределения грузопотока на железнодорожном транспорте. / Наука и технологии железных дорог. 2019. Т. 3. № 1 (9). С.27-33.
4. Гольштейн, Е.Г. Специальные направления в линейном программировании / Е.Г. Гольштейн, Д.Б. Юдин. – Издание 2-е, исправленное. – М.: Кранд, 2010. – 523 с.
5. Галяутдинов Р.Р. Транспортная задача - решение методом потенциалов // Сайт преподавателя экономики. [2013]. URL: <http://galyautdinov.ru/post/transportnaya-zadacha>
6. Габасов, Р.Ф. Методы линейного программирования. Часть 2. Транспортные задачи. / Р.Ф. Габасов, Ф.М. Кириллова. – М.: Либроком, 2010. – 240 с.

7. Косенко О.В. Разработка методов и алгоритмов решения многоиндексных распределительных задач в условиях неопределенности. автореферат дис. ... кандидата технических наук / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (Новочеркас. политехн. ин-т). Таганрог, 2017.
8. Косенко О.В. Повышение эффективности методов решения многоиндексных задач распределения ресурсов. / Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 4 (177). С. 73-81.
9. Прилуцкий М.Х. Многоиндексные задачи объёмно-календарного планирования транспортного типа. // Тр. междунар. конф. "Идентификация систем и задачи управления SICPRO-06". – М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. 2006. – С.503–510.
10. Дюбуа Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
11. Раскин Л.Г. Нечеткая модель нелинейной многоиндексной транспортной задачи / Л.Г. Раскин, О.В. Серая, О.И. Дунаевская // Восточно – Европейский журнал передовых технологий, 2012. – №6/4 (60). – С.15–17.
12. Kosenko O.V., Sinyavskaya E.D., Shestova E.A., Kosenko E.Y., Chemes O.M. Method for solution of the multi-index transportation problems with fuzzy parameters. / Proceedings of the 19th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2016 2016. С.179-182.
13. Боженюк А.В., Косенко О.В., Косенко Е.Ю. Решение задачи формирования распределительной системы в условиях неопределенности. / Инженерный вестник Дона. 2018. № 3 (50). С.66.
14. Янпольский А.Р. Гиперболические функции / А.Р. Янпольский. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1996. – 195 с.
15. Ветошкин, А.А. Вырожденность транспортной задачи и как с ней бороться / А.А. Ветошкин, А.И. Костякова // Современные научные исследования и инновации, 2012. –№ 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2012/02/7654>.

УДК: 001.6: 001.51

## **КОНСТРУКТИВНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**Рогов И.Е.** Директор Института довузовской подготовки, Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), E-mail: rogov@mirea.ru, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье исследуются основные принципы и факторы конструктивного моделирования объектов транспортной инфраструктуры. Показана связь между конструктивным моделированием и конструктивной математикой и логикой. Транспортная инфраструктура рассматривается с разных аспектов как технологическая система, техническая система и сложная система. Выделены основные типы составляющих транспортной инфраструктуры: ситуация, объект, дискретная единица. Показано различие между формальным и конструктивным подходом в моделировании. Показана связь конструктивного моделирования с идеологией многоагентных систем.

**Ключевые слова:** транспорт, транспортная инфраструктура, конструктивизм, реализуемость, интерпретация, моделирование, конструктивное моделирование.

## **CONSTRUCTIVE OBJECT MODELING OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE**

**Rogov I.E.** Director of pre-university education institute, Russian Technological University (RTU MIREA), E-mail: rogov@mirea.ru, Moscow, Russia

**Annotation.** The article explores the basic principles and factors of constructive modeling of transport infrastructure facilities. The connection between constructive modeling and constructive mathematics and logic is shown. Transport infrastructure is considered from various aspects as a technological system, a technical system and a complex system. The main types of components of the transport infrastructure are identified: situation, object, discrete unit. The difference between the formal and constructive approach in modeling is shown. The connection of constructive modeling with the ideology of multi-agent systems is shown.

**Keywords:** transport, transport infrastructure, constructivism, feasibility, interpretation, modeling, constructive modeling.

### **Введение.**

Цель работы в раскрытии понятия «конструктивизм» и «конструктивная математика» при решении задач моделирования транспортной инфраструктуры и демонстрации полезности и применимости этих понятий для моделирования объектов транспортной инфраструктуры. Моделирование и математика тесно связаны, и новые идеи в математике порождают новые методы в моделировании. В XX веке в математике появились новые направления, ообщённо называемые «конструктивизм» [1, 2, 3], поскольку они базируются не на абстрактных

рассуждениях, а на построении только реализуемых конструкций.

В силу этого в конструктивной математике [4, 5] и в конструктивном моделировании [6] главным является конструирование не любых математических или модельных конструкций, а конструировании только реализуемых моделей и алгоритмов. Принцип реализуемости является более важным по сравнению с принципом аналитического описания. Математические выражения, которые выглядят одинаково, могут нести разный смысл в классической и конструктивной математике. Логические утверждения, которые выглядят одинаково, могут нести разный смысл в классической и конструктивной логике [7]. Конструктивное моделирование опирается на принципы конструктивной математики и конструктивной логики и формирует свои принципы конструктивного моделирования.

Первый принцип конструктивной математики состоит в том, что надо вводить типы данных, используемых при вычислениях и моделировании и строго соблюдать эти типы, исключая все остальные из рассмотрения и моделирования. Второй принцип более сложный, он требует перехода от абстрактных континуальных множеств абстрактных переменных к счетным множествам конечных данных. Этот принцип дополнительно требует, чтобы даже внутри одного типа данных, содержащего абстрактные объекты, скажем, множества данных, каждое из вновь появляющихся множеств данных было бы определимо через предшествующие базовые множества данных.

Из этих принципов конструктивной математики вытекают принципы конструктивного моделирования. Первый принцип конструктивного моделирования состоит в том, что надо вводить информационные единицы как основу построения моделей [8] и строго применять эти модельные информационные единицы, исключая все остальные из моделирования. Второй принцип конструктивного моделирования состоит в том, что необходимо заранее определить (спроектировать, предположить) конечное множество типов (классов) моделей для данной предметной области или задачи моделирования. Этот принцип дополнительно требует, чтобы даже внутри одного типа моделей, содержащего абстрактные модели, каждое из появляющихся типов моделей или экземпляров моделей были бы определимы через предшествующие модели или базисные модели типа информационные единицы.

### **Основы конструктивного моделирования.**

В теории моделирования для описания моделей использует разные символы и формальное описание. Символ в науке не существует обособленно от соответствующей пространственно-временной формы, объекта или модели. Проблема моделирования сталкивается с моделированием структуры. Хорошо изученные объекты имеют отчетливые функциональные и структурные формы. Не изученные объекты не имеют четкие функциональные и структурные формы. Соответственно четкий формализм хорошо описывает структуры, а нечеткий описывает их с помощью абстракций. Картина мира [9] как описание реального мира и обобщение результатов исследования [10, 11] представляет собой формализованное описание.

В формальной картине мира (формальной модели картины мира) существуют условные, избыточные и нечеткие элементы. Это обусловлено желанием внести элемент абстракции в описание и допустить возможность использования созданного описания при появлении каких-то новых факторов, которые не существенно изменили бы такую модель. Параметры такой модели часто рассчитаны на дополнительный когнитивный [12] или плохо осознаваемый частью индивидуумов эффект. Термин формальный имеет один неизменный оттенок – ненастоящий и частично соответствующий. Термин феноменологический означает взятый с

натуры.

В конструктивной картине мира присутствуют элементы иного свойства. Их главными признаками являются: конечность, наглядность, согласованность, комплементарность, соразмерность. Конструктивная картина мира строится на основе рационально-конструктивного мировоззрения, ясность и определенность которого противостоит расплывчатости формально-феноменологического мировоззрения.

Слабым местом такого подхода является понятие «рациональности», которое часто зависит от субъекта. Для того чтобы избежать субъективности в конструктивном подходе используют конечную совокупность и никакую другую. Соответственно, выводы и результаты анализа распространяют только на исследуемую совокупность. В этом подходе термин «конструктивный» означает модельный или конечно алгоритмический. Модели, как правило, бывают четко определенными и конечными. Алгоритмические процедуры [6] можно задавать не только последовательностью правил, но и таблицами и дискретными описаниями. В силу этого в конструктивизме часто применяют методы дискретной математики и дискретной оптимизации. На основе вышеизложенного можно также считать, что конструктивная картина мира строится на основе конечно-конструктивного мировоззрения,

Построение картин мира у конструктивистов и формалистов является следствием принципа двойственности: абстрактного/ конкретного, конечного /бесконечного, непрерывного /дискретного. Понятие двойственности распространяется на большое число процессов и явлений. Его связывают с особенностями интерпретации.

Существует еще один эпистемологический срез по линии конкретного - абстрактного, который состоит в дихотомии понятий «дискретная единица» (*атом*) – «формальный элемент» (абстрактная единица). Отметим, что конструктивисты от Демокрита до Больцмана придерживались атомарной, корпускулярной, то есть дискретной модели картины мира. Им противостояли ученые, оперирующие качественными характеристиками: теплота /холод, сухость /влажность, мягкость /твердость и другие. Однако качественные пары были и остаются расплывчатыми, поскольку они являются не бинарными, а тринитарными [13, 14]. Критерий разграничения «мягкости- твердости» неявно дополняет пару сравниваемых объектов. Поэтому для разных критериев сравнения по-разному получают результат оценки для одной и той же пары сравниваемых объектов.

Качественное сравнение имеет расплывчатые границы. Корпускулярное и дискретное деление имеет более четкие границы, приближающие такой подход сравнения к математической логике. Отсюда корпускулярное восприятие способствует формированию четкой картины мира и развитию конструктивных теорий.

Дискретная единица (Атом) и абстрактный элемент – соразмерны, но не эквивалентны. Соразмерность – это одно из самых распространенных отношений реального мира. Дискретная единица есть предел дискретного деления системы или модели [14-16]. Дискретная единица есть результат логического деления [17-19]. Дискретная единица или информационная единица есть результат о деления технологической системы [20]. В теории информации дискретная единица есть квант передачи смысла [21].

Абстрактный элемент – есть предел условного деления системы или модели. Этот предел зависит от критерия делимости. Дискретная единица или атом – это неизменный структурно-пространственный объект, который не зависит от субъекта, а существует объективно в мире. Абстрактный элемент – это изменяющийся функционально-временной объект, часто зависящий

от точки зрения субъекта. Такая ситуация приводит к тому, что сторонники элементного подхода склонны к теоретическим построениям, а сторонники атомарного подхода склонны к экспериментированию. Дискретное описание картины мира требует от исследователя навыков в пространственном анализе, то есть умения пространственного моделирования в параметрическом и реальном пространстве.

Для сторонников элементного подхода мир – это череда непрерывных превращений во времени состояний объектов и их свойств. Для конструктивиста в области информационных технологий мир трансформируется в информационное поле, в котором происходят наглядные информационные взаимодействия между объектами и дискретными элементами информационного поля (т.е. информационными единицами).

Таким образом, представления о информационных единицах [22, 23] коррелируют с рационально-конструктивной эпистемологией, а качественные понятия об абстрактных элементах коррелируют с формально-феноменологической эпистемологией

Приходим к выводу, что с помощью конструктивной математики, конструктивной логики и конструктивного моделирования объективный мир познается в виде структурированных совокупностей. С помощью конструктивной логики упорядочиваются процессы, совокупности свойства на реальных заданных совокупностях или носителях данных

Конструктивная логика и конструктивное (дискретное) моделирование в определенном смысле противостоят абстрактной математике и непрерывному моделированию. Предметом непрерывной логики является построение логических следований, которое разворачивается во времени, линейно и последовательно. Предметом конструктивной логики является независимая от мышления структура объекта, которая существует как некая пространственная сущность вся целиком. Предметом конструктивного моделирования является дискретная модель объекта, которая существует как объективная сущность на заданной совокупности и может не существовать в других совокупностях.

В исходном виде абстрактная структура не может проникнуть в сознание. Для восприятия структуры реального объекта или явления она должна быть последовательно структурирована. Эта задача лежит на дихотомическом анализе [24], сравнительном анализе [25], конструктивной логике и конструктивном моделировании. Можно сказать, что через конструктивное моделирование становится доступна структурная модель объекта. Поэтому было бы правильно все конструктивное моделирование, как науку о пространственных формах, разделить на два раздела.

Первый раздел конструктивного моделирования можно назвать поисковым. В нем осуществляется анализ и построение структуры на основе конечных информационных единиц определенного качества. В этом разделе дихотомический анализ, сравнительный анализ, оппозиционный анализ [26, 27] – комплементарны [28] конструктивному моделированию. Второй раздел конструктивного моделирования можно назвать интерпретационным. В нем осуществляется интерпретация и построение доказательных последовательностей на основе конечных информационных единиц определенного качества. Таким образом, оба раздела связывают информационные единицы.

Применительно к транспортной инфраструктуре выстраивается следующая цепочка моделей, выражаемая с помощью дискретного формализма Бекуса- Наура [29]:

$$\begin{aligned} \text{транспортная инфраструктура} &::= \text{информационная ситуация}::= \\ \text{информационная модель} &::= \text{информационная единица}, \end{aligned} \quad (1).$$

В выражении (1) информационная единица является элементом вложенности и элементом конструктивного моделирования.

### **Транспортная инфраструктура как объект моделирования.**

Информационные модели делятся на простые и составные. Составные это такие модели, которые включают в свой состав другие модели, подобно тому, как система включает подсистемы. Большинство моделей при конструктивном моделировании являются составными.

Следует уточнить понятие транспортной инфраструктуры, поскольку существует мнение, что это только то, что окружает дорогу или железнодорожный путь. В соответствии с ГОСТ Р 55056-2012 инфраструктурой железнодорожного транспорта (ИЖТ) общего пользования называют технологический комплекс, включающий в себя: железнодорожные пути общего пользования и другие сооружения, железнодорожные станции, устройства электроснабжения, сети связи, системы сигнализации, централизации и блокировки, информационные комплексы, систему управления движением и иные обеспечивающие функционирование инфраструктуры здания, строения, сооружения, устройства и оборудование.

Многообразие объектов дает основание ввести понятие объекты транспортной инфраструктуры (ОТИ), поскольку эти объекты образуют типы и классы. Типы и классы являются необходимым атрибутом конструктивного моделирования. Для разных типов и классов применяют разные типы моделирования и решают по ним разные задачи.

Таким образом модель ИЖТ включает модели всех перечисленных объектов. Для всех перечисленных объектов будут существовать соответствующие модели, общие базовые элементы и текущие информационные ситуации. Конструктивизм моделирования состоит в использовании конечного количества информационных единиц, имеющих специальное назначение. Например, при картографическом отображении инфраструктуры будут использовать картографические условные знаки [30] как информационные единицы моделирования. При построении чертежей проектов отображении объектов инфраструктуры используются графические информационные единицы [31], как информационные единицы моделирования. При трехмерном моделировании будут использовать другой тип единиц – трехмерные информационные единицы [32]

По степени важности можно выделить следующие три компоненты или важные модели ИЖТ: модель железнодорожного пути; модель окружения железнодорожного пути, модель инфраструктурных объектов. Эти модели связаны друг с другом и образуют триаду. Таким образом транспортные сети или железнодорожные пути есть часть транспортной инфраструктуры и их нельзя рассматривать отдельно от остальной инфраструктуры. За рубежом используют специальные понятия и модели транспортной инфраструктуры: инфраструктурный коридор [33] и транспортный коридор [34].

В общем конструктивное моделирование транспортной инфраструктуры должно отвечать требованиям вложенности или рекурсивности. Конструктивное моделирование объектов транспортной инфраструктуры должно решать ряд разных задач. Одна из задач контроль состояния и прогнозирование состояния ОТИ. Другая задача выявление и контроль незаконно возведенных объектов в специальных зонах транспортной инфраструктуры, таких как полоса отвода или охранная зона. Еще одна важная задача конструктивного моделирования - размещения новых объектов в зоне транспортной инфраструктуры [35]. Важная задача конструктивного моделирования – обработка результатов мониторинга ОТИ для составления

проектов реконструкции или ремонта объектов. Специфическая и важная задача конструктивного моделирования – экологический контроль состояния среды в зоне транспортной инфраструктуры и выявление влияния загрязнений, удаленных от ОТИ. Например, по опыту экологического мониторинга в СССР, факелы от терриконов Кузбасса загрязняли зону до 2500 км от терриконов. Криворожский комбинат загрязнял объекты, удаленные на расстояние до 500 км. Это делает актуальным при конструктивном моделировании специальное моделирование для выявления потенциальных загрязнителей ОТИ.

### **Основные проблемы и принципы конструктивного моделирования транспортной инфраструктуры.**

При решении задач оптимизации, связанных с конструктивным моделированием ОТИ, приходится переходить к методам дискретной оптимизации [36]. Может возникнуть проблема пересмотра результатов предварительного моделирования для оперативного реагирования на меняющуюся ситуацию. При существенном влиянии стохастических факторов процесс моделирования перестраивают из детерминированного процесса в недетерминированный с возможностью оперативной перестройки.

Инфраструктуру можно рассматривать как технологическую систему [37] в аспекте функционирования и как техническую систему в аспекте используемых технических сооружений и средств. Техническая система служит поддержкой и основой функционирования технологической системы. Это определяет первый принцип моделирования.

Транспортную инфраструктуру необходимо рассматривать как пространственную систему, которая должна быть оптимально размещена и оптимально функционировать. Это определяет первый принцип конструктивного моделирования – комPLEMENTARность [28] технической и технологической части инфраструктуры

Необходимость размещения пространственных объектов инфраструктуры задает второй принцип конструктивного моделирования – решение задачи оптимального размещения пространственных объектов в заданной области.

Оптимальное функционирование объектов, например, городской инфраструктуры зависит от работы транспорта. Это определяет третий принцип конструктивного моделирования – моделирование транспортных потоков внутри пространственной инфраструктуры. Кроме принципов существуют факторы конструктивного моделирования:

- использование пространственной информации и геоданных как базиса для моделирования, использование пространственных знаний [38] для нахождения решений построения моделей,
- использование логических конструкций [39, 40] для логического анализа
- использование информационных конструкций [41] для информационного анализа
- использование моделей информационных пространственных ситуаций [42] как единиц конструктивного моделирования
- использование информационных единиц [43] как инструмента пространственного моделирования транспортных потоков
- использование ГИС и геоинформационного моделирования [44-46] для пространственного анализа и совмещения тематической информации с пространственной.

С позиций абстракции транспортную инфраструктуру можно рассматривать также как абстрактную сложную систему. Это дает основание применять теорию систем и системный анализа для описания самой инфраструктуры и процессов, протекающих в ней. Описание самой

инфраструктуры осуществляют с помощью дескриптивных [47] информационных моделей. Описание процессов, протекающих в инфраструктуре, осуществляют с помощью и процессуальных [48] информационных моделей.

Дескриптивная группа информационных моделей включает описание как вложенность или рекурсию описаний объектов. Процессуальная группа информационных моделей включает описание связанности и вложенности процессов ОТИ. Между этими группами моделей существует отношение комплементарности. Между результатами моделирования на соседних этапах существует отношение информационного соответствия [49, 50].

#### **Решение задач конструктивного моделирования.**

Решение задач конструктивного моделирования или конструктивных вычислений начинается с выделения счетного множества объектов или их признаков. Разбиение исходно совокупности (М) на объекты и последующее разбиение на элементы осуществляют с применением дихотомического анализа. Для разбиения на объекты (О) выбирают критерий целостности объектов и осуществляют деление совокупности до уровня объекты. Для разбиения на элементы выбирают критерий неделимости элементов и осуществляют деление совокупности до уровня элементы (Е) или информационные единицы (IU).

$$O \subset M.$$

$$IU \subset O ; IU \subset M.$$

Принцип конечности конструктивного моделирования говорит о том, что при построении модели объекта и анализа его поведения надо рассматривать ту часть объектов окружающего мира, которая влияет на состояние и поведения объекта. Это приводит к понятию конечной модели, которую называют информационной ситуацией (IS). В этом случае имеет место:

$$IU \subset IS ; O \subset IS ; IS \subset M.$$

Если ввести обозначение модели транспортной инфраструктуры через (MTI), а обозначение информационной модели объекта транспортной инфраструктуры через (IM), то выражение (1) примет вид:

$$MTI ::= IS ::= IM ::= IU, \quad (2).$$

Выражение (2) отражает то, что формализм Бекуса-Наура является разновидностью конструктивного моделирования. Выражение (2) описывает структурную вложенность или иерархию компонент конструктивной модели. Кроме того, следует важный вывод, что конструктивное моделирование является символическим, в то время как многие виды моделирования требуют в качестве обязательного атрибута применение формальной системы и часто используют функциональное описание.

Другим примером конструктивного моделирования является картографическая форма представления транспортной инфраструктуры (рис.1). Информационными единицами такой модели являются условные картографические знаки. Модель, показанная на рис.1 является конструктивной интерпретирующей моделью.

Конструктивность модели на рис.1 заключается в конечности числа объектов модели и конечности числа атрибутов модели. Красными линиями показаны железнодорожные пути. На рис.1 показана особенность конструктивной модели. Она конечная, но некоторые элементы модели показаны в виде непрерывных линий. Это векторная модель, которая всегда является конструктивной.

Альтернативой векторной модели является растровая модель. На векторной модели прямая

непрерывная линия задается двумя точками. Такое описание не меняется при изменении масштаба картографической модели. На растровой модели прямая линия, как и всякая другая линия, задается множеством пикселей. Такое описание меняется при изменении масштаба картографической модели. В частности, для любой линии меняется число пикселей по ширине линии, по длине линии и в точках пересечения линий. На этом примере видно, что конструктивное моделирование более четкое и определенное.

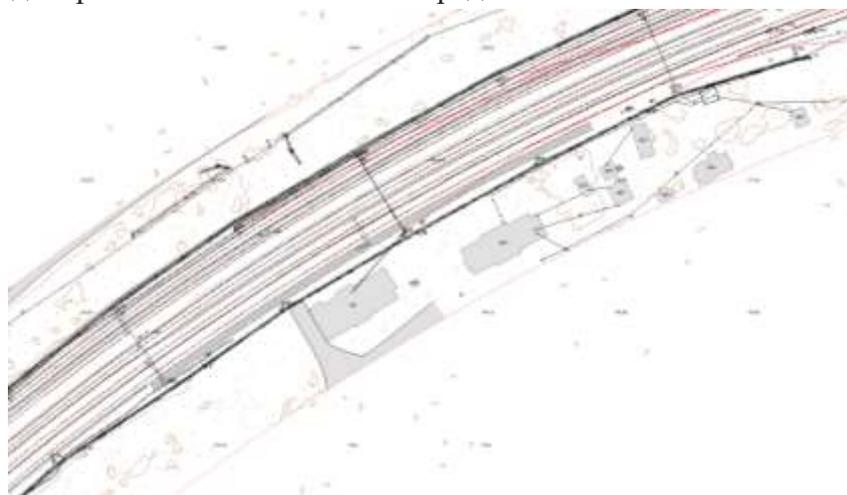


Рисунок 1. Картографическая модель как конструктивная модель.

Используя системный подход можно дать системное описание конструктивной модели транспортной инфраструктуры.

$$MTI = \langle IS, IM_i, IU_j, Fint, Fext \rangle, \quad (3).$$

В выражении (3) МТИ – конструктивная модель транспортной инфраструктуры; IS – конструктивная модель информационной ситуации,  $IM_i$  – конструктивная модель объекта в информационной ситуации. При этом число объекта в ситуации конечно  $i=1\dots m$ ,  $IU_j$  – информационные единицы, число которых конечно  $j=1\dots n$ . Параметры Fint, Fext обозначают внутренние и внешние факторы, воздействующие на информационную ситуацию. Для сравнения приведем функциональную модель транспортной инфраструктуры.

$$MTI(t) = \varphi [IS(ps(t)), IM(pm(t)), IU_j(pu), Fint(pint(t)), Fext(pex(t))], \quad (4).$$

В выражении (4) МТИ(t) – функциональная модель транспортной инфраструктуры;  $IS(ps(t))$  – функциональная модель информационной ситуации, в которой  $ps(t)$  – параметры информационной ситуации,  $t$  – время (аргумент).  $IM(pm(t))$  – функциональная модель объекта в информационной ситуации, в которой  $pm(t)$  – параметры информационной модели,  $t$  – время.,  $IU_j(pu)$  – информационные единицы, число которых конечно  $j=1\dots n$ ,  $pu$  – параметры информационных единиц. Величина  $Fint(pint(t))$  обозначает внутренние факторы инфраструктуры, которые действуют на ситуацию,  $pint(t)$  – параметры внутренних факторов, зависящие от времени. Показатель  $Fext(pex(t))$  обозначает внешние факторы, воздействующие на информационную ситуацию.  $pex(t)$  – параметры внешних факторов, зависящие от времени.

Сравнение двух моделей говорит о том, что информационные единицы не зависят от времени и позволяют связывать конструктивную модель транспортной инфраструктуры с функциональной.

Рассмотрим процесс моделирования в пространстве состояний на основе логической модели.

$$(K_P(t_0) \wedge ps(t) \wedge pint(t) \wedge rex(t)) \rightarrow K_P(t_1), \quad (5).$$

В выражении (5)  $K_P(t_0)$  – параметр начального состояния ОТИ,  $ps(t)$  – параметры информационной ситуации,  $pint(t)$  – параметры внутренних факторов, зависящие от времени,  $rex(t)$  – параметры внешних факторов, зависящие от времени.  $K_P(t_1)$  – параметр следующего состояния ОТИ. Выражение (5) моделирует переход состояния объекта из начального состояния в последующее. Выражение (5) рекурсивно и поэтому относится к области конструктивной логики и конструктивного моделирования. Критерием эффективности моделирования будет выражение (6)

$$\Delta_i = (K_P(t_1) - K_{Ц}), \quad (6)$$

В выражении (6)  $K_{Ц}$  - модель целевого состояния объекта ОТИ. Выражение (6) рекурсивно и поэтому относится к области конструктивной логики и конструктивного моделирования. Это влечет применение итеративного процесса оценки качества моделирования. В результате совокупности итераций моделирование на заключительном этапе завершающий процесс переводит модель в целевое состояние  $K_{Ц}$ .

Выражение (5) может быть использовано в качестве правила для поведения агента. Следовательно, конструктивное моделирование позволяет формировать правила поведения, применимые в многоагентных системах (МАС) и интеллектуальных системах.

В случае применения МАС решение задачи конструктивного моделирования может быть представлено в виде последовательных действий ( $d_i$ ) решателя агентной системы или интеллектуальной системы. Такие действия решающей системы по моделированию могут быть представлены как последовательность:

$$K_P \rightarrow d_1 (K_P) \rightarrow K_1 \rightarrow d_2 (K_1) \rightarrow K_2 \rightarrow \dots \rightarrow K_{Ц}, \quad (7).$$

Последовательность действий решающей системы  $\langle d_1, d_2, \dots, d_n \rangle$  есть путь решения задачи моделирования. Маршрутом моделирования или путем решения задачи моделирования называют граф, описывающий последовательность этапов моделирования. По этому критерию задачи моделирования разделяют на два типа. Если путь моделирования известен априори, то имеет место моделирование первого рода. Если же путь моделирования неизвестен, то имеет место моделирование второго рода [44].

Для моделирования второго рода процесс построения модели связан с поиском последовательности  $\langle d_1, d_2, \dots, d_n \rangle$  выражение (7). Этот раздел конструктивного моделирования называют поисковым.

Применение агентов, использующих принципы конструктивного моделирования, позволяет решать задачи моделирования без участия человека. Для решения задачи поискового конструктивного моделирования агент нуждается в априорных знаниях и базе

информационных единиц как компонент поискового образа.

Для решения задачи интерпретационного конструктивного моделирования агент или решатель интеллектуальной системы нуждается в дополнительных знаниях и в базе информационных единиц как компонент конструирования модели.

При моделировании транспортной инфраструктуры приходится решать задачи моделирования транспортных и информационных потоков. Это означает построение дискретных моделей потоков. Информационные потоки информируют о состоянии материальных потоков и фактически являются моделями материальных потоков. Мультиагентные и интеллектуальные системы позволяют моделировать информационные и транспортные потоки.

При конструктивном моделировании решатель агента или интеллектуальной системы моделирует информационные ситуации в рамках его перцептивного восприятия. Ситуации идентифицируются или моделируются на основе перцепции и отражают знания агента о внешней среде. Поэтому более правильно говорить о восприятии внешней среды, которая является подмножеством внешнего мира.

### **Заключение.**

Как сложная система транспортная инфраструктура обладает специфическими характеристиками. Конструктивное моделирование транспортной инфраструктуры обладает рядом особенностей. Конструктивная математика, конструктивная логика и конструктивное моделирование рассматривают окружающий мир в виде структурированных совокупностей. Конструктивное моделирование позволяет формировать и выявлять структуру объекта на основе выбранных заранее информационных единиц структуры. Конструктивное моделирование ОТИ позволяет выявлять структуру объектов и структуру всей транспортной инфраструктуры. Конструктивное моделирование включает два дополняющих друга направления: поисковое и интерпретационное. Формализма Бекуса-Наура и картографическое моделирование являются примерами конструктивного моделирования. Большинство моделей транспортной инфраструктуры являются составными.

Для конструктивного моделирования характерно применение типов и классов. Для разных типов и классов применяют разные классификаторы. Из этого следует, что для многих видов конструктивного моделирования необходимо применять классификаторы. Эта обязательная априорная информация необходима для конструктивного моделирования. Типичными моделями конструктивного моделирования являются информационные единицы и информационные ситуации. Информационные единицы представляют собой дискретный элемент моделирования. Информационные ситуации дискретизируют пространство и сокращают область моделирования до конечных размеров. Конструктивное моделирование транспортной инфраструктуры должно отвечать требованиям вложенности или рекурсивности.

Недостатком конструктивного моделирования является необходимость перехода к методам дискретной оптимизации, которая является более сложной. Транспортная инфраструктура может быть рассмотрена как технологическая, техническая и системная модель. Это определяет разные типы моделирования инфраструктуры. Векторная картографическая модель является примером конструктивной модели. Информационные единицы в конструктивном моделировании не зависят от времени и позволяют связывать конструктивную модель транспортной инфраструктуры с функциональной моделью инфраструктуры. Технологические принципы конструктивного моделирования могут быть использованы в качестве правил для

поведения интеллектуальных или многоагентных систем. Это является достоинством конструктивного моделирования. Конструктивное моделирование позволяет решать задачи моделирования первого и второго рода. Конструктивное моделирование позволяет решать задачи моделирования транспортных потоков

### Список литературы

1. Непейвода Н. Н. Конструктивная математика: обзор достижений, недостатков и уроков. Часть I // Логические исследования. – 2011. – №. 17. – С.191 -240.
2. Непейвода Н. Н. Конструктивная математика: обзор достижений, недостатков и уроков. Часть II // Логические исследования. – 2011. – №. 18. – С.157 -181.
3. Martin-Lof P. Constructive mathematics // Lecture at the Aarhus University. – 1966.
4. Рогов И.Е. Конструктивная математика и эффективная алгоритмизация // Славянский форум. -2019. – 4(26). - С.119-128.
5. Цветков В.Я. Информационные конструкции и принципы конструктивной математики // Славянский форум. -2019. – 4(26). - С.156-164.
6. Буравцев А.В. Конструктивная алгоритмизация // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. № 1. С.85–92.
7. Кудж С.А., Цветков В.Я. Логика и алгоритмы: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2019. – 112 с. ISBN 978-5-317-06054-1/.
8. Tsvetkov V. Ya. Information Units as the Elements of Complex Models // Nanotechnology Research and Practice. - 2014, № 1(1), p.57-64.
9. Tsvetkov V. Ya. Worldview Model as the Result of Education // World Applied Sciences Journal. -2014. - 31 (2). – p.211-215.
10. Савиных В.П. Космические исследования как средство формирования картины мира // Перспективы науки и образования- 2015. - №1. – С.56-62.
11. Коваленко Н.И. Информационный подход при построении картины мира // Перспективы науки и образования. - 2015. - №6. - С.7-11.
12. Чехарин Е. Е. Картина мира как когнитивная модель // Славянский форум, 2016. -4(14). – С.290-296.
13. Цветков В.Я. Триада как интерпретирующая система. // Перспективы науки и образования. - 2015. - №6. - С.18-23
14. Кудж С.А. Тринитарные информационные единицы // Славянский форум, 2016. -4(14). – С.137-143
15. Tsvetkov V. Ya. Information objects and information Units // European Journal of Natural History. - 2009. - №2. - p.99.
16. Чехарин Е.Е. Информационные единицы в сложных системах // Образовательные ресурсы и технологии – 2017. -3 (20). – С.93-99.
17. Ожерельева Т.А. Логические информационные единицы // Славянский форум, 2015. - 2(8) - С.240-249.
18. Tsvetkov V. Ya. Logic units of information systems // European Journal of Natural History. – 2009. – № 2. – p.99-100.
19. Чехарин Е.Е. Информационные единицы в языке предикатов // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. - 2018.- № 6 (10). – С.15-21.

20. Козлов А.В. Информационные единицы в субсидиарных технологиях // Славянский форум. -2019. – 1(23). - С.14-19.
21. Tsvetkov V. Ya. Semantic Information Units as L.Florodi's Ideas Development // European researcher. 2012. № 7 (25). С.1036-1041.
22. I. N. Rozenberg. Information Construction and Information Units in the Management of Transport Systems // European Journal of Technology and Design, 2016, 2(12), pp. 54-62.
23. Ozhereleva T. A. Systematics for information units // European Researcher. 2014, № 11/1 (86), pp. 1894-1900.
24. Цветков В.Я. Дихотомический анализ сложности системы // Перспективы науки и образования- 2014. - №2. – С.15-20.
25. Номоконова О. Ю. Системы сравнительного анализа в медицинской диагностике // Славянский форум. -2019. – 3(25). - С.173-181.
26. Tsvetkov V.Y. Correlative analysis and opposition variables // European Journal Of Natural History, 2014. №1, С.48-52.
27. Савиных В.П. Оппозиционный анализ в информационном поле // Славянский форум, 2016. -3(13). – С.236-241.
28. Цветков В.Я. Комплементарность информационных ресурсов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №2. – С.182-185.
29. Межуев В. И. Использование векторной алгебры для построения инструментов предметно-ориентированного моделирования //Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2010. – №. 2. – С.79-84.
30. Лютый А.А. Язык карты: сущность, система, функции.-2-е изд. - М.: ГЕОС, 2002. - 327 с.
31. Докукин П. А. Графические информационные единицы // Перспективы науки и образования. - 2015. - №3. - С.32-39.
32. Дышленко С.Г. Трехмерные информационные единицы // Перспективы науки и образования. - 2016. - №5. - С.15-19.
33. Priemus H., Zonneveld W. What are corridors and what are the issues? Introduction to special issue: the governance of corridors //Journal of Transport Geography. – 2003. – V. 11. – №. 3. – С. 167-177.
34. Witte P. et al. Capitalising on Spatiality in European Transport Corridors //Tijdschrift voor economische en sociale geografie. – 2013. – V. 104. – №. 4. – С. 510-517.
35. Ознамец В. В. Ситуационное решение задачи пространственного размещения // Геодезия и картография, - 2018. - №9. – С.45-51.
36. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях интервальной неопределенности //Автоматика и телемеханика. – 1992. – №. 7. – С. 97-106.
37. Буравцев А.В. Сложные технологические системы// Славянский форум. - 2017. -4(18). – С.14-19.
38. Кулагин В. П., Цветков В. Я. Геознание: представление и лингвистические аспекты // Информационные технологии. - 2013. - №12. - С.2-9.
39. Розенберг И.Н., Козлов А.В. Логический анализ схем управления // Славянский форум. - 2018. – 2(20). - С.83-89.
40. Лёвин Б. А., Розенберг И. Н., Цветков В. Я. Пространственные логические рассуждения при поддержке принятия решений // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 1(9). – С.3 - 16.

41. Дешко И.П. Информационное конструирование: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2016. – 64с.
42. Дышленко С. Г. Ситуационный анализ в транспортной сети // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.26-33.
43. Markelov V.M. The Application of Information Units in Logistics// European Journal of Technology and Design, 2014, № 4(6), p.176-183.
44. Савиных В.П. Геоинформационное моделирование в космических исследованиях // Образовательные ресурсы и технологии – 2017. -3 (20). – С.109-117.
45. Булгаков С.В., Ковальчук А.В., Цветков В.Я., Шайтура С.В. Интегрированные геоинформационные системы. - М.: МГТУ им. Баумана, 2007 – 113 с.
46. Андреева О.А. Геоинформационное моделирование // Славянский форум. -2019. – 2(24). - С.7-12.
47. Козлов А.В. Логические дескриптивные и прескриптивные модели // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. - 2018.- № 6 (10). -С.3–8
48. Раев В.К. Процессуальные и дескриптивные информационные модели // Славянский форум. -2018. – 3(21). - С.28-32.
49. Ожерельева Т.А. Информационное соответствие и информационный морфизм в информационном поле // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2017 -№4. – С.86-92.
50. Номоконова О. Ю., Виды информационных соответствий // Славянский форум. -2018. – 2(20). - С.44-49.

УДК: 333.24 65.0 004.08

## СУБСИДИАРНОСТЬ ТРАНСПОРТНЫХ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**Козлов А. В.** Зам. директора Физико-технологического института, Московский технологический университет (МИРЭА), E-mail: av-kozlov@mail.ru, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье анализируется развитие и применение кибер-физических систем для управления транспортом. Дается компонентный анализ транспортной кибер-физической системы, раскрываются ее компоненты и особенности: embedded system, ubiquitous computing, pervasive computing, pervasive computing, ambient intelligence, everywhere, мультиагентные алгоритмы и идеология робототехнических систем. Рассмотрены условия применения кибер-физических систем для управления железнодорожным транспортом, рекомендовано использовать комплексы TCPS не только как автономные системы, но и как подсистемы в централизованной системе управления движением.

**Ключевые слова:** транспорт, управление, информационная ситуация, двухуровневые алгоритмы, двухуровневое и многоцелевое управление.

## SUBSIDIARITY OF TRANSPORT CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

**Kozlov A. V.** Deputy Director of the Physics - Technological Institute, Moscow Technological University (MIREA), E-mail: av-kozlov@mail.ru, Moscow, Russia

**Annotation.** The article analyzes the development and application of cyber-physical systems for transport management. A component analysis of the transport cyber-physical system is given, its components and features are revealed: embedded system, ubiquitous computing, pervasive computing, pervasive computing, ambient intelligence, everywhere, multi-agent algorithms and the ideology of robotic systems. The conditions for the use of cyber-physical systems for railway control are considered, it is recommended to use TCPS complexes not only as autonomous systems, but also as subsystems in a centralized traffic control system.

**Keywords:** transport, management, information situation, two-level algorithms, two-level and multi-purpose management.

### Введение.

Железнодорожный транспорт является одной из самых развивающихся областей. В докладе о мировых рынках железнодорожного транспорта (2016-2025 годы) [1] отмечена тенденция роста в грузовом, пассажирском и городском сегментах железнодорожного транспорта. Другой важной тенденцией является интеграция железнодорожного транспорта в единую транспортную систему и проведение единой транспортной политики [2]. Имеет место проявление новых направлений в современных научно-исследовательских работах на железнодорожном транспорте, таких как автономный поезд [3], цифровая железная дорога [4, 5], интеллектуальные логистические системы [6], интеллектуальные транспортные системы [7] и другие.

Внутри этих направлений развиваются более детальные исследования, например: транспорт подключенной мобильности [8], зеленый транспорт [9], промышленность 4.0 [10], виртуальная реальность как инструмент управления [11], беспилотное управление, перенос методов беспилотного управления в авиации в технологии наземного беспилотного управления, развитие систем помощи обнаружения препятствий. Международное энергетическое агентство (МЭА) констатирует [12]:

- Железнодорожный транспорт является одним из самых энергоэффективным. Железнодорожный сектор перевозит 8% мировых пассажиров и 7% мирового грузоперевозок, но использует лишь 2% мирового спроса на энергию;
- Наиболее электрифицированным видом среди всех видов транспорта является железнодорожный транспорт, в который курсируют три четверти поездов;
- Железнодорожный транспорт является одним из наиболее энергоэффективных видов транспорта, его значение часто не рассматривается в вопросах загрязнения окружающей среды и энергетического кризис.

Рост сложности управления транспортом требует применения новых подходов. Таким подходом является распределенное интеллектуальное сетевое управление, основанное на применении кибер-физических систем [13] и транспортных кибер-физических систем [14, 15]. Кибер-физические системы или cyber-physical system (CPS) применяют интеллектуальное внутрисетевое моделирование. Во многих случаях алгоритм их работы подобен мультиагентным алгоритмам [16] или субсидиарным алгоритмам [17]. Реализация интеллектуального подхода для управления транспортом может существенным образом повысить эффективность управления транспортом и его инфраструктурой особенно в сложных и чрезвычайных ситуациях. Кибер-физические системы освещены в литературе достаточно широко. В сфере транспорта существует их дифференциация: транспортные кибер-физические системы для автономного управления подвижными объектами железнодорожного транспорта; кибер-физические системы для управления трафиком (потоками); мобильные киберфизические системы; авиационные киберфизические системы; робототехнические киберфизические системы, комплексы киберфизических систем и др. Это делает актуальным анализ применения кибер-физических систем для управления транспортом и анализ необходимых условий и моделей для реализации этого подхода

#### **Развитие кибер-физических систем.**

Существует много определений кибер-физических систем (CPS), главным образом из-за различных контекстов. Несмотря на эти различия, большинство из этих определений, как правило, констатирует то, что CPS объединяют физический и цифровой миры с помощью системы датчиков и приводов для выполнения реальных задач. Кибер-физические системы включают устройства сбора и измерений, но не ограничиваются измерениями. Они выполняют обработку данных, вычисления, индикацию и защиту системы. CPS включают в себя интеграцию вычислений, сетевых и физических процессов. Осуществляют обработку и анализ в режиме реального времени. Они проявляют реактивность, с помощью программного обеспечения и информационных ресурсов [18]. А работе [19] подробно описана связь между кибер- и физическими мирами. Эту связь обеспечивают и контролируют встроенные вычислительные устройства. Эти устройства контролируют физические процессы, в то время как физические процессы влияют на вычисления через циклы обратной связи.

Этот механизм циклической связи между кибер-физическим и физическим мирами

дополнительно описан автором в [20], который утверждает, что CPS состоят из двух основных функциональных компонентов. Первый это расширенная связи для получения данных в реальном времени из физического мира и обратной связи с кибер-миром. Второй компонент – это интеллектуальное управление данными, аналитика и вычислительные возможности, которые являются основой кибер-мира.

По мнению автора работы [21], разработка CPS требует инженерных инструментов, способных поддерживать распределенные системы, и что процесс разработки в сочетании с существенным сдвигом в акценте от традиционных монолитных, специализированных, изолированных инженерных инструментов и методов движется в сторону интегрированных облачных инструментов и системных инфраструктур, основанных на Интернет-услугах и связанных с ними данных. Текущие тенденции в обрабатывающей промышленности всегда связывают CPS с индустрией 4.0 [10] и аналитикой больших данных [22].

Для решения сложных проблем и обслуживания сложных систем таких как железнодорожный поезд создают комплексы кибер-физических систем, подобно стаевым роботам. Кибер-физические системы, которые обслуживают транспортные средства называют мобильными.

Комплексы (стаи) или системы CPS и TCPS состоят из нескольких CPS, в которых каждый CPS состоит из комплементарных типов систем или оборудования. Термин «стаи CPS» употребляют по аналогии со стаями роботов, для которых характерно использование общих (стаевых) алгоритмов поведения и индивидуальных алгоритмов локального контроля. Для комплексов (систем) транспортных кибер-физических систем характерная работа двух алгоритмов, имеющих свои веса. Изначально вес группового алгоритма выше. Но, в связи с непредсказуемой ситуацией, вес индивидуального алгоритма поведения CPS может стать более высоким чем вес группового алгоритма. такие системы называют субсидиарными и алгоритмы поведения с переменным весом также называют субсидиарными [23].

В литературе и в практическом применении подход комплексов кибер-физических систем состоит из управления и обращения с субъектами на уровне взаимодействия внутри комплекса, в отличие от отдельных CPS систем [24]. В последних приложениях подход комплексов к работе с мобильными кибер-физическими системами считается наилучшей практикой, поскольку он улучшает общее управление мобильными активами и, в частности, в приобретении, диагностике, прогнозе, планировании технического обслуживания, распределении ресурсов и функциях управления операциями [25]. Достижения в области кибер-физических подходов и связанных с ними методологиями комплексов CPS еще больше облегчают групповой подход к управлению мобильными системами.

Кибер-физические системы возникли в результате интеграции компонент технических и технологических систем и вычислительных технологий. Кибер-физические системы (CPS) формировались на основе интеграции ряда технологических и программных компонент. На рис.1 представлены основные компоненты кибер-физических систем.

Базовые компоненты кибер-физических систем это: технологии Интернет вещей (IoT) [26, 27]; встроенные распределенные системы, (embedded system); технологии широких вычислений (Ubiquitous computing), мультиагентные алгоритмы (МА алгоритмы) и технологии, технологии и алгоритмы робото - технических системы (распределенные PTC) и фоновые технологии сетевого обмена информацией и технологии информационного взаимодействия.

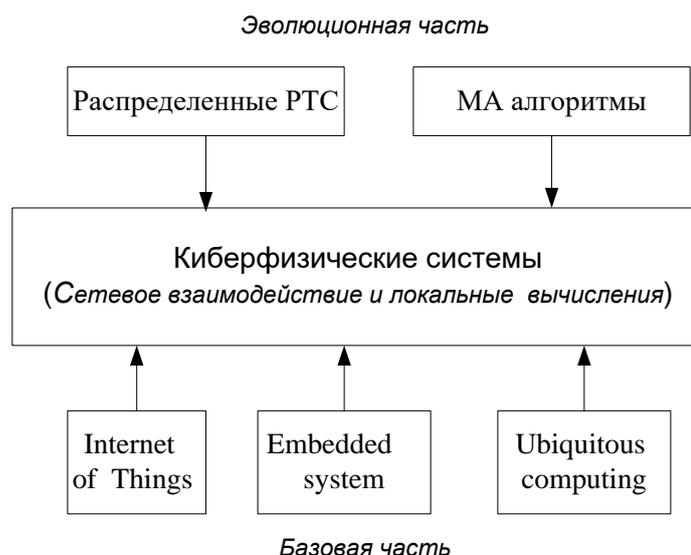


Рисунок 1. Компоненты CPS

*Технология Интернет вещей* (Internet of Things - IoT) – это такая технологическая система [26-28], в которой любой физический объект может быть соединен с любым другим физическим объектом. Структурно IoT может быть представлена как специальная сеть или распределенная система, включающая межсетевое взаимодействие физических устройств, транспортных средств, зданий и других объектов, встроенных в электронику (программное обеспечение, датчики, исполнительные механизмы). Технология IoT позволяет объектам, объединенным в эту специальную сеть, собирать данные и обмениваться ими. В аспекте обработки информации и вычислений IoT рассматривают как упрощенная вычислительная сеть. Отличие IoT как системы от обычных сетей в возможности производить вычислительные операции, используя собственные ресурсы. Это свойство существенно развито в CPS. В отличие от технологической системы IoT кибер-физическая система трактуется как технически-кибернетическая система. Это обусловлено тем, что важными частями CPS являются технические устройства: исполнительные механизмы и распределенная система датчиков и приводов.

*Встроенная система* (embedded system - ES) [29] (также встраиваемая система) является важнейшим компонентом CPS. Эта компонента трактуется в широком и узком смысле. В широком смысле этот компонент означает внутреннюю вложенность разных частей CPS и ее распределенную реализацию. В узком вычислительном смысле этим термином обозначают локальный вычислитель, который представляет собой вычислительное устройство с ограниченными вычислительными ресурсами. При этом такой вычислитель как искусственный нейрон имеет возможность объединять свои ресурсы с другими вычислителями CPS. Мало того, при организации CPS в комплексы или системы существует возможность интеграции вычислителей отдельных систем в системный комплекс для организации «коллективного разума» комплекса CPS. Такое объединение возникает при решении сложных задач [29], например при объединении ES отдельных вагонов в единую систему поезда. Как технический компонент ES встроен как технический элемент, имеющий аппаратную реализацию. Назначение технических встраиваемых систем – сбор информации, контроль и индикация.

Назначение вычислительных встраиваемых систем – вычисления. Назначение управляющих

встраиваемых систем – контроль и управление других устройств. Девяносто восемь процентов всех микропроцессоров производятся как встроенные системы [30]. Процессоры, применяемые во встроенных системах, имеют разные функции и масштабы. Общим классом выделенных процессоров является цифровой сигнальный процессор (DSP). Встраиваемые системы широко применяют для управления в транспортных системах. Наличие их в кибер-физических системах создает предпосылки для применения CPS в транспортной сфере и, в частности, на железнодорожном транспорте.

*Повсеместные вычисления* (ubiquitous computing) [31] – технологическая компонента CPS. Этот термин переводят также как широкие вычисления. Повсеместные вычисления являются обязательным компонентом и отличительным компонентом CPS. Они задают вычислительный ресурс, субсидиарность и автономность кибер-физических систем. Они задают отличие от пассивных распределенных систем. Повсеместные вычисления создают возможность активных действий для CPS.

Концепция повсеместное вычисление существует также в программной инженерии [31, 32], в интеллектуальных системах, робототехнических системах и информатике. Повсеместное вычисление в CPS может происходить с использованием любого вычислителя типа ES, в любом узле и в любом сочетании. Эта технология трактуется также как «распространяющиеся вычисления» (pervasive computing) [33], «окружающий интеллект» (ambient intelligence) [34] или «всякое обеспечение» (everyware) [35]. Каждый термин подчеркивает определенный контекст решаемой задачи. Кроме того, эту технологию называют: физические вычисления, Интернет Вещей, тактильные вычисления. Широкие вычисления используют разные подходы, включая распределенные вычисления, мобильные вычисления, локальные вычисления, мобильные сети, контекстно-зависимые вычисления, сенсорные сети, взаимодействие между людьми и компьютером и искусственный интеллект. Эта технология дополняет другие технологии для формирования интеллекта кибер-физических систем

*Мультиагентные алгоритмы* [16] принципиально не являются детерминированными и одно проходными. Многие задачи неразрешимы не с помощью детерминированных вычислительных моделей, но разрешимы с помощью недетерминированных вычислительных моделей. Наиболее яркий пример мультиагентные системы и поведение живых систем в группах: муравьиная колония, рой пчел, стая птиц, а также стаи роботов. Не детерминированные вычислительные модели обладают способностью выполнять параллельно ограниченное количество независимых вычислений (т.е. реализовать одновременно бесконечное число алгоритмов, равное числу мультиагентов).

Можно определить мультиагентные алгоритмы как адаптивные алгоритмы, которые подстраиваются под конкретную задачу. Можно определить мультиагентные алгоритмы как субсидиарные алгоритмы, которые могут выбирать самостоятельно путь решения задач. Именно эти свойства является важным для CPS. Это сближает кибер-физические и субсидиарные системы. Можно говорить, что большинство современных CPS строится на основе информационно вычислительных и мультиагентных сетей. Они характеризуются, прежде всего, переходом от системы с одной вычислительной траекторией к итеративной многотраекторной обработке данных. Для обеспечения гибкости внедрения различных архитектур субсидиарных систем, используют внутренние сети, которые образуются поверх существующих физических систем. Типичным примером использования этого принципа для реализации вычислительных систем является технология искусственной нейронной сети.

*Распределенные робототехнические системы (РТС)* являются направлением развития робототехнических систем. Современные робототехнические системы применяют ЕС вычислительных систем, которые в РТС образуют централизованную архитектуру, а в CPS используют принципы децентрализованного вычисления

Исследования в области создания ЕС вычислительных систем ведутся во многих мировых научных центрах. Для CPS и РТС большое значение имеет развитие сенсорных систем, систем глобальной навигации, инфракрасных датчиков, ультразвуковых локаторов. В сочетании с интеллектуальными возможностями датчики позволяют решать адаптивные задачи управления и поведения CPS и РТС. Одной из важных особенностей CPS и РТС, имеющих адаптивные вычислительные возможности, является решение проблемы живучести.

В настоящее время широко практикуется создание комплексов CPS и РТС. Например, комплекс РТС представляет собой группу роботов, которые управляются с помощью общих вычислительных ресурсов. Комплекс CPS представляет собой совокупность CPS, обслуживающих поезд, которые также управляются с помощью общих вычислительных ресурсов

CPS и РТС в комплексе функционируют автономно и кооперативно, координируя свои действия между собой по сети. Функционирование CPS и РТС допускает возможность отказов, заключающихся в полной или частичной потере связи между частями комплекса. Учет и устранение отказов может быть осуществлено с использованием специализированных вычислительных ресурсов CPS и РТС. Одним из простых методов является реконфигурация структуры комплекса CPS. Поэтому задача создания структуры комплексов CPS должна предусматривать возможность реконфигурации как всего комплекса, так и ЕС внутри кибер-физической системы.

МА алгоритмы и идеологию РТС можно рассматривать как эволюционные компоненты CPS. Остальные компоненты являются технологическими. Конкретная реализация CPS адаптируется «под задачу». Большое значение кибер-физические системы имеют для крупномасштабных распределенных систем, к числу которых относятся системы сферы транспорта.

### **Транспортные реализации CPS.**

Транспортные реализации CPS имеют одинаковую аббревиатуру TCPS, но качественно разные типы. Символ Т может означать «транспорт» и может означать «трафик». В первом случае TCPS [36] означает кибер-физическую систему управления подвижным объектом: самолетом, судном поездом. Эта система локализована в подвижном объекте. В втором случае TCPS означает кибер-физическую систему управления транспортными потоками и локализована в ситуационной центр управления регионом или отраслью.

Сравнение с интеллектуальными транспортными системами (ИТС) говорить о больших возможностях CPS. Интеллектуальные системы не дали ожидаемого эффекта в силу их концентрации в центре управления и удаленности от объекта управления. CPS являются распределенными. Они концентрируются в объекте управления, имея связь с центром управления. CPS оперативно и детально оценивают управленческую ситуацию и имеют возможность более оперативных действий в сравнении с ИТС. Недостатком CPS является их техническая, технологическая и вычислительная сложность. Это требует привлечения разных специалистов для их формирования. Разнообразная сложность кибер-физических систем обуславливает сложность определения этих систем. Иногда их определяют через перечисление функций. Отсюда вытекают определения CPS по разным аспектам. В аспекте интегрированных

систем кибер-физические системы представляют собой интегрированный комплекс вычислительных, сетевых и физических процессов. В аспекте управления кибер-физические системы представляют собой распределенные системы управления, которые содержат встроенные компьютеры и вычислительные узлы и управляют физическими процессами. В аспекте методики вычисления кибер-физические системы представляют собой распределенные системы вычисления.

Модели, используемые в CPS многообразны. Они включают концептуальные, математические, управленческие, технологические. CPS как системы управления ориентированы преимущественно на управления подвижными объектами, включая управление потоками [36]. При этом следует отметить, что одной из целей при создании CPS является отражение кибер угроз. Такая возможность означает, что CPS приспособлены к работе с динамическими ситуациями. Это создает их преимущество как систем многоцелевого управления [37].

Модели CPS строятся на основе информационных конструкций и информационных единиц [38]. Информационные единицы образуют языковую среду, что в соответствии с теорией семиотического управления служит основой интеллектуального управления. Кибер-физические системы применяют новый тип информационно-физического взаимодействия. Как интеллектуальные системы кибер-физические системы используют само модифицируемые и алгоритмы. Наличие адаптивных алгоритмов делает CPS устойчивыми к кибератакам. Это свойство важно при обеспечении безопасности движения на транспорте.

Выделяется направление применения CPS на транспорте в виде транспортных кибер-физических систем (TCPS). При этом следует отметить, что системы формируются вначале за счет внедрения встроенных систем (embedded system) и датчиков, которые затем объединяют в CPS.

Встраиваемые системы в широком смысле являются портативными устройствами разного типа. Они могут быть установлены на крупные стационарные и подвижные объекты. Встраиваемые системы управляют расходом топлива в автомобиле, применяют в гибридных автомобилях и в БПЛА [39]. Сложность варьируется от одного микроконтроллера до систем с несколькими устройствами, установленными внутри большого шасси или корпуса.

Впервые встраиваемые системы были применены для управления транспортными средствами в космической отрасли. Одной из первых встроенных систем был компьютер Apollo Guidance Computer, разработанный как элемент проекта Apollo. Более ранней версией встроенной системы был Autonetics D-17 компьютер, выпущенный в 1961 году, для управления ракетой Minuteman. в 1966 году, D-17 был заменен новым компьютером.

Системы транспортировки широко используют встроенные системы. Инерциальные системы наведения и приемники GPS включают ES. Их содержат электродвигатели - линейные двигатели постоянного тока, асинхронные двигатели и двигатели постоянного тока.

Автомобили, электромобили и гибридные автомобили все чаще используют встроенные системы, чтобы максимизировать эффективность и уменьшить загрязнение. Другие автомобильные встроенные системы безопасности входят в антиблокировочную тормозную систему (ABS), систему электронного контроля устойчивости (ESC/ESP), систему контроля тяги (TCS) и автоматический привод на все колеса.

При этом разделяют два качественных типа TCPS: внутренняя система внутри движущегося объекта и внешняя система, объединяющая комплекс движущихся объектов, скажем внутри

мегаполиса. Системы второго типа решают задачи управления трафиком движения в системе транспортных потоков [36]. Системы первого типа решают задачи управления отдельными объектами в сложной динамически меняющейся ситуации, например скоростной поезд.

В транспортном секторе комплексы CPS предлагают новый подход к применению информационного управления для повышения эффективности транспортных систем [40]. При таком подходе транспортные системы обладают более высокими возможностями для обнаружения неисправностей, повышения эффективности управления жизненным циклом и минимизации эксплуатационных расходов, чем раньше. Это привело к рождению еще одного поддомена CPS, называемого транспортными комплексами кибер-физических систем (TCPS) [41].

Как и все отрасли транспортной отрасли, сектор железнодорожного транспорта сталкивается с рядом проблем. Согласно докладу, подготовленному железнодорожной технологией (Railway-Technology) об основных проблемах, стоящих перед железнодорожными операторами, сопровождающими, владельцами и ролью ИКТ основные проблемы, стоящие сегодня на железнодорожном транспорте, связаны с операционными и эксплуатационными расходами. Точнее, эти проблемы обусловлены завышением ожиданий со стороны операторов и производителей в этом секторе с точки зрения доступности и надежности комплексов TCPS в чрезмерно возрастающих динамических средах. Обзор литературы, проведенный в соответствии с исследованием выявил направление развития комплексов TCPS в виде реактивных систем FMSP поддержки принятия решений и взаимодействующих с CPS которые снижают операционные и эксплуатационные расходы.

Взаимодействие двух алгоритмов в комплексах TCPS означает взаимодействие двух линий поведения: комплементарности [42, 43] и субсидиарности [44, 45]. Комплементарность означает согласование действий индивидуального и группового алгоритма. субсидиарность означает возрастание веса индивидуального алгоритма по сравнению с весом группового алгоритма.

### **Заключение.**

Проблема «больших данных» имеет место и в транспортной сфере. Транспортные кибер-физические системы являются одним из средств решения проблемы «больших данных» [46]. Из-за многообразия применения не существует строгого определения транспортной кибер-физической системы, хотя во многих работах сформулированы свойства таких систем. Важным свойством TCPS является наличие вычислительных узлов с возможностью организации на их основе интеллектуальной обработки информации. Это свойство позволяет соотносить TCPS с распределенными интеллектуальными транспортными системами. CPS являются более сложными системами в сравнении со всеми системами управления транспортом, включая ИТС. CPS являются распределенными сетевыми системами, но отличаются от коммуникационных систем наличием интеллектуальных узлов и свойством самоверифицируемости и реконфигурации потоков. В обычных сетевых системах это осуществляется извне пользователем.

Опыт применения CPS в транспортной сфере дает основание рекомендовать применение CPS в сфере железнодорожного транспорта и в первую очередь для управления скоростным транспортом. CPS в отличие от ИТС более устойчивы к кибератакам, благодаря наличию автономного управления и принципов саморегуляции. В целом анализ опыта и возможностей CPS дает основание рекомендовать их к применению на железнодорожном транспорте как новый этап развития транспортных систем. Транспортные кибер-физические системы требуют

интеграции исполнительных и сенсорных устройств в единую систему. Они осуществляют первичную обработку и передают в центр управления не «сырую» информацию, требующую обработки, а модели и оценки состояния транспортного средства. Это повышает оперативность централизованного управления. Важным следует считать проведение исследований в области теории и технологии TCPS.

### Список литературы

1. Rail Transport Markets - Global Market Trends 2016-2025'. <https://www.sci.de/en/document/news/rail-transport-markets-global-market-trends-2016-2025/>. Дата просмотра 12.01.2020.
2. Розенберг И. Н. О единой транспортной политике в сфере железнодорожного транспорта // Славянский форум, 2015. - 3(9) - С.244-250.
3. D. Trentesaux et al., 'The Autonomous Train', in IEEE 2018 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE), 2018, pp.514-520.
4. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Цифровая железная дорога: принципы и технологии // Мир транспорта. - 2018. - Т. 16. - №3 (76). - С.50-61.
5. Буравцев А. В. Цифровая железная дорога как сложная организационно-техническая система // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.69-79.
6. Цветков В.Я. Интеллектуализация транспортной логистики // Железнодорожный транспорт. -2011. - №4. – С.38-40.
7. Щенников А.Н. Интеллектуальные транспортные системы как специализированные системы // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 4(4). – С.45-53.
8. Hensher D. A. Tackling road congestion—What might it look like in the future under a collaborative and connected mobility model? //Transport policy. – 2018. – Т. 66. – С.А1-А8.
9. Hua-pu L. U. Approaches towards Realization of Urban Green Transportation [J] //Urban Transport of China. – 2009. – Т6.
10. Tjahjono B. et al. What does industry 4.0 mean to supply chain? //Procedia Manufacturing. – 2017. – Т. 13. – С.1175-1182.
11. V. Ya. Tsvetkov. Virtual Modeling // European Journal of Technology and Design, 2016, 1(11), pp.35-44.
12. Rail Transport Markets - Global Market Trends 2016-2025'. <https://www.sci.de/en/document/news/rail-transport-markets-global-market-trends-2016-2025/>. Дата просмотра 12.01.2020.
13. Цветков В.Я. Управление с применением киберфизических систем // Перспективы науки и образования. - 2017. - №3(27). - С.55-60.
14. Лёвин Б.А., Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Транспортные кибер-физические системы // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 3(3). – С.3-15.
15. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Киберфизические системы в управлении транспортом // Мир транспорта. - 2018. Т. 16. № 2 (75). - С.138-145.
16. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Применение мультиагентных систем в интеллектуальных логистических системах. // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. - №6. – С.107-109.
17. Козлов А.В. Многоцелевое субсидиарное управление // Наука и технологии железных

дорог. – 2019. – 2(10). – С.17-28.

18. S. C. Suh, U. J. Tanik, J. N. Carbone, and A. Eroglu, Eds., *Applied Cyber-Physical Systems*. New York, NY: Springer New York, 2014.

19. Cyber-Physical Systems - a Concept Map'. [Online]. Available: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>. Дата доступа 22.12.2019.

20. H. Chen, 'Applications of Cyber-Physical System: A Literature Review', *J. Ind. Integr. Manag.* vol. 02, no. 03, pp. 1-28, Sep. 2017.

21. A. Vatankhah Barenji and R. Barenji, 'Improving multi-agent manufacturing control system by indirect communication based on ant agents', *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Syst. Control Eng.*, vol. 231, p. 447-458, May 2017.

22. Буравцев А.В., Цветков В.Я. Облачные вычисления для больших геопространственных данных // *Информация и космос*. 2019. - №3. – С.110-115.

23. Розенберг И.Н., Цветков В.Я. Критерии выбора субсидиарного управления // *Государственный советник*. – 2017. - №1. – С.10-15.

24. Fleet management approach design', *Arthur D. Little France*, 26-May-2017.: <http://www.adlittle.fr/en/career/case-studies/fleet-management-approach-design-0>. Дата доступа 22.12.2019.

25. J. Mbuli, D. Trentesaux, J. Clarhaut, and G. Branger, 'Decision support in condition-based maintenance of a fleet of cyber-physical systems: a fuzzy logic approach', in *IEEE Intelligent Systems Conference (IntelliSys)*, 2017, pp.82-89.

26. Дешко И.П., Кряженков К.Г., Цветков В.Я. Устройства, модели и архитектуры Интернета вещей: Учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2017. – 88с.

27. Козлов А. В. Интернет вещей как субсидиарная система // *Государственный советник*. – 2019. - №1(25). – С.10-16.

28. Internet of Things Global Standards Initiative. ITU. <http://www.itu.int/en/ITU-T/gsi/iot/Pages/default.aspx>. Дата доступа 10.03.2020.

29. Michael Barr. "Embedded Systems Glossary". Neutrino Technical Library. <https://barrgroup.com/Embedded-Systems/Glossary>. Дата доступа 10.03.2020

30. Barr M. Real men program in C // *Embedded systems design*.–2009.–Т. 22. – №. 7. – С.3.

31. Modahl M. et al. UbiqStack: a taxonomy for a ubiquitous computing software stack // *Personal and Ubiquitous Computing*. – 2006. – Т. 10. – №. 1. – С.21-27.

32. Дешко И.П., Кряженков К.Г., Цветков В.Я. Системная и программная инженерия: Учебное пособие. – М.: МАКС Пресс, 2018. – 80 с.

33. Saha D., Mukherjee A. Pervasive computing: a paradigm for the 21st century // *Computer*. – 2003. – Т. 36. – №. 3. – С.25-31.

34. Cook D. J., Augusto J. C., Jakkula V. R. Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities // *Pervasive and Mobile Computing*. – 2009. – Т. 5. – №. 4. – С.277-298.

35. Greenfield, Adam (2006). *Everyware: the dawning age of ubiquitous computing*. New Riders. pp. 11–12. ISBN 0-321-38401-6.

36. Jianjun S. et al. The analysis of traffic control cyber-physical systems // *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. – 2013. – Т. 96. – С.2487-2496.

37. Tsvetkov V. Ya. Multipurpose Management// *European Journal of Economic Studies* 2012, № 2(2) - p.140-143.

38. Tsvetkov V. Ya. Logic units of information systems // *European Journal of Natural History*. –

2009. – № 2. – p.99-100.

39. Ознамец В. В. Геомониторинг на транспорте с использованием БПЛА// Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.43-53.

40. D. P. F. Moller and H. Vakilzadian, 'Cyber-physical systems in smart transportation', in *2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)*, 2016, pp. 0776-0781.

41. M. Han, Z. Duan, and Y. Li, 'Privacy Issues for Transportation Cyber Physical Systems', in *Secure and Trustworthy Transportation Cyber-Physical Systems*, Y. Sun and H. Song, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp.67-86

42. Цветков В.Я. Комплементарность информационных ресурсов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №2. – С.182-185.

43. Щенников А. Н. Комплементарное управление транспортными потоками мегаполиса // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 3(11). – С.17-25.

44. Цветков В.Я. Применение принципа субсидиарности в информационной экономике // Финансовый бизнес. -2012. - №6. - С.40-43.

45. Козлов А.В. Многоцелевое субсидиарное управление // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 2(10). – С.17-28.

46. Cartwright R. et al. Cyber-physical challenges in transportation system design //Proc. Nat. Workshop Res. High-Confidence Transportation Cyber-Physical Syst.: Automotive, Aviation Rail. – 2008.

УДК: 528.9; 004.94

## **ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ КОМПЛЕКСНОЙ ВОЗДУШНОЙ СЪЕМКЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ**

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

**Аннотация.** В статье рассматриваются комплексные технологии сбора информации, которые применяют для геоинформационного моделирования железнодорожного пути. Описан сбор информации при комплексной воздушной съемке, показана связь графической информации с базой данных ГИС. Геоинформационное моделирование дает возможность визуального моделирования, что позволяет оптимизировать проекты с использованием эвристических технологий. Введено формальное описание ситуационного геоинформационного моделирования.

**Ключевые слова:** транспорт, железнодорожный путь, геоинформатика, моделирование, геоинформационное моделирование, комплексная съемка

## **GEOINFORMATION MODELING DURING COMPLEX AERIAL SURVEY OF A RAILWAY TRACK**

**Oznamets V. V.** PhD, Professor, Head of the chair, Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAIK), E-mail: voznam@bk.ru, Moscow, Russia

**Annotation.** The article discusses complex kit of information technologies, that are used for geoinformation modeling of the railway track. The collection of information during integrated aerial photography is described, the relationship of graphical information with a GIS database is shown. Geoinformation modeling allows visual modeling, which allows you to optimize projects using heuristic technologies. A formal description of situational geographic information modeling is introduced.

**Keywords:** transport, railway track, geoinformatics, modeling, geoinformation modeling, integrated survey.

### **Введение.**

Проектирование, мониторинг, контроль, моделирование при мониторинге и строительстве железных дорог, используют разные источники пространственной информации. Одним из традиционных источников при исследовании протяженных объектов является воздушная съемка. Воздушная съемка включает разные виды съемок: аэрофотосъемку, съемку с вертолетов, съемку с мини-дирижаблей, съемку с мотодельтапланов, съемку с беспилотных летательных аппаратов. В последнее время находит широкое распространение мобильное лазерное сканирование [1] с воздушных и наземных носителей. В широком смысле слова получение пространственных данных с помощью разных источников информации входят в задачи геодезического обеспечения. В дальнейшем эти данные применяют для решения прикладных задач в разных областях. Все эти данные используют для пространственного

моделирования. В настоящее время основой пространственного моделирования является геоинформатика. В геоинформатике существует специальное моделирование, основанное на интеграции данных и применении геоданных. Это геоинформационное моделирование [2-4], которое включает построение и преобразование геоинформационных моделей.

Пространственные объекты в геоинформатике классифицируют по четырем классам: точечные, линейные, ареальные и объемные [5, 6]. Это делает удобным использование геоинформационных технологий для моделирования любых пространственных объектов с нанесением их на картографическую основу или в виде пространственной совокупности. Пространственные модели имеют разные геометрические характеристики: протяженность, ширина (для объектов постоянной ширины), ширина начальной части линии и конечной части линии, тип линейного объекта, координаты начальных, конечных и промежуточных точек.

Модели транспортной сети имеют такие атрибутивные характеристики: пропускная способность, загруженность, допустимая максимальная скорость, связанность с другими объектами, оценка риска, экономическое значение, региональное значение, объем перевозок, срок эксплуатации, износ. В геоинформатике координатная группа данных называется метрической, а остальные данные называют не метрическими или атрибутивными [5]. Геоинформационное моделирование оценивает и использует пространственные отношения [7, 8]. Специфическим видом пространственных отношений являются геореференции [9, 10]. Геоинформационное моделирование позволяет получать цифровые модели [11, 12] и трехмерные модели пространственных объектов [13]. В широком научном аспекте это моделирование поддерживает качественные пространственные рассуждения [14] и получает пространственное знание [15, 16]. Применительно к наукам о Земле геоинформационное моделирование получает геознание [17-20]. Пространственное знание является необходимым условием пространственного управления [21, 22].

### **Специфика геоинформационного моделирования железных дорог.**

Геоинформационное моделирование как технология является инновационной технологией [23]. Инновационность геоинформационных технологий и геоинформационного моделирования обусловлена возможностью интеграции разных видов информации. Интеграция разных видов информации является удобным средством обработки материалов комплексной воздушной съемки.

Геоинформационное моделирование железных дорог включает интерактивное моделирование с помощью ГИС и аналитическое компьютерное моделирование. Пространственная модель в геоинформационной системе организована двойственно [5]. Она включают табличную и графическую (визуальную) части пространственной модели объекта или группы объектов, которые вместе образуют информационную ситуацию. Табличная часть модели является фрагментом базы данных [24, 25] и связана с графической компонентой. Графическая часть пространственной геоинформационной модели является результатом визуализации геоданных. Она дает возможность визуального представления пространственных объектов. Визуальное представление связано с когнитивным моделированием. Визуальная модель позволяет оперативно выполнять когнитивный [26, 27] анализ, который средствами компьютерного анализа либо нельзя выполнить, либо требуется большое количество времени на составление задачи, алгоритмизацию, вычисление и интерпретацию результатов обработки.

В силу этого пространственные модели в ГИС [28] имеют свойства визуальных моделей и свойства моделей базы данных. Это создает информационное и аналитическое преимущество

геоинформационных моделей перед другими. Это делает геоинформационные модели основой при моделировании железных дорог. Геоинформационное моделирование включает следующие виды процедурные компоненты:

- Построение отдельных точек пространственной модели на основе собранной информации и вычисления их координат;
- Построение каркаса пространственной модели объекта на основе формирования совокупностей связанных точек с применением семантического моделирования;
- Получение качественной и количественной оценки пространственных отношений между объектами;
- Преобразование пространственных объектов в выбранную единую координатную системы;
- Построение трехмерных моделей пространственных объектов с применением атрибутов их визуального представления;
- Модификация и актуализация ранее сформированных пространственных объектов на основе новой собранной актуальной информации.

Пространственные отношения в геоинформационном моделировании описывают с помощью теории множеств, законов логики [29] и пространственных рассуждений. Пространственные отношения в геоинформационном моделировании дают возможность построить пространственную модель фона, которая дополняет модели пространственных объектов. Процедуры, которые входят в геоинформационное моделирование, содержательно близки технологиям интеллектуального управления [30]

Основными объектами исследования геоинформатики являются не только пространственные объекты, но и их совокупности, называемые информационными ситуациями [31, 32]. При исследовании железнодорожного пути пространственная информационная ситуация является основным объектом исследования.

При моделировании железных дорог отдельный объект не представляет интереса. Интерес представляет совокупность объектов, связанных между собой. Модель такой связанной совокупности объектов, называется моделью информационной пространственной ситуации. На основе построения и анализа пространственной ситуации получают информацию о состоянии пути или информацию о возможности выноса проекта в натуру. Для выноса проекта в натуру необходима протяженная пространственная геоинформационная модель. Можно ввести понятие ситуационного моделирования. Ситуационное моделирование объектов транспортной инфраструктуры – это пространственное моделирование объектов, которые связаны с другими объектами и в совокупности образуют модель пространственной ситуации [33, 34]. Информационная пространственная ситуация – это модель, включающая совокупность моделей пространственных объектов и отношений между ними. Только информационная пространственная ситуация позволяет проводить комплексный анализ состояния и изменения железнодорожного пути.

#### **Построение пространственной модели.**

При моделировании важно выбирать базовые элементы моделирования, на основе которых в дальнейшем формируют модели в данной области. Наличие базовых единиц моделирования служит основой сопоставимости и оценке разных моделей и разных ситуаций. Основой выбора таких единиц служит логика и логические рассуждения. Соответственно, простейшая модель таких единиц является логической [35], которая затем служит основой для построения

физических или математических единиц моделирования.

При комплексной воздушной съемке железнодорожного пути основной информацией является фотограмметрическая информация. Фотограмметрические методы сбора являются частью геоинформационных технологий. Фотограмметрическая засечка — способ определения координат точек объекта по их изображениям на паре или более снимков (рис.1).

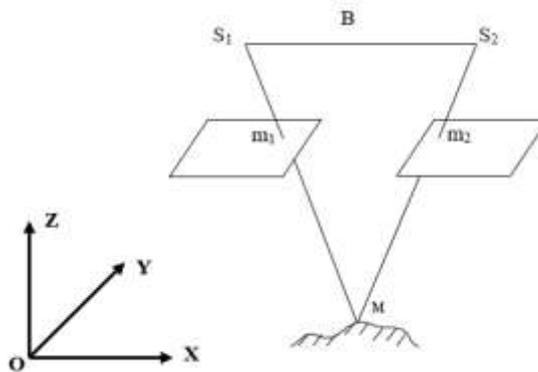


Рисунок 1. Прямая фотограмметрическая засечка

Если точка объекта М (рис.1) изобразилась на паре снимков, для которых известны элементы внешнего и внутреннего ориентирования, то координаты этой точки XYZ в системе координат объекта OXYZ можно вычислить по формулам прямой засечки:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S_1} \\ Y_{S_1} \\ Z_{S_1} \end{pmatrix} + N \begin{pmatrix} X'_1 \\ Y'_1 \\ Z'_1 \end{pmatrix} \tag{1}.$$

где

$$N = \frac{\left[ (B_Y Z'_2 - B_Z Y'_2)^2 + (B_X Z'_2 - B_Z X'_2)^2 + (B_X Y'_2 - B_Y X'_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[ (Y'_1 Z'_2 - Y'_2 Z'_1)^2 + (X'_1 Z'_2 - X'_2 Z'_1)^2 + (X'_1 Y'_2 - X'_2 Y'_1)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

$$\begin{pmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{pmatrix} = A_i \begin{pmatrix} x_i - x_{0i} \\ y_i - y_{0i} \\ -f_i \end{pmatrix} \left. \begin{matrix} B_X = X_{S_2} - X_{S_1} \\ B_Y = Y_{S_2} - Y_{S_1} \\ B_Z = Z_{S_2} - Z_{S_1} \end{matrix} \right\}$$

Здесь *i* – номер снимка; *x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>* - координаты точки снимка; *x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>, f* - элементы внутреннего ориентирования снимков; *A<sub>i</sub>* – матрица поворота, элементами которой являются направляющие косинусы, зависящие от угловых элементов внешнего ориентирования *α<sub>i</sub> ω<sub>i</sub> χ<sub>i</sub>*; *X<sub>S<sub>i</sub></sub>* Y<sub>S<sub>i</sub></sub> Z<sub>S<sub>i</sub></sub> – координаты центров фотографирования; *B<sub>X</sub> B<sub>Y</sub> B<sub>Z</sub>* – составляющие базиса фотографирования *B* вдоль осей XYZ.

Если точка местности изобразилась на нескольких снимках, для которых известны элементы внешнего ориентирования, то для определения ее координат XYZ используют уравнения коллинеарности:

$$\left. \begin{aligned} x_0 - f \frac{a_{11}(X - X_S) + a_{12}(Y - Y_S) + a_{13}(Z - Z_S)}{a_{31}(X - X_S) + a_{32}(Y - Y_S) + a_{33}(Z - Z_S)} - x &= 0 \\ y_0 - f \frac{a_{21}(X - X_S) + a_{22}(Y - Y_S) + a_{23}(Z - Z_S)}{a_{31}(X - X_S) + a_{32}(Y - Y_S) + a_{33}(Z - Z_S)} - y &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2).$$

Эти уравнения составляют по каждому измерению координат  $x$ ,  $y$  изображений точки на всех снимках. Задача решается методом приближений по способу наименьших квадратов. Результатом фотограмметрической обработки могут быть не только точки, сколько картографическая продукция, пространственные модели, а также фотосхема и фотоплан.

Фотосхема — фотографическое изображение местности, полученное в результате монтажа полезных площадей нетрансформированных плановых аэрофотоснимков по их общим точкам или по начальным направлениям. Изготовление фотосхемы не требует полевой подготовки и трансформирования аэрофотоснимков, поэтому она может быть получена в короткий срок после аэрофотосъемки. Фотосхема используется для изучения местности при изысканиях, не требующих точных измерений. Масштаб фотосхемы равен масштабу аэрофотосъемки. Фотосхема, смонтированная по начальным направлениям, по точности несколько выше, чем смонтированная по контурам, называется уточненной фотосхемой, но на ее изготовление затрачивается больше времени, чем на обычную фотосхему.

Фотоплан [36] — фотографическое изображение местности, полученное в результате цифрового трансформирования по опорным точкам аэрофотоснимков. Фотоплан изготавливается в рамках съемочной трапеции; точность положения контуров относительно геодезических пунктов соответствует точности топографической карты такого же масштаба, что и фотоплан.

#### **Аэровизуальные наблюдения и аэрофотосъемка.**

Аэровизуальные наблюдения [36] выполняют для наземных объектов и явлений для предпроектных целей. Аэровизуальные наблюдения выполняются с летательных аппаратов визуально и предназначены главным образом для обследования труднодоступных районов, ускорения и облегчения экспедиционных работ на местности. Аэровизуальные наблюдения дают возможность изучать объекты не только в их плановом изображении с одним заданным уменьшением, как на аэрофотоснимках или картах, но и в любом ракурсе и наиболее выгодном масштабе.

Аэрофотосъемка [36] — технология фотосъемки местности с самолета или другого носителя. Аэрофотосъемку производят для создания топографических карт; изучения и учета лесных и земельных фондов; проектирования инженерных сооружений и проектирования железных дорог. В качестве носителей съемочной аппаратуры используют: самолет, вертолет, мотодельтаплан, БПЛА, воздушный шар, мини-дирижабль

Аэрофотосъемка подразделяется в зависимости от характера залета на одинарную, маршрутную и площадную; в зависимости от вида аэрофотоснимков — на плановую и перспективную. Аэрофотосъемка одинарная - аэрофотосъемка отдельных объектов или групп, когда нет надобности в стереоскопическом рассматривании сфотографированных объектов и построении объемных моделей. Применяется для изучения качественных характеристик объектов. Аэрофотосъемка маршрутная — аэрофотосъемка местности, осуществляемая непрерывно на последовательность кадровых снимков с перекрытием. Производится вдоль какого-либо направления (маршрута). Выполняется в целях исследования железных дорог, рек,

л и других протяженных объектов.

Аэрофотосъемка плановая — аэрофотосъемка, при которой АФА плоскость прикладной рамки АФА горизонтируется, а оптическая ось объектива во время съемки занимает отвесное положение; отклонение от такого положения на некоторый угол  $\alpha$  происходит лишь вследствие неизбежного колебания самолета в воздухе. Величина угла  $\alpha$  при плановой аэрофотосъемке обычно не превосходит  $3^\circ$  (среднее значение — около  $1,5^\circ$ ), а с применением гиросtabilизирующей установки она уменьшается до  $30''$ .

### Экспериментальные работы

В настоящее время при мониторинге железных дорог выполняют комплексную съемку, которая включает фотосъемку с авианосителя и лазерное сканирование. На рис. 2 показан авианоситель.



Рисунок 2. Авианоситель самолет Ан2 ТП

Работы по комплексной воздушной съемке железнодорожного пути включали следующие этапы: подготовительные работы; геодезическое обеспечение; определение установочных параметров аэросъемочной аппаратуры; уточнение угловых и линейных установочных параметров аэросъемочной аппаратуры посредством проведения съемки специального (калибровочного) объекта; выполнение съемочных работ; первичная обработка данных; камеральные работы по точной геопривязке полетных данных; вторичная обработка данных для получения цифровой модели рельефа и ортофотопланов

Геодезическое обеспечение проводилось с целью точной координатной привязки данных комплексной съемки к системе координат железной дороги. Работы заключались в проведении GNSS-наблюдений на заранее заложенных вдоль ж/д пути базовых станциях в момент выполнения съемки. При выполнении комплексной съемки используют базовые станции. Наблюдения проводились с помощью GPS-приемников. Комплексная съемка производилась с применением лазерного сканера LiteMapper-5600, S/N 08-0112 и цифровой аэрофотокамерой DigiCAM 80/50 мм, S/N 51-0102/12239506 (рис.3).

В процессе производства лазерной локации и аэрофотосъемки определялись элементы взаимного ориентирования GPS антенны, лазерного сканера и аэрофотокамеры. Для определения пространственного положения главных точек сканера и аэрофотокамеры использовалась технология определения углов и расстояний электронным тахеометром и вычисления приращений координат. В процессе производства летно-съемочных работ на борту

летательного аппарата работал входящий в комплект аэросъемочной аппаратуры фазовый GPS-приемник. Бортовой приемник записывал необходимую для расчета траектории информацию одновременно с наземными базовыми приемниками



Рисунок 3. Съемочная цифровая аэрофотокамера DigiCAM 80/50 мм

Аэросъемочные работы производились в системе координат WGS-84. Производство работ соответствует требованиям изготовителя для достижения требуемой точности: работа в благоприятной GPS обстановке ( $PDOP < 4$ ), количество одновременно наблюдаемых спутников GPS не менее 4, соблюдение необходимых угловых параметров (крен, тангаж не более  $20^\circ$ ), расстояние от воздушного судна до базовых приемников не более 30 км, высота спутников над горизонтом более  $10^\circ$ , высота воздушного судна во время аэрофотосъемки не более 550 м, что обеспечивает точность измерений по высоте лучше 10 см, и в плане лучше 8 см. Данные базовых приемников и бортового приемника, регистрировались с периодичностью 1 Гц.

В процессе обработки вычислялись векторы между базовыми GPS-приемниками и бортовым GPS-приемником летательного аппарата для фиксированных моментов времени. Координаты траекторий получаются относительно пунктов опорной геодезической сети

Необходимым условием для проведения работ по комплексной съемке является точное определение параметров взаимного положения и ориентации на борту носителя всех компонентов, участвующих в образовании аэросъемочных данных: сенсора инерциальной системы; центра проекции и оптической оси фотокамеры; фазового центра GPS-антенны.

Требования к точности определения указанных параметров, чрезвычайно высоки: для линейных величин не хуже 1-2 см, для угловых – 2-3 мрад. Сканерный блок и аэрофотокамера были установлены внутри фюзеляжа самолета Ан2. Между ними и GPS антенной отсутствовала прямая видимость. Выполнено определение пространственных координат набора характерных точек при помощи электронного тахеометра и полученные результаты занесены в соответствующие поля программы вместе со значениями углов текущей ориентации сенсора инерциальной системы IMU в момент проведения измерений. Измерение пространственных координат характерных точек выполнены электронным тахеометром в локальной системе координат. Использование программы Off-Setter позволило выполнить все необходимые вычисления с надлежащей точностью. По результатам проведения измерений установочных параметров аэросъемочной аппаратуры были определены следующие усредненные значения, представленные в таблице 1.

Таблица 1.

Усредненные значения установочных параметров аппаратуры

Взаимное пространственное расположение «главных точек» в аэросъемочной аппаратуре	Оси координат		
	X, м	Y, м	Z, м
Смещение фазового центра GPS-антенны относительно центра сканирующего зеркала лазерного сканера по оси	1.086	-0.223	-2.275
Смещение оптического центра матрицы цифровой аэрофотокамеры относительно центра сканирующего зеркала лазерного сканера по оси	0.089	0.002	-0.134

Результатом аэросъемочных работ являлись: неклассифицированные точки лазерных отражений в системе координат WGS-84 в формате LAS; цифровые аэрофотоснимки с элементами внешнего ориентирования в формате JPEG и координатами центров фотографирования в системе координат WGS-84; траектории движения аэрофотоаппарата в системе координат проекта с углами поворота камеры в системе Head/Roll/Pitch; данные фотограмметрической калибровки фотокамеры. Аэроснимки в коридоре съемки представлены на рисунке 4.



Рисунок 4. Ортофотоплан по аэрофотоснимкам.

Триангуляционная регулярная сеть является одной из форм представления трехмерной поверхности. Триангуляционная сеть, которая в нашем случае описывает поверхность рельефа, была создана по классифицированным данным лазерных отражений по слою земля. Триангуляционная сеть была создана и отредактирована в программном продукте Microstation с использованием приложений Terra Solid. Поверхность земли описывается в виде упорядоченных высот заданных на прямоугольной сетке с шагом 1 метр. Цифровая модель рельефа, полученная с помощью геоинформационного моделирования, представлена на рисунке 5.

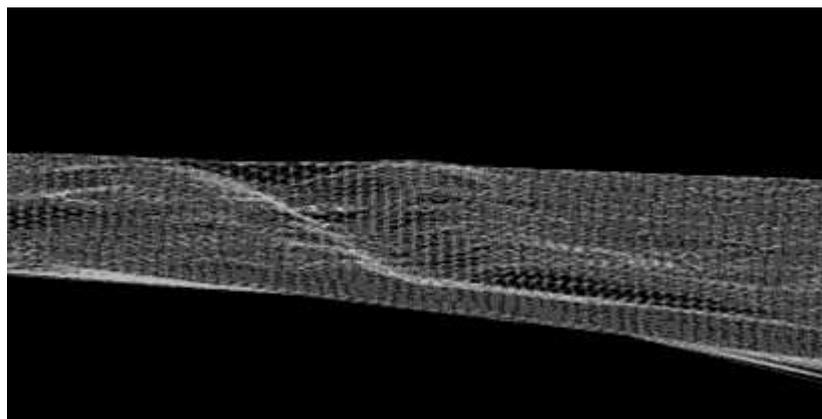


Рисунок 5. Цифровая модель рельефа.

В результате проведения комплексной съемки на одном участке железной дороги было отснято 140 погонных километров, на другом 393 км.

В ходе выполнения сканирования были получены следующие данные: массивы точек лазерных отражений, геопривязанные фотографии; цифровые аэрофотоснимки с элементами внешнего ориентирования и координатами центров фотографирования; цифровые ортофотопланы (рис.6); цифровая модель рельефа; траектории движения мобильной сканирующей системы; траектории движения воздушной сканирующей системы; данные GNSS-наблюдений на базовых станциях при выполнении наземной съемки; данные GNSS-наблюдений на базовых станциях при выполнении воздушной съемки; линейные и угловые установочные параметры аэросъемочной аппаратуры.



Рисунок 6. Цифровой ортофотоплан, полученный на основе комплексной съемки.

Работы по комплексной съемке выполнены в соответствии с техническим заданием и, изготовленные в результате проведения работ материалы. Качество выполненных аэросъемочных, фотограмметрических, топографо-геодезических работ соответствуют техническому заданию, требованиям действующих нормативных документов и инструкций.

#### **Заключение.**

Комплексная воздушная съемка – это съемка, которая основана на интеграции нескольких

технологий сбора информации с учетом их последующей обработки. Комплексная воздушная съемка тесно связана с геоинформационным моделированием, поскольку геоинформационное моделирование обладает способностью интегрировать разные технологии и разные данные. Геоинформационное моделирование является полной системой для моделирования линейных объектов типа железнодорожный путь.

Геоинформационное моделирование объектов транспортной инфраструктуры является ситуационным. Особенность этого подхода в том, что он позволяет интегрировать разные источники информации, в частности данные лазерного сканирования и данные фотосъемки. Особенность геоинформационного моделирования в возможности интерактивного визуального моделирования и подключение когнитивной области человека к процессу моделирования. Комплексная воздушная съемка железнодорожного пути выдвигает важное требование комплементарности [37, 38] разных технологий, которые участвуют в этом комплексе. Геоинформационное моделирование создает условия для моделирования и проектирования пространственных объектов, которые не могут обеспечить другие системы моделирования, например САПР.

Следует подчеркнуть, что геоинформационное моделирование полностью решает задачи проектирования и размещения. Это дает возможность сочетать имитационное моделирование при анализе проекта как конструктивной модели с практической реализацией рабочего проекта. Этим исключается семантический разрыв между теорией проектирования и практической реализацией. Преимуществом геоинформационного моделирования является возможность создания пространственной основы для наложения трехмерных моделей. Это создается путем предварительного цифрового моделирования рельефа и органического использования этой модели при наложении на нее проекта, например проекта железной дороги. Таким образом, геоинформационное моделирование является основой пространственного мониторинга и проектирования. Существует много направлений развития этого направления и это определяет его перспективу.

### Список литературы

1. Андреева О. А. Применение мобильного лазерного сканирования для мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 3(11). – С.61-74.
2. Андреева О.А. Геоинформационное моделирование // Славянский форум. -2019. – 2(24). - С.7-12.
3. Булгаков С. В. Геоинформационное моделирование: учебное пособие. – Москва: МАКС Пресс, 2019. – 68 с.
4. Савиных В.П. Геоинформационное моделирование в космических исследованиях // Образовательные ресурсы и технологии – 2017. -3 (20). – С.109-117.
5. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии - М.: Финансы и статистика, 1998. -288 с.
6. Калачев Д. Н Геоинформатика и исследование глобальных процессов // Российский технологический журнал. - 2014 - № 4 (5) - С.89-99.
7. Бахарева Н.А. Пространственные отношения как фактор оценки земель // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении- 2018.- № 6. –С.61-69.

8. Кулагин В.П. Пространственные отношения в космических исследованиях // Славянский форум. -2019. – 3(25). - С.27-36.
9. Майоров А.А., Цветков В.Я. Геореференция как применение пространственных отношений в геоинформатике // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2012.- №3. - С.87 -89.
10. Кулагин В.П. Геореференция в пространственных отношениях // Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. - №5 (17). – С.80-86.
11. Зайцева О. В. Развитие цифрового моделирования // Славянский форум, 2015. - 3(9) - С.105-112.
12. Павлов А.И. Цифровое моделирование пространственных объектов // Славянский форум, 2015. - 4(10) – С.275-282.
13. Омельченко А. С. Информационные модели пространственных объектов в геоинформационных системах // Качество, инновации, образование. - 2006. - №3. - С.14- 17.
14. Wallgrün, J. O. Exploiting qualitative spatial reasoning for topological adjustment of spatial data. In Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems pp. 2012, November С.229-238.
15. Цветков В.Я. Пространственные знания // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2013. - №7. - С.43-47.
16. Кужелев П. Д. Пространственные знания для управления транспортом // Государственный советник. – 2016. - №2. – С.17-22.
17. Кулагин В. П., Цветков В. Я. Геознание: представление и лингвистические аспекты // Информационные технологии. - 2013. - №12. - С.2-9.
18. Савиных В.П. Геознание. - М.: МАКС Пресс, 2016. - 132с.
19. Розенберг И.Н., Вознесенская М.Е. Геознания и геореференция.// Вестник Московского государственного областного педагогического университета. -2010. - № 2. - С.116-118.
20. Ожерельева Т.А. Геознания. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №5. (часть 4) – С.669-669.
21. Цветков В.Я. Развитие технологий управления // Государственный советник. – 2015. - №4(12). – С.5-10.
22. Розенберг И.Н. Пространственное управление в сфере транспорта // Славянский форум, 2015. - 2(8) - С.268-274.
23. Цветков В. Я. Информатизация, инновационные процессы и геоинформационные технологии. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка - 2006.- №4 - С.112-118.
24. Цветков В.Я. Проектирование структур данных и базы данных - М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 1997 -90 с.
25. Bouziani M., Goïta K., He D. C. Automatic change detection of buildings in urban environment from very high spatial resolution images using existing geodatabase and prior knowledge //ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2010. – Т. 65. – №. 1. – С.143-153.
26. Майоров А.А. Пространственное когнитивное моделирование // Перспективы науки и образования- 2014. - №1. – С.33-37.
27. Цветков В.Я. Когнитивные аспекты построения виртуальных образовательных моделей// Перспективы науки и образования. - 2013. -№3. – С.38-46.
28. Булгаков С.В., Ковальчук А.В., Цветков В.Я., Шайтура С.В. Интегрированные

геоинформационные системы. - М.: МГТУ им. Баумана, 2007 - 113 с.

29. Ознамец В.В. Логика геодезического обеспечения // Славянский форум. -2018. – 3(21). - С.114-119

30. Tsvetkov V. Ya. Intelligent control technology. // Russian Journal of Sociology 2015. №2 (2). p97-104 DOI: 10.13187/rjs.2015.2.97 www.ejournal32.com.

31. Коваленков Н.И. Ситуационное управление в сфере железнодорожного транспорта // Государственный советник. – 2015. - №2. – С.42-46.

32. Лёвин Б. А., Цветков В.Я. Объектные и ситуационные модели при управлении транспортом // Наука и технологии железных дорог. - 2017. -2(2). – С.2-10.

33. Шайтура С.В. Информационная ситуация в геоинформатике// Образовательные ресурсы и технологии. – 2016. - №5 (17). – С.103-108.

34. Павлов А.И. Пространственная информационная ситуация // Славянский форум, 2016. - 4(14). – С.198-203.

35. Tsvetkov V. Ya. Logic units of information systems // European Journal of Natural History. – 2009. – № 2. – p.99-100.

36. Бородко А.В., Бугаевский Л.М., Верещака Т.В., Запрягаева Л.А., Иванова Л.Г., Книжников Ю.Ф., Савиных В.П., Спиридонов А.И., Филатов В.Н., Цветков В.Я. ГЕОДЕЗИЯ, КАРТОГРАФИЯ, ГЕОИНФОРМАТИКА, КАДАСТР. Энциклопедия. В 2 томах. / Под редакцией А.В. Бородко, В.П. Савиных. - Москва, 2008. Том I А-М.

37. Богоутдинов Б.Б., Цветков В.Я. Применение модели комплементарных ресурсов в инвестиционной деятельности // Вестник Мордовского университета. - 2014. - Т. 24. № 4. – С.103-116.

38. Щенников А.Н. Комплементарность при обработке информации // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. - 2019. - № 1(11). – С.24-30.

УДК: 528.9; 004.94

## ПРОСТРАНСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

- Андреева О.А.** Аспирант, МИИГАиК, E-mail: andreeva\_olga@inbox.ru, Москва, Россия
- Аннотация.** Объекты транспортной инфраструктуры в процессе эксплуатации требуют проведения пространственного мониторинга или геомониторинга. Вынос в натуру проектов новых объектов транспортной инфраструктуры также требует пространственного сопровождения или геодезического обеспечения. Перепроектировка объектов также требует измерения их габаритов методами геодезии, фотограмметрии или применения мобильного лазерного сканирования. Все перечисленные технологии требуют построения пространственных моделей и проведения пространственного моделирования. Сложные пространственные модели состоят из более простых, которые состоят из элементарных моделей. Элементарные модели и есть информационные единицы. Статья исследует информационные единицы как основу моделирования объектов транспортной инфраструктуры.
- Ключевые слова:** транспорт, транспортная инфраструктура, пространственная инфраструктура, объекты транспортной инфраструктуры, пространственное и геоинформационное моделирование.

## SPATIAL MODELING OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

- Andreeva O.A.** Graduate student, MIIGAiK, E-mail: andreeva\_olga@inbox.ru, Moscow, Russia
- Annotation.** Spatial modeling is a developed technology and is applied where there is a need for processing spatial information. The purpose of this work is to show the use of spatial and geoinformation modeling for the construction and analysis of transport infrastructure. The article gives a systematics of the types of modeling of transport infrastructure, describes the features of technology for collecting information in geo-information modeling, reveals the contents of the features of geo-information modeling of transport infrastructure. The concept of mass modeling of transport infrastructure objects is introduced. The difference between the geoinformation model of the transport corridor and the geoinformation model of the infrastructure corridor is shown. The article describes auxiliary geographic information models that are used before the start of practical work on collecting information and subsequent modeling of transport infrastructure objects.
- Keywords:** transport, transport infrastructure, spatial infrastructure, objects of transport infrastructure, spatial and geoinformation modeling.

### **Введение.**

Цель статьи состоит в анализе технологий сбора геоинформации и методов геоинформационного моделирования, применяемых для моделирования объектов транспортной инфраструктуры.

Моделирование объектов транспортной инфраструктуры в процессе эволюции выполнялось

разными методами и технологиями. Первоначально оно было направлено на моделирование транспортных сетей. В настоящее время оно опирается на методы транспортной геоинформатики [1, 2] и методы общей геоинформатики. В силу этого основой такого моделирования является геоинформационное моделирование. С развитием геоинформационного моделирования возникли методы моделирования пространственных объектов и местности. В настоящее время в моделировании объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) условно можно разделить на следующие направления:

- Аналитическое, которое включает системный анализ и использование математических методов для анализа и построения объектов и рельефа местности;
- Прикладное, которое решает практические задачи в сфере транспорта;
- Пространственное, которое включает моделирование пространственных объектов;
- Методическое, которое включает разработку и обоснование методов выноса в натуру, контроль эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры;
- Инструментальное, которое включает разработку методов сбора и обработки первичной информации, а также обоснование технологий проведения измерительных работ.

Эти пять видов включают четыре направления геоинформационного моделирования объектов транспортной инфраструктуры (ГМОТИ). Базовыми понятиями, определяющими методологию моделирования ОТИ, являются: система, пространственные отношения, организация данных, геоинформационное и информационное моделирование, цифровая модель. Особенностью методологии инструментального направления является использование двух типов систем: систем данных и систем обработки информации. Одной из главных задач ГМОТИ является нахождение и применение пространственных отношений [3] между процессами, явлениями и объектами в сфере транспорта. Эта задача решается двумя методами: методом координатных систем [4] и методом классификаций [5]. Моделирование ОТИ использует междисциплинарный перенос знаний. Междисциплинарный перенос знаний создает эффект интеграции и получение синергетического эффекта от интеграции [6, 7].

Моделирование ОТИ кроме прикладных задач решает научные задачи, в частности – задачи получения пространственных знаний и геознаний. Поэтому, моделирование ОТИ включает информационное моделирование, как фундаментальный метод познания [8]. Это дает возможность сопоставления явлений на основе использования геоинформационных и информационных моделей. Визуальное моделирование [9] ОТИ включает в обработку и анализ графическое представление пространственно-распределенной информации. Моделирование ОТИ, в частности дорог и железнодорожных путей, делает необходимым использование топологии при изучении транспортных систем методами геоинформатики.

#### **Технологии сбора информации при геоинформационном моделировании.**

Геоинформационное моделирование объектов транспортной инфраструктуры предъявляет особые требования к сбору информации. К технологиям сбора информации в геоинформатике относят: геодезические технологии, фотограмметрические технологии, технологии ГНСС, картографические технологии и технологии дистанционного зондирования Земли, цифровые технологии (рис.1). Сбор информации завершается хранением информации в разных системах: в геоинформационной системе (ГИС), в хранилище данных, в базе пространственных данных (БПД), базе геоданных (БГД), в инфраструктуре пространственных данных (ИПД) [10].

Источниками информации могут быть и архивные картографические данные. Для их ввода применяют цифровые методы: дигитализация, сканирование, векторизация, распознавание

изображений и прочие. Автоматизированный сбор выполняется без участия человека и предполагает прямое подключение информационно-измерительной системы [11] к измерениям. Первичные данные формируют фактофиксирующие модели. Для обеспечения сопоставимости данных, полученных в разное время и разными приборами, используют принцип единства измерений.



Рисунок 1. Основные технологии сбора данных в геоинформатике

В результате сбора информации с помощью разных технологий в геоинформатике формируют единую структуру данных, которую называют геоданными [12-14]. **Геоданные** — тематические, пространственные и временные данные, описывающие свойства объектов, процессов и явлений на земной поверхности, в околоземном пространстве, под земной поверхностью. В геоинформатике геоданные (GD) обязательно структурированы. Они содержат три группы данных: «место», «время», «тема» и имеют вид:

$$GD = \Phi \{ (C_1, C_2, \dots, C_n), (Pt_1, Pt_2, \dots, Pt_m), (A_1, A_2, \dots, A_k) \}, \quad (1)$$

В выражении (1)  $C_i$  – группа «место», совокупность координатных (пространственных) параметров ( $i=1\dots n$ );  $Pt_i$  – группа «время», совокупность временных параметров ( $i=1\dots m$ );  $A_i$  – группа «тема», совокупность тематических характеристик ( $i=1\dots k$ ). Структура геоданных делает их удобными для моделирования ОТИ. Геоданные служат основой геоинформационного моделирования и с их помощью создают геоинформационные модели ОТИ.

Для моделирования ОТИ формируют специализированные комплексные наборы [15] данных как описание объектов транспортной инфраструктуры. Спецификой геоданных является их деление на три качественных группы: «место» (*place*), «время» (*time*), «тема» (*topic*). Для анализа содержания геоданных рассмотрим их структуру, которая показана на рис. 2.

На рис.2 столбцами обозначены основные группы: «место», «время», «тема» в виде пространственных геоданных (ГД), временных геоданных, тематических геоданных. Между столбцами существуют разные виды связей, которые обозначены стрелками. Пространство и время — разные понятия, поэтому пространственные данные не включают временные данные, а временные данные не зависят от пространственных данных. Совокупность всех групп данных образует класс пространственно-временных данных. Эти данные связаны между собой с помощью связей «пространство-время» (СПВ). Существуют связи «тема-время» (СТВ) и связи «пространство-время-тема» (СПВТ).

Геоданные (рис.2) включают связи «пространство-время-тема» (СПВТ). В геоданные не

входят данные математических абстрактных пространств (МАП), таких как Гильбертово пространство. В состав геоданных земной геоинформатики не входят данные внеземных пространств.

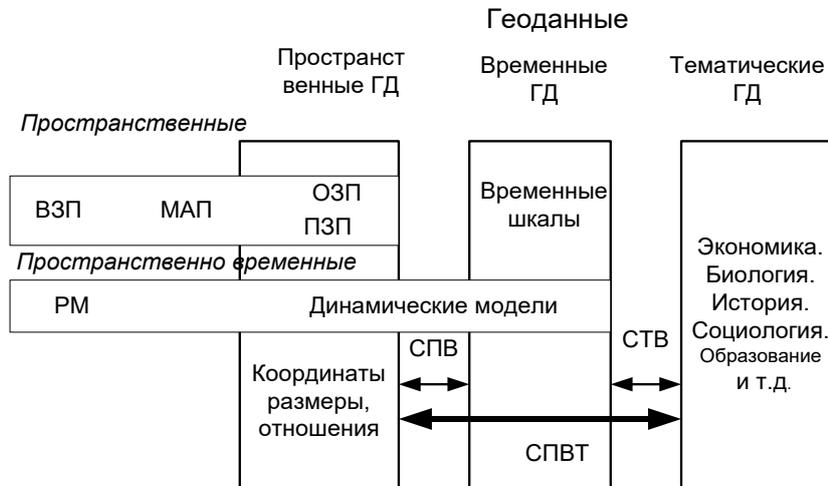


Рисунок 2. Структура геоданных

В пространственную группу входят данные об околоземном пространстве, данные об объектах на земной поверхности, данные об объектах под земной поверхностью. Геопространственные данные (ГПД) – это группа пространственных данных, связанных только с Землей. Геопространственные данные не могут быть на Луне или на Марсе. В отличие от этого, пространственные данные могут быть получены на Луне, на любой планете Солнечной системы. Пространственно-временная группа данных также частично входит в геоданные. Данные релятивистской механики (РМ) не входят в состав геоданных. Формально совокупность геоданных (ГД) может быть описана как:

$$ГД = F(ГПД, ВРД, ТД, ConСвязи), \quad (2)$$

где ВРД - временные данные, ТД - тематические данные, Con обозначает связи. В том случае, когда геоданные служат инструментом управления, в их состав включается еще один параметр - время применения (Тпр). Геоданные позволяют связывать объекты друг с другом. При обработке геоданные делят на следующие семь категорий:

- экономические характеристики объектов или явлений на земной поверхности;
- геометрические характеристики (положение и форма объектов - иногда эти данные упрощенно называют пространственными);
- топологические характеристики;
- визуальные характеристики, такие как: сигнатура, цвет, отображение;
- топографические характеристики;
- метаданные;
- темпоральные характеристики.

Такое многообразие обеспечивает применение геоданных в различных областях: транспорт, строительство, кадастр, сельское хозяйство, вооруженные силы и другие [26].

### **Анализ методов геоинформационного моделирования.**

Геоинформационное моделирование [17, 18] относится к классу пространственного моделирования. Пространственное моделирование, как технология, представляет собой построение пространственной модели и действия с моделью. Пространственное моделирование, как метод научного познания, представляет собой получение геознания [19] и построение картины мира [20]. Моделирование в когнитивном аспекте может быть рассмотрено как форма отражения действительности. Пространственное моделирование в геоинформатике создает возможность переноса результатов, полученных в ходе построения и исследования моделей, на оригинал и, тем самым, решает задачу переноса знаний. Основным видом пространственного моделирования в геоинформатике является геоинформационное моделирование. Главными направлениями геоинформационного моделирования являются визуальное моделирование [21], цифровое моделирование [22, 23], когнитивное моделирование и картографическое моделирование. Геоинформатика строится на интеграции разных наук, а обработка информации в геоинформатике строится на основе интеграции моделей [24]. Основой геоинформационного моделирования являются геоданные. Геоинформационное моделирование может быть реализовано с использованием ГИС, с использованием ИС, с использованием САПР, с использованием вычислительных средств. Общим для этих видов является использование трех интегрированных групп данных: «место», «время», «тема».

Геоинформационное моделирование является частным видом пространственного моделирования. Они имеют сходство и различие. Пространственное и геоинформационное моделирование - объективный практический критерий проверки истинности знаний. Геоинформационное моделирование направлено на получение, в первую очередь, пространственных знаний и геознаний. Оно создает в итоге новые информационные и геоинформационные модели и информационные ресурсы.

При геоинформационном моделировании исходный пространственный объект заменяется пространственной моделью. В модели входят множество параметров, связанных между собой. При этом пространственная модель должна включать не только информацию об объекте моделирования, но и информацию о его семантическом окружении [25, 26].

В некоторых случаях пространственная модель обладает свойством системности и может быть рассмотрена как система. Для пространственной модели, как для системы, характерно наличие жизненного цикла. Жизненный цикл зависит от ресурсов моделирования. Часть параметров модели определяют на основе измерений исходного объекта. Их рассматривают как совокупность известных значений. Другая часть параметров определяется на основе расчетов с использованием известных параметров. Из этого следует, что информационно-измерительные технологии предшествуют процессу геоинформационного моделирования.

Целями геоинформационного моделирования являются: фиксация фактов и пространственных явлений, интерпретация фактов и пространственных явлений, прогнозирование пространственных явлений. Геоинформационное моделирование позволяет с меньшими затратами воссоздать процессы взаимодействия реального объекта и внешней среды. Оно позволяет выявить ключевые факторы и разработать критерии оптимизации этого взаимодействия. Особенностью геоинформационного моделирования является опора на пространственные отношения.

При визуальном моделировании ОТИ применяют знаковое геоинформационное моделирование. При знаковом геоинформационном моделировании используют знаковые

образы: карты, схемы, фотоснимки, радиолокационные снимки, тепловые снимки, чертежи, формулы, графы, условные знаки, тайлы и т.п.

При исследовании явлений или процессов, при выявлении латентных связей, предпочтительным является математическое моделирование. Математическая модель представляет собой совокупность формальных описаний (формул, уравнений, неравенств, логических условий), отражающих реальный процесс изменения состояния объекта в зависимости от различных внешних и внутренних факторов. Особенностью геоинформационного математического моделирования является использование топологии и геоданных.

При исследовании пространственных объектов широко применяют пространственное цифровое моделирование. В информатике и геоинформатике цифровое моделирование заключается в реализации возможностей математических методов и программных средств для моделирования объектов.

В широком смысле цифровая модель (ЦМ) есть информационная дискретная модель, сформированная для передачи цифровых сообщений, для хранения в базе геоданных и для обработки на компьютере. Цифровая модель ориентирована на компьютерную обработку.

В узком смысле слова цифровая модель - это модель пространственных объектов, в которой обязательным параметром являются метрические характеристики: координаты, размеры, габариты, точность координат, масштаб и т.д. Она предназначена для обработки в информационных или геоинформационных технологиях. Определяющим в названии цифровая модель является то, что она сформирована в цифровом виде, который воспринимают цифровые устройства связи и обработки. Наибольшее распространение цифровые модели нашли в инженерных изысканиях, геоинформатике, геодезии, строительстве, архитектуре, экологии и др.

Цифровые модели содержат качественно разные типы информации. По аспекту описания пространства выделяют метрический и атрибутивный типы информации. По аспекту содержательного анализа выделяют семантическую и синтаксическую составляющие. Метрическая информация определяет положение ОТИ на основе координат точек и размеров. Важным отличием метрической информации, полученной по реальным измерениям от метрической информации моделей, является погрешность. Она обусловлена ошибками измерений и последующими ошибками вычислений. Этот параметр определяет применимость цифровой модели при решении прикладных задач для разных масштабов. Она задает взаимосвязи и условия обработки, условия воспроизведения. Также она решает главную задачу нахождения пространственных отношений.

Атрибутивная информация определяет свойства и принадлежность модели к определенному классу или подклассу. Она описывает свойства объектов и их частей. Семиотический аспект рассмотрения ЦЦМ вводит известные в информатике оценки коэффициент информативности и коэффициент содержательности цифровой модели. Семантическая часть информации определяет ее содержательную сторону, она связана с описанием пространственного объекта и его окружения. Синтаксическая информация определяет набор правил и отношений работы с цифровой моделью как с обычной информационной моделью. Она связана с классификацией и правилами построения моделей. Аспект рассмотрения структуры цифровой модели позволяет выделить в ней логическую и физическую структуры.

Логическая структура ЦМ определяется как совокупность логических схем ее частей. Она

может включать схемы взаимосвязи частей ЦММ в натуре, в базе данных, схемы взаимосвязи свойств ЦММ и схемы построения ЦММ. Логическая структура содержит логические записи, составляющие информационную основу хранения ЦММ в БД. Элементом логической структуры базы данных является логическая запись.

Физическая структура ЦММ определяется способом реализации логической ЦММ на конкретной технической основе. Она задает формат записи данных, размеры кластеров, слов и т.д. Элементом физической структуры ЦММ является физическая запись.

Эти две части являются реализацией даталогической и физической моделей. Таким образом, цифровая модель - это компьютерная модель, объединяющая даталогическую и физическую модели. Среди пространственных цифровых моделей выделяют несколько: цифровая модель местности, цифровая модель объекта, цифровая модель явления (процесса). Рассмотрим их в качестве примера. Наибольшее применение в САПР и геоинформатике находит цифровая модель местности. Одним из результатов геоинформационного моделирования является цифровая модель местности. *Цифровая модель местности (ЦММ)* - информационная дискретная модель местности, предназначенная для хранения и обработки в компьютерных технологиях, которая должна содержать несколько основных свойств, вытекающих из ее определения.

**Взаимосвязь геоинформационного моделирования с другими видами моделирования.** Геоинформационное моделирование тесно связано с другими видами моделирования. Геоинформационное моделирование требует предобработки собранной пространственной информации, поэтому оно связано с информационно измерительными системами и другими технологиями сбора информации. Геоинформационное моделирование использует геоданные и цифровые модели, поэтому оно связано с цифровыми технологиями и устройствами. Геоинформационное моделирование часто является эвристическим и когнитивным в силу активного участия человека в обработке пространственной информации поэтому оно связано с когнитивными технологиями и эвристическим моделированием.

Геоинформационное моделирование может включать целостную совокупность разных технологий, поэтому оно может быть рассмотрено как технологическая система, которая может быть сложной или простой в зависимости от комплекса задач и условий. Геоинформационное моделирование в широком смысле - это технологическая система обработки пространственной информации, которая использует любые информационные системы, например: Автокад или системы лазерного сканирования. Технологии сбора пространственной информации, например, ГНСС, также являются геоинформационными технологиями. Можно выделить новую технологию геоинформационного моделирования - геоинформационное проектирование [27]. Оно основано на синтезе геоинформационных технологий и технологий автоматизированного проектирования. Геоинформационное моделирование применяют при геоинформационном мониторинге и геомониторинге. Геоинформационное моделирование применяют при пространственном анализе.

Следует отметить, что многообразие связей геоинформационного моделирования и разнообразие видов информации, которую применяют при моделировании ставят задачу обеспечения комплементарности [28, 29] технологий и данных. Именно комплементарность дает основание интеграции данных и технологий в единую систему.

**Технологические особенности геоинформационного моделирования объектов транспортной инфраструктуры.**

Целью геоинформационного моделирования в любой предметной области является построение моделей, характерных для этой области. Объекты транспортной инфраструктуры имеют свои особенности, которые создают специфические пространственные и геоинформационные модели.

В современных технологиях геоинформационного моделирования большое значение приобретает трехмерное моделирование. При этом различают три подхода трехмерного моделирования: поточечный, групповой и массовый. Первый подход включает последовательный поточечный сбор информации, ввод семантики на объект и построение трехмерной модели из отдельно измеренных точек. После построения модели она подвергается атрибутированию, то есть вводятся необходимые атрибуты, и визуально модель становится аналогом исследуемого пространственного объекта. Второй подход включает групповой сбор информации по паре снимков стереопары. На снимках находится группа точек, описывающих пространственный объект, и в процессе обработки такой группы точек строится пространственная модель. Недостатком подхода является наличие мертвых зон. Как правило, одной стереопары не хватает для съемки объектов транспортной инфраструктуры.

Если объект протяженный (километры и десятки километров), то возникают технологические и временные трудности получения информации фотограмметрическим и геодезическим методами и последующей ее стыковки. Третий подход приспособлен для исследования и моделирования больших протяженных объектов. Он разделяется на стационарное и мобильное лазерное сканирование. Стационарное лазерное сканирование проводят с одной точки. Мобильное лазерное сканирование осуществляют с подвижного (мобильного) объекта, в силу чего оно имеет такое название.

Важная особенность геоинформационного моделирования объектов транспортной инфраструктуры – необходимость массового моделирования, а не моделирования отдельно взятых объектов. Модель должна включать связанные относительно друг друга пространственные объекты. В геоинформатике и в ГИС существует понятие буферная зона, которую строят только на основе имеющейся пространственной модели. В ГИС буферная зона строится на основе пространственной модели, которая создана после сбора информации и обработки информации. Железнодорожный путь – важнейший объект инфраструктуры, информацию собирают вдоль железнодорожного пути. Фактически, информацию собирают вдоль буферной зоны (рис.3).

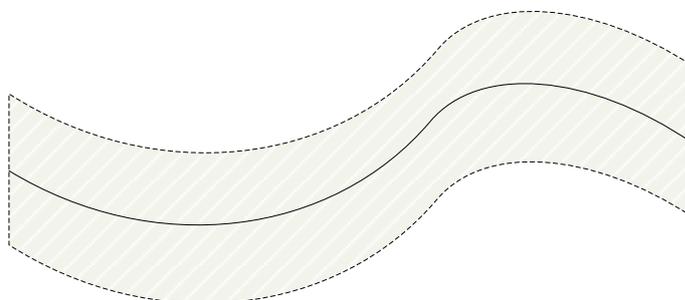


Рисунок 3. Буферная зона при проектировании железных дорог

На рис.3 показана буферная зона, которая может служить основой для полосы отвода при проектировании железных дорог. Однако, следует отметить, что полоса отвода чаще всего не

параллельна трассе, поскольку ее ширина зависит от условий рельефа, типа почвы, условий снеготранспорта и других причин. Поэтому буферная зона служит основой построения полосы отвода, но не является ее эквивалентом.

Поэтому особенность геоинформационного моделирования объектов транспортной инфраструктуры – сбор целевой информации вдоль буферной зоны, которая сама по себе представляет важный объект исследования при организации движения. Значение буферной зоны, как самостоятельного объекта, в моделировании ОТИ привело к понятию новой пространственной модели - инфраструктурный коридор.

Инфраструктурный коридор - это специализированная геоинформационная модель, включающая окружение трассы движения объекта, которая не включает модель самой трассы, а включает близко и далеко расположенные объекты инфраструктуры. Основное назначение этой модели - анализ окружения трассы и влияние объектов на движение и логистику (рис.4).

Таким образом, в области моделирования ОТИ существует специализированная задача и геоинформационная технология ее решения: съемка инфраструктурных коридоров [30, 31], включая автомобильные, железнодорожные, трубопроводные и силовые линии.

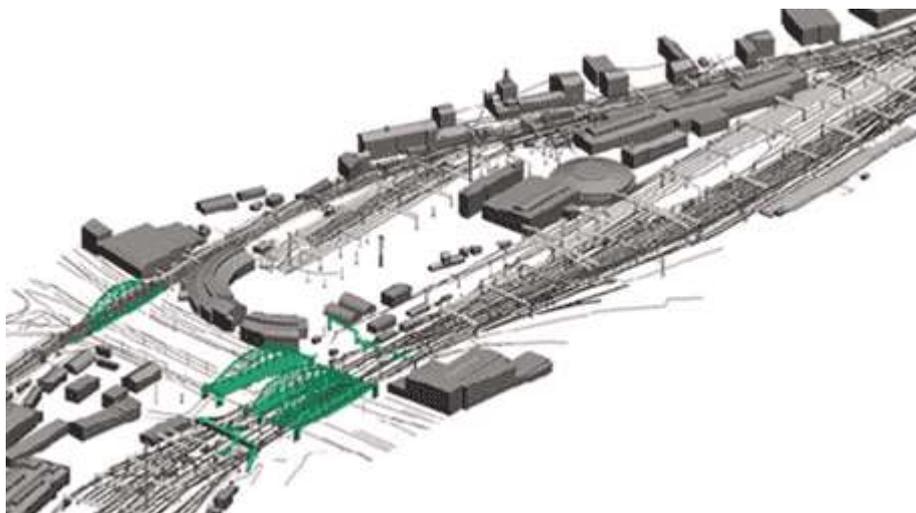


Рисунок 4. Пример геоинформационной модели инфраструктурного коридора в районе станции Санкт-Петербург-Товарный-Московский.

Третья особенность геоинформационного моделирования объектов транспортной инфраструктуры – построение ареальной пространственной модели ОТМ, то есть только тех объектов, которые влияют на движение транспорта. Транспортный коридор – это специализированная геоинформационная модель, включающая окружение трассы движения объекта, которая не включает модель самой трассы, а включает близко расположенные объекты инфраструктуры. Основное назначение этой модели - анализ движения по трассе с целью обеспечения безопасности и пропускной способности. В транспортный коридор входят переезды и тоннели, которые также требуют измерения и построения в виде моделей. В транспортный коридор входит полоса отвода, которая имеет переменную ширину в зависимости от типа рельефа, снеготранспорта, залесенности и типа грунтов (болота, степи). Полоса отвода также требует измерения и построения в виде моделей.

Четвертая особенность геоинформационного моделирования объектов транспортной

инфраструктуры – построение протяженной (десятки и сотни километров) линейной пространственной модели трассы. Пространственная модель трассы – это специализированная геоинформационная модель, включающая: верхнее строение пути, нижнее строение пути, геометрию рельсовых нитей, геометрию уклонов и другие параметры, влияющие на движение транспорта. Основное назначение этой модели – контроль состояния пути, прогнозирование состояния пути и принятие решений о его эксплуатации или корректировки. Все четыре особенности учитываются при использовании геоинформационного моделирования ОТИ.

Еще одна особенность геоинформационного моделирования ОТИ состоит в необходимости создания дополнительной априорной геоинформационной модели, которая предшествует практическим работам по сбору информации и пространственному моделированию. Поскольку процесс сбора осуществляется в пространстве и времени, то возникает проблема обеспечения единой координатной среды и единства времени при сборе пространственной информации. В частности, сбор информации с использованием мобильного лазерного сканирования качественно отличается от фотограмметрического, геодезического методов измерений и стационарного мобильного лазерного сканирования. В этих случаях, точки съемки измеряют непосредственно прямыми измерениями, что обеспечивает необходимую точность.

При массовом методе сбора пространственной информации измерение осуществляют непрерывно, по мере перемещения объекта – носителя аппаратуры. В силу этого, понятие точки съемки заменяется понятием траектории измерений, то есть траектории, по которой перемещается съемочная аппаратура для получения массовой информации.

Как дополнительный этап геоинформационного моделирования, при массовом способе, возникает технологический этап предварительного измерения траектории измерений. Для решения этой задачи перед непосредственно съемкой подвижный объект с аппаратурой прогоняют в холостом режиме (без проведения съемки) в прямом и обратном направлениях по участку съемки. Положение съемочной аппаратуры фиксируют с помощью инерциальных и спутниковых устройств. Данные измерений обрабатывают и создают дополнительную геоинформационную модель – трехмерную модель траектории измерений. В процессе съемки она используется, измеряется и корректируется. Эту особенность можно сформулировать как создание дополнительной геоинформационной модели траектории измерений ОТИ.

Модель траектории измерений с использованием лазерного сканирования – это специализированная геоинформационная модель, включающая пространственные координаты перемещения сканера. Основное назначение этой модели – определение точек координат возможной съемки и привязка координат измеряемых точек, полученных с разных точек измерений. Аналогом этой модели может служить маршрут аэрофотосъемки или маршрут БПЛА.

Шестая особенность при моделировании ОТИ связана с проблемой «больших данных», которая возникает при использовании мобильного лазерного сканирования. Эта особенность обусловлена большим количеством информации при массовом сборе и ограниченностью вычислительных средств обработки этой информации. Приведем данные. При скорости съемки 60 км/ч достигается точность на уровне нескольких сантиметров и плотности около 3000 точек на квадратный метр. Это означает, что на километр пути получают не менее 9 млн. точек, что соответствует проблеме «больших данных». В силу этого, участок сканирования требуется разбивать на блоки для уменьшения объема обрабатываемых данных. Для повышения точности и полноты данных съемка производится в прямом и обратном направлениях. Совместно со

сканированием производилась фотосъемка сканируемой территории четырьмя широкоугольными камерами с частотой съемки до 20 кадров в секунду. Данные с фотокамер позволяют улучшить визуальное восприятие объектов и присваивать истинные цвета точкам и атрибутику объектам. Такое обстоятельство приводит к необходимости создания вспомогательной априорной геоинформационной модели. Эта модель - есть проект измеряемой трассы, который создают на основе предварительного изучения материалов о трассе, его необходимо разбить на участки или блоки.

Проект измеряемой трассы - это специализированная пространственная модель, включающая маршрут трассы в плановых координатах. Основное назначение этой модели – разбиение предполагаемой трассы на блоки, позволяющие проводить обработку с такими объемами данных, которые может обработать применяемое программное обеспечение.

Еще одна особенность геоинформационного моделирования ОТИ - это использование специальных сетей при организации сбора информации об объектах транспортной инфраструктуры типа железнодорожного коридора [32, 33]. Для исследования и работ в области железнодорожного коридора применяю специальные сети. Это реперные сети и сети электронных меток. Реперные сети известны достаточно давно, а сети электронных меток [34] являются инновационной разработкой, координирующей подвижные объекты в стационарном окружении.

### **Заключение**

На основе анализа выявлена взаимосвязь геоинформационного моделирования с другими видами моделирования, а также технологические особенности геоинформационного моделирования объектов транспортной инфраструктуры. На основе анализа предложены рекомендации по моделированию объектов транспортной инфраструктуры, в частности, по преодолению проблемы больших данных. На основе анализа предложены рекомендации по моделированию объектов транспортной инфраструктуры, в частности по применению сетей нового типа – сетей электронных меток. На основе анализа предложено новое понятие «массовый метод сбора пространственной информации» и раскрыто его содержание. На основе анализа предложено новое понятие «Проект измеряемой трассы».

Геоинформационное моделирование объектов транспортной инфраструктуры отличается от других видов моделирования ОТИ. Оно требует создания специальных геоинформационных и пространственных моделей. Особенностью геоинформационного моделирования ОТИ является то, что для формирования основных моделей пространственной инфраструктуры необходимо использовать разные виды технологий сбора и, в частности, разные виды лазерного сканирования местности: наземное стационарное, наземное мобильное [35] или воздушное. Геоинформационное моделирование как технологическая система позволяет решать задачи, которые не решаются существующими технологиями в геодезии и фотограмметрии, а также при использовании спутниковых измерений.

Технология геоинформационного моделирования ОТИ позволяет исследовать большинство пространственных инфраструктур: городской, сельской, водной, транспортной. Данная технология позволяет не только решать задачи построения пространственных моделей неподвижной инфраструктуры, но и решать задачи управления подвижными объектами, например, управление цифровой железной дорогой [36]. Геоинформационная технология создает возможности обработки информации содержащей десятки и сотни миллионов пространственных точек. Уникальность технологии состоит в возможности обработки массивов

«больших данных», не прибегая к специализированному программному обеспечению для таких данных. Данное решение стало возможным за счет особой организации моделирования, в частности за счет введения двух априорных моделей трассы и блока.

### Список литературы

1. Лёвин Б.А., Круглов В.М., Матвеев С.И., Цветков В.Я., Коугия В.А. Геоинформатика транспорта. - М.: ВИНТИ РАН, 2006. - 336 с.
2. Андреева О.А. Геоинформатика транспорта. - Saarbrücken.: Palmarium Academic Publishing, 2020. –180с. ISBN 978-620-0-50592-7.
3. Цветков В.Я. Виды пространственных отношений // Успехи современного естествознания. - 2013. - № 5 - С.138-140.
4. Розенберг И.Н. Цветков В.Я. Координатные системы в геоинформатике – МГУПС, 2009 - 67с.
5. Елсуков П.Ю. Классификация и типизация в информатике // Перспективы науки и образования. - 2016. - №2. - С.7-11.
6. Савиных В.П., Цветков В.Я. Синергетический аспект геоинформатики и технологий дистанционного зондирования// Исследование Земли из космоса. - 2002.- № 5.- С.71-78.
7. Кудж С.А. Синергетика пространственной информации // Перспективы науки и образования- 2014. - №5. – С.14-20.
8. Лёвин Б.А. Информационное моделирование при управлении транспортом // Перспективы науки и образования. - 2017. - №3(27). - С.50-54.
9. Цветков В.Я. Визуальное моделирование в системах поддержки принятия решений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №10-1. – С.13-17.
10. Матчин В.Т. Состояние и развитие инфраструктуры пространственных данных // Образовательные ресурсы и технологии. – 2015. - №1(9). – С.137-144.
11. Цветков В.Я. Информационно измерительные системы и технологии в геоинформатике. - М.: МАКС Пресс, 2016. - 94с.
12. Матчин В.Т. Формирование геоданных// Славянский форум, 2015. - 2(8) - С.185-193.
13. Кудж С. А. Организация геоданных // Российский технологический журнал. - 2014 - № 1 (2) - С.106-112.
14. Цветков В.Я. Модель геоданных для управления транспортом // Успехи современного естествознания. -2009. - №4. - С.50-51.
15. Лёвин Б.А. Комплексный мониторинг транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 1(1). – С.14-21.
16. Омельченко А. С. Геоданные как инновационный ресурс // Качество, инновации, образование. - 2006. - №1. - С.12- 14.
17. Андреева О.А. Геоинформационное моделирование // Славянский форум. -2019. – 2(24). - С.7-12.
18. Цветков В.Я. Геоинформационное моделирование // Информационные технологии. - 1999. - №3. - С.23- 27.
19. Ожерельева Т.А. Геознания. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №5. (часть 4) – С.669-669.

20. Бутко Е. Я. Геоинформатика как метод построения картины мира // Славянский форум. - 2017. -1(15). – С.34-41.
21. Булгаков С.В. Информационное визуальное моделирование // Российский технологический журнал. -2014 - № 1 (2) - С.58-73.
22. Цветков В.Я. Цифровые карты и цифровые модели // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2000. - №2. - С.147-155.
23. Андреева О.А. Цифровое моделирование при проектировании железных дорог // Славянский форум. -2019. – 1(23). - С.7-13.
24. Коваленко А.Н. Системный подход создания интегрированной информационной модели // Славянский форум. - 2014. – 2 (6). - С.51 -55.
25. V. Ya. Tsvetkov. Semantic environment of information units // European researcher. 2014, № 6-1 (76), p. 1059-1065.
26. Ожерельева Т.А. Об отношении понятий информационное пространство, информационное поле, информационная среда и семантическое окружение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 10 – С. 21-24.
27. Андреева О. А., Дышленко С. Г. Геоинформационное проектирование трехмерных объектов // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. - 2019. - № 1(11). – С. 39-46.
28. Цветков В.Я. Комплементарность информационных ресурсов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. - 2016. - №2. – С.182-185.
29. Щенников А.Н. Комплементарность при обработке информации // ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении. - 2019. - № 1(11).–С. 24-30.
30. Priemus H., Zonneveld W. What are corridors and what are the issues? Introduction to special issue: the governance of corridors //Journal of Transport Geography. – 2003. – V. 11. – №. 3. – С. 167-177.
31. Szimba E. et al. Evaluation of transport infrastructure projects on corridors by a Strategic Assessment Framework //10th World Conference on Transport ResearchWorld Conference on Transport Research SocietyIstanbul Technical University. – 2004.
32. Witte P. et al. Capitalising on Spatiality in European Transport Corridors //Tijdschrift voor economische en sociale geografie. – 2013. – V. 104. – №. 4. – С. 510-517.
33. Nechaev G., Slobodyanyuk M. Development of transport infrastructure in Eastern Ukraine and its interaction with the international transport corridors //TeKa Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa. – 2011.
34. Цветков В.Я., Ознамец В.В. Применение радиометок при мониторинге железнодорожных дорог // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 3. С. 14-15.
35. Андреева О. А. Применение мобильного лазерного сканирования для мониторинга объектов транспортной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 3(11). – С.61-74.
36. Буравцев А. В. Цифровая железная дорога как сложная организационно-техническая система // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.69-79.

УДК: 332.1

## ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ ПРОСТРАНСТВО В ТРАНСПОРТНОЙ СФЕРЕ

**Бучкин В.А.** д.т.н., профессор, Российский университет транспорта (МИИТ),  
E-mail: buchkin@mail.ru, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье исследуется геоинформационное пространство как инструмент управления в транспортной сфере. Описаны принципы построения геоинформационного пространства. Геоинформационное пространство, в отличие от информационного пространства, включает сетевую организацию и механизмы управления объектами транспорта и транспортными потоками. Геоинформационное пространство имеет большое значение в сфере транспорта, где информационное пространство простирается на большие территории и требует согласования множества параметров управления. Статья показывает, что в сфере транспорта геоинформационное пространство является разномасштабным. Рассмотрена интеграция компонент пространства, которая является обязательной при организации геоинформационного пространства.

**Ключевые слова:** транспорт; геоинформационное пространство, интеграция, управление, сетевая структура, геоданные

## GEOINFORMATION SPACE IN THE TRANSPORT SPHERE

**Buchkin V.A.** DofSci.(Tech.), Professor, Russian University of Transport (MIIT),  
E-mail: buchkin@mail.ru, Moscow, Russia

**Annotation.** The article explores the geographic information space as a management tool in the transport sector. The principles of building a geographic information space are described. Geoinformation space, in contrast to the information space, includes network organization and mechanisms for managing transport objects and traffic flows. The geographic information space is of great importance in the field of transport, where the information space extends over large areas and requires the coordination of many control parameters. The article shows that in the field of transport, the geographic information space is diverse in scale. The integration of space components, which is mandatory in the organization of geographic information space, is considered.

**Keywords:** transport; geoinformation space, integration, management, network structure, geodata.

**Введение.** Современная глобализация общества способствует интеграции технологий и систем. Глобализация в международном масштабе приводит к созданию различных транснациональных пространств. Глобализация в отраслевом масштабе приводит к созданию различных информационных пространств. Сфера транспорта характеризуется большими объемами информации и базовым использованием пространственной информации и геоданных [1]. Геоданные в сфере транспорта являются инструментом управления [2]. Основой интеграции пространственных технологий и данных в настоящее время служит

геоинформатика. Поэтому сочетание информационного пространства и геоинформатики вполне логично приводит к созданию геоинформационного пространства (ГИП) [3].

Следует отметить, что ГИП имеет множество разновидностей в соответствии с масштабом управления на транспорте. Общее или отраслевое ГИП включает в себя более мелкие по масштабу геоинформационные и информационные пространства. Создание ГИП предшествует созданию экономического пространства. Создание ГИП и геоинформационного обеспечения является обязательным компонентом в сфере транспорта, включая и его управление.

#### **Построение геоинформационного пространства.**

ГИП является синтезом информационного поля [4, 5] и информационного пространства [6]. Информационное пространство в реальном пространстве является координатным и выполняет роль оболочки. ГИП в реальном пространстве является системным и включает координатное пространство и сетевые системы.

ГИП рассматривается как сложная система [7, 8], содержащая связанные информационной сетью элементы транспортной инфраструктуры, управленческие и информационные ресурсы. В тоже время ГИП является сетевой системой, поскольку его базисом является транспортная сеть. Как сетевая система ГИП может быть локальным, если оно реализуется на базе локальной информационной сети. Оно может быть корпоративным, когда выполняется в масштабе корпоративной сети. Оно может быть региональным или отраслевым. Масштаб используемого ГИП определяет масштаб эффективного использования информационного менеджмента.

Качественным отличием геоинформационного пространства от автоматизированных систем управления транспортом (АСУТ) является дополнение технологий организационного управления и технологиями пространственного анализа, визуального анализа и ситуационными центрами управления. Вторым отличием ГИП от АСУТ является открытость. По существу, любые АСУТ являются закрытыми системами. В них вводится информация, которая обрабатывается с отсутствием связи с внешней средой. В работе АСУТ стохастические факторы рассматривают на уровне ошибок данных. Считают, что они незначительны по сравнению с полезной информацией, которая обрабатывается в этих системах. Однако, при распространении информации в инфосфере [9] действует объективная закономерность искажения информации и для управления стохастические факторы имеют большое значение по мере роста времени принятия управленческих решений. ГИП получает информацию в реальном времени и обрабатывает ее в реальном времени. Как инструмент управления ГИП есть система управления реального времени.

Формирование ГИП как сетевой системы невозможно выполнить на множестве отдельных элементов с простым последующим их объединением. Необходима общая концептуальная архитектура ГИП, реализующая идею функционирования ГИП с задачами управления транспортом.

Как сложная организационно-техническая система ГИП основана на компонентах, включающих информационно-ресурсную, организационную и технологическую составляющие, которые могут быть представлены дескриптивными моделями соответствующих типов: логическими, технологическими, организационными, программными и техническими.

Логической структурой ГИП называют ее представление в виде связанных логических модулей [10], реализующих основные компоненты логики управления.

Технологической структурой ГИП называют ее схему в виде взаимосвязанных уровней технологий, взаимодействие которых обеспечивает решение технологических задач.

Техническая структура ГИП образуется совокупностью связанных аппаратных средств, предоставляющих возможность реализации технологий управления. Основываясь на рассмотренном подходе, можно говорить о трёх взаимосвязанных типах архитектур, а именно: технологической, логической, технической и об общей системной схеме ГИП.

Технологическая архитектура систематизирует процессы управления и оценивает информационные потребности для решения задач управления в сфере транспорта. Логическая архитектура создает обоснованность и комплементарность схем управления и исключает противоречивость. В рамках системной схемы анализируются элементы и подсистемы ГИП, а также регламентируются внутренние связи между ними [11].

### **Проблемы интеграции в ГИП.**

Многие интегрированные системы и пространства относятся к классу сложных организационно-технических систем [12, 13]. ГИП по своей природе является интегрированным комплексом и развивается как объективная потребность для решения практических задач.

В отличие от математических пространств ГИП замкнуто, поскольку связано с земной поверхностью. Локализация в геоинформационном пространстве задается геоцентрическими координатами. Координатное обеспечение геоинформационного пространства осуществляется методами геодезии [14].

ГИП в теоретическом и концептуальном плане может быть рассмотрено как информационная конструкция [15, 16]. Оно реализуется методами геоинформатики и методами прикладной геодезии. Работа с пространственными данными требует знания используемых систем координат и преобразований для связи между ними.

Связующим элементом отношений между объектами исследования в ГИП являются пространственные отношения [17, 18]. Для учёта взаимосвязи между различными объектами применяют координатные системы, которые выполняют координирующую функцию в ГИП.

Основой измерений в ГИП являются геодезические измерения. Информация, полученная с их помощью, называется исходной и требует первичной обработки и унификации. В процессе геодезических измерений определяются или измеряются геодезические величины, подлежащие как физическая величина измерению в процессе геодезических работ.

Помимо геодезических измерений в ГИП производят качественные измерения. Качественным измерением геоинформационного объекта называется его измерение в номинальной шкале в выбранных заранее информационных единицах, для выявления и идентификации его существенных качественных признаков, а также их составляющих, что позволяет выявить индивидуальные и общие с другими свойства данного информационного объекта. Качественные измерения позволяют оценить сходство и различие между объектами, определить его принадлежность к определённому типу или классу объектов, поэтому применяется при построении классификаций.

Количественным измерением геоинформационного объекта называется количественная оценка его качественных признаков, характеризующих его содержательность, объём и другие сопоставительные характеристики. Количественное измерение позволяет сопоставлять между собой одинаковые признаки или свойства информационных объектов.

Единство измерений является важным условием, которое обеспечивает единство ГИП и возможность использования измерений для анализа и решения практических задач [19]. Понятие «единство измерений» охватывает важнейшие задачи метрологии: унификацию единиц, разработку систем воспроизведения единиц и передачи их размеров рабочим средствам

измерений с установленной точностью, проведение измерений с погрешностью, не превышающей установленные пределы, и др. Единство ГИП обеспечивает возможность информационного и геоинформационного поиска.

Объемы коллекций в современном ГИП настолько велики, что человеку не по силам проанализировать их с использованием только своих интеллектуальных способностей. По существу геоинформационное пространство является пространством «больших данных». Это порождает проблему выделения полезной информации из всей, собранной в геоинформационном пространстве. Одним из подходов решения этой проблемы является технология добычи данных (Data Mining) [20, 21] — обнаружение в первичных данных скрытых и практически полезных знаний, необходимых для принятия решений в различных сферах человеческой деятельности

Навигационное обеспечение геоинформационного пространства осуществляется различными методами космической и спутниковой геодезии [22]. Наполнение содержания геоинформационного пространства осуществляется методами геодезии, фотограмметрии и методами дистанционного зондирования. Моделирование в ГИП осуществляется на базе ГИС [23] и геоинформационных технологий.

Для решения задач в области инженерных изысканий широко применяют методы цифрового и пространственного моделирования. Для решения задач в области транспорта применяют методы цифрового моделирования [24] и методы интеллектуального анализа.

Для решения задач в области дорожного строительства применяют методы GPS приемников и моделирования. Большое значение для контроля и обновления геоинформационного пространства имеет геоинформационный мониторинг [25] и геомониторинг.

Хранение информации о ГИП осуществляют в базах геоданных, пространственных базах данных или в инфраструктуре пространственных данных, которая является новым типом хранилища информации. Инфраструктура пространственных данных является информационным отражением ГИП.

### **Геоинформационное пространство сферы железнодорожного транспорта.**

Железные дороги являются геотехническими системами [26], имеющими внутреннюю структуру и инфраструктуру, активно взаимодействующую с внешней средой и решающую важные экономические и социальные задач. Их особенностью является протяженность и распределенность в пространстве.

Одним из эффективных способов получения оперативной информации о состоянии дороги, грузопотоков на ней и окружающей среды является космическое зондирование. Для управляющих органов необходим регулярный мониторинг геотехнических систем (ГТС), обеспечивающий оперативное получение и обобщение данных на разных уровнях.

Особенность управления транспортной сферой состоит в том, что объектом управления в ней являются грузо- и пассажироперевозки, для чего используются информационные потоки. Оперативное управление транспортной сферой в современных условиях возможно только на основе единого информационного пространства.

Для решения задач оперативного управления на больших территориях необходим глобальный мониторинг, который эффективен только за счет применения космических технологий и систем.

Примерами специализированных геоинформационных пространств могут служить радиорелейное информационное пространство [27] и информационное пространство

радиоэлектронных меток [28], которое строится на базе электронных и спутниковых сетей.

В ОАО РЖД используется комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта (КСПД ИЖТ) для создания единого координатного пространства на основе высокоточной координатной системы (ВКС) с применением глобальных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS. [29, 30]

**Заключение.** Вопросам ГИП в сфере транспорта уделяется внимание прежде всего в коммуникационном и информационном аспектах. Чаще его рассматривают лишь как инструмент поддержки принятия решений. Однако, для управления в транспортной сфере, где объектом управления являются не только предприятия, но и материальные потоки, ГИП является универсальным инструментом, который объединяет управление дискретными объектами – материальными и информационными потоками. Для этого необходимо создавать ГИП, которое включает не только координацию и коммуникацию, но и механизмы реального управления.

ГИП является важным информационным комплексом, включающим информационное поле и важнейшие пространственные связи и отношения объектов пространства.

### Список литературы

1. Омельченко А. С. Геоданные как инновационный ресурс // Качество, инновации, образование. - 2006. - №1. - С.12- 14.
2. Цветков В.Я. Модель геоданных для управления транспортом // Успехи современного естествознания. -2009. - №4. - С.50-51.
3. Матчин В.Т. Интегрированное геоинформационное пространство // Славянский форум. - 2018. – 3(21). - С.21-27.
4. Кудж С.А. Информационное поле: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2017. – 97 с.
5. Цветков В. Я. Естественное и искусственное информационное поле// Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. -2014. - №5-2. – С.178 -180.
6. Tsvetkov, V. Ya. Information Space, Information Field, Information Environment // European researcher. 2014. № 8-1(80). p.1416-1422.
7. Майоров А.А. Системный геоинформационный анализ // Перспективы науки и образования- 2014. - №4. – С.38-43.
8. Цветков В.Я. Решение проблем с использованием системного анализа // Перспективы науки и образования- 2015. - №1. – С.50-55.
9. Иванников А.Д., Тихонов А.Н., Соловьев И.В., Цветков В.Я. Инфосфера и инфология. - М: ТОРУС ПРЕСС, 2013. -176с.
10. Tsvetkov V. Ya. Logic units of information systems // European Journal of Natural History. – 2009. – № 2. – p.99-100.
11. Цветков В. Я. Информатизация, инновационные процессы и геоинформационные технологии. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка - 2006.- №4 - С.112-118.
12. Буравцев А.В. Функционирование сложной организационно-технической системы в транспортной сфере // Наука и технологии железных дорог. - 2017. -3(3). – С.48-58.
13. Корнаков А.Н. Модель сложной организационно-технической системы // Перспективы науки и образования. - 2015. - №2. – С.44-50.

14. Шайтура С. В. Проблемы координатного обеспечения цифровой железной дороги // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – 1(5). – С.62-68.
15. Tsvetkov V. Ya. Information Constructions // European Journal of Technology and Design. - 2014. № 3 (5). - p.147-152.
16. Дешко И.П. Информационное конструирование: Монография. – М.: МАКС Пресс, 2016. – 64с.
17. Цветков В.Я. О пространственных и экономических отношениях // Международный журнал экспериментального образования. - 2013. - №3. - С.115-117.
18. Кулагин В.П. Геореференция как описание пространственных отношений // Славянский форум, 2015. - 4(10) – С.175-183.
19. Новиков Е. А. Как обеспечить единство измерений? //Журнал аналитической химии. – 2012. – Т. 67. – №. 12. – С. 1091-1091.
20. Apté C., Weiss S. Data mining with decision trees and decision rules //Future generation computer systems. – 1997. – V. 13. – №. 2-3. – p. 197-210.
21. Koh H. C. et al. Data mining applications in healthcare //Journal of healthcare information management. – 2011. – V. 19. – №. 2. – p. 65.
22. V. V. Oznamets, V. Ya. Tsvetkov, Space Geodesy of Small Celestial Bodies // Russian Journal of Astrophysical Research. Series A. 2019, 5(1): 30-40.
23. Булгаков С.В., Ковальчук А.В., Цветков В.Я., Шайтура С.В. Интегрированные геоинформационные системы. - М.: МГТУ им. Баумана, 2007 - 113 с.
24. Куприянов А.О. Цифровое моделирование при проектировании и мониторинге трасс // Наука и технологии железных дорог. – 2017. – 1(1). – С.70-81.
25. Цветков В.Я. Геоинформационный мониторинг //Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. - 2005.- №5. - С.151 -155.
26. Цветков В.Я., Кужелев П.Д. Железная дорога как геотехническая система // Успехи современного естествознания. –2009. – №4. – С.52-54.
27. Ознамец В.В. Геодезическое обеспечение радиорелейного информационного пространства // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – 1(9). – С.46 -52.
28. Цветков В.Я., Ознамец В.В. Применение радиометок при мониторинге железнодорожных дорог // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 3. С. 14-15.
29. СП 233.1326000.2015 Инфраструктура железнодорожного транспорта. Высокоточная координатная система. Утвержден приказом Министерства транспорта РФ от 17.06.2015 N 191, введен с 01.07.2015 г. С.79. // Электронный ресурс – [http:// docs.cntd.ru/document/415999755](http://docs.cntd.ru/document/415999755).
30. Бучкин В.А., Агаркова И.Н., Рыжик Е.А. Комплексная система пространственных данных инфраструктуры железнодорожного транспорта // Самара: Вестник транспорта Поволжья, №6(66), 2017. – С.77-83.

УДК: 001.895; 656.02; 656.2; 656.3

## **ВЛИЯНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЕЗДОМ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НА СЕТЕВОЕ РАЗВИТИЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

**Охотников А.Л.** Заместитель руководителя Центра, АО «НИИАС»,  
E-mail: a.ohotnikov@vniias.ru, Москва, Россия

**Цветков В.Я.** д.т.н., профессор, зам. руководителя Центра, АО «НИИАС»,  
E-mail: cvj2@mail.ru, Москва, Россия

**Аннотация.** В статье обсуждается разработка систем беспилотного управления на железнодорожном транспорте, определены основные требования для создания таких систем. Проведена классификация систем технического зрения для различных видов объектов железнодорожного транспорта, а для обнаружения препятствий классификация объектов по типам обнаруживаемых объектов. В статье дана оценка текущей ситуации с развитием беспилотных систем и приведены планы внедрения на 2020 год.

**Ключевые слова:** транспорт, беспилотное управление, ситуационное управление, информационная ситуация, система технического зрения

## **INFLUENCE OF THE TRAIN CONTROL SYSTEM IN AUTOMATIC MODE ON THE NETWORK DEVELOPMENT OF RAILWAYS**

**Okhotnikov A.L.** Deputy Head, Center for strategic analysis and development, JSC «NIAS»,  
E-mail: a.ohotnikov@vniias.ru, Moscow, Russia

**Tsvetkov V.Ya.** D.ofSci.(Tech), Professor, deputy head of Center, JSC "NIAS",  
E-mail: cvj2@mail.ru, Moscow, Russia

**Annotation.** The article describes the creation of unmanned control systems for railway transport. The main requirements for creating such systems are defined. Quantitative characteristics of the project are given in relation to various types of infrastructure facilities and traction rolling stock. The classification of technical vision systems for various types of railway transport objects, and for detecting obstacles, the classification of objects by the types of objects detected. The article assesses the current situation with the development of unmanned systems and provides implementation plans for 2020

**Keywords:** transport, self-driving management, situational management, information situation, machine vision system

### **Введение**

Одним из направлений автоматизации управления движением транспортных объектов является направление беспилотных наземных транспортных средств (Unmanned Ground Vehicle - UGV) [1]. Беспилотное управление наземных транспортных объектов, включая железнодорожный транспорт, не возникло с нуля, а использует опыт беспилотного управления в других видах транспорта.

В первую очередь это опыт гражданского и военного воздушного транспорта [2], а также беспилотного управления космическими аппаратами [3]. Учитывается опыт беспилотного управления для беспилотных авиационных систем БАС [4]. Для UGV важен только тот опыт беспилотного управления БАС, которое развивается на базе интеллектуальных технологий

управления подвижным транспортным объектом [5], что делает его полностью переносимым в сферу железнодорожного транспорта. Используется опыт управления роботехническими транспортными средствами, особенно в военных целях и в условиях чрезвычайных ситуаций. Дополнительным стимулом развития беспилотного управления на железнодорожном транспорте является развитие высокоскоростного транспорта [6].

Беспилотное управление является особым типом управления, которое основано не на жестких директивах управления, а на управлении по ситуации [7, 8] с помощью гибкой системы алгоритмов. Если рассматривать беспилотное управление в аспекте развития разных школ управления [9], то оно относится к управлению при непредвиденных обстоятельствах. Структурно беспилотное управление транспортом представляет собой распределенное управление [10], исходящее из двух центров главного и периферийного [11]. Главный центр задает стратегию, а периферийный центр реализует её. Особенностью распределенного управления для UGV является то, что это распределенное управление является интеллектуальным [12].

Говоря о беспилотном управлении, следует выделить два типа: беспилотное в условиях плохой видимости для транспортных объектов, передвигающегося со скоростями до 120 км/ч и беспилотное управление в условиях скоростного и высокоскоростного движения [6] и цифровой железной дороги. Плохая видимость, особенно для городского транспорта, обусловлена чаще всего метеорологическими условиями. Эту проблему решают применением инфракрасных датчиков (тепловизоров) [13] и реже ультразвуковых датчиков. Также в условиях плохой видимости для беспилотного управления применяют системы ночного видения [14], специальные системы обнаружения препятствий [15]. Для этих целей применяют также лидары [16]. Можно ввести понятие зоны безопасности (ЗБ) беспилотного транспортного объекта. Для городского и не скоростного транспорта зона безопасности невелика.

Для высокоскоростного транспортного объекта зона безопасности велика и превосходит зону оптической видимости. Для цифровой железной дороги [17, 18], при организации движения с помощью подвижных блок-участков [19] зона безопасности является плавающей и зависит от транспортного средства, идущего впереди и позади управляемого транспортного объекта. Для цифровой железной дороги и высокоскоростного транспорта нужны системы поддержки в виде регулируемого и контролируемого пространства, в котором находится транспортный объект.

Эти системы поддержки основаны на создании радиорелейного информационного пространства [20-22], дополнительным преимуществом которого является возможность обеспечения устойчивого канала не только связи, но и управления [23], как альтернатива спутниковым системам связи и передачи данных [24]. Еще одной системой поддержки является создание информационного пространства электронных меток [25] или электронных геодезических сетей. Само собой, они используют апробированные спутниковые навигационные системы для создания информационного пространства контроля транспортных объектов [26].

Создание систем автоматизации управления движением транспортных объектов на всей сети железных дорог ставит перед собой конкретные цели, которые не только позволят снизить эксплуатационные расходы [27], но и обеспечить энергооптимальное движение транспортных объектов с минимальными интервалами с учетом множества факторов, оцениваемых информационной ситуацией при управлении движением сложных транспортных систем. Основной целью при внедрении автоматических систем управления в ОАО «РЖД» ставится задача повышения безопасности движения, эффективности и производительности за счет применения самых современных технологий. Долгосрочная программа развития ОАО «РЖД» до 2025 года и программа цифровой экономики Российской Федерации в части реализации проекта «Цифровая железная дорога» определяет проект по созданию беспилотных систем на железнодорожном транспорте как одно из главных перспективных и достижимых направлений развития железных дорог. Таким образом исследование различных технологий

автоматизированного управления железнодорожного транспорта является актуальным направлением.

#### Общее описание

Системой управления поездом в автоматическом режиме называют комплекс аппаратно-программных средств [28], осуществляющих управление тяговым подвижным составом (далее - ТПС) с ограниченным участием человека. По степени участия человека в управлении ТПС различают следующие современные системы:

- Функциональное управление осуществляется машинистом с функцией автоведения (локальное субсидиарное управление);
- Системное управление осуществляется системой автоведения под контролем машиниста (локальное субсидиарное управление);
- Автоматизированное локальное беспилотное управление (допускается дистанционное управление);
- Интеллектуальное беспилотное управление (допускается дистанционное управление или централизованное субсидиарное управление).

Автоматизированное локальное беспилотное управление (без машиниста) в настоящее время в ОАО «РЖД» развивается по двум направлениям – для маневровой работы на станциях и для управления электропоездами на МЦК (Московское центральное кольцо). Решения для магистральных локомотивов будут разрабатываться на основе перечисленных проектов с учетом полученного опыта эксплуатации.

Система беспилотного управления представляет собой комплекс аппаратно-программных средств, включающих в свой состав:

- видеокамеры;
- радары;
- лидары;
- тепловизоры;
- системы обработки данных для всех датчиков;
- блок обнаружения препятствий для комплексирования данных;
- систему мониторинга состояния ТПС;
- систему связи и передачи данных с центром дистанционного управления;
- систему позиционирования ТПС;
- систему управления ТПС.

Одной из основных подсистем системы беспилотного управления является система технического (машинного) зрения (СТЗ). Она играет ключевую роль для определения параметров внешней информационной ситуации (состояния окружающей среды) и заменяет физиологическое зрение машиниста, но делает это лучше и не подвержена усталости и настроению. Приведем разработанную авторами классификацию систем технического зрения (СТЗ) для различных областей применения.

Таблица 1.

Области применения систем технического зрения (СТЗ)

По видам транспорта	Подвид
Автомобильный транспорт	Легковой, грузовой, пассажирский
Морской транспорт	Маломерные суда, морские, речные, океанские
Авиация	Военные, гражданские, легкомоторные, крупнофюзеляжные
Космос	Военные, гражданские, орбитальные станции, спутники
Железнодорожный	Маневровые, электрички, магистральные

транспорт	
По отрасли	Разновидность
Промышленность	Производство (станки), конвейер, контроль качества, маркировки, количества, полноты состава
Сельское хозяйство и АПК	Контроль за ростом, подсчет количества,
Военное дело	Обнаружение и идентификация противника, слежение цели, управление объектами
Логистика	Логистическое и складское оборудование

Как видно из таблицы, для железнодорожного транспорта выделены три основных направления для различных видов ТПС: маневровые и магистральные локомотивы, электрички. При этом для каждого типа ТПС разрабатываются свои требования и характеристики СТЗ.

#### **Описание требований для создания и использования систем беспилотного управления**

Приняты необходимые меры и требования для организации беспилотного движения на железнодорожном транспорте:

- Разработка и утверждение «Концепции системы управления движением в автоматическом режиме в соответствии с 4-м уровнем автоматизации»;
- Корректировка нормативной документации, регламентирующей эксплуатацию беспилотного железнодорожного транспорта на сети железных дорог;
- Разработка доказательств безопасности использования систем беспилотного управления локомотивом;
  - Строительство сетей связи и передачи данных стандарта LTE на выделенной частоте для ОАО «РЖД» (1785 – 1805 МГц);
  - Создание центра дистанционного контроля и управления поездами на перегонах;
  - Создание рабочего места для дистанционного контроля и управления маневровыми локомотивами для сортировочных станций;
  - Комплексная реконструкция инфраструктуры для поэтапного перехода к следующему уровню степени автоматизации (GoA4) (включая строительство стационарных комплексов обнаружения препятствий в зонах (областях) ограниченной видимости и повышенной опасности на объектах железнодорожной инфраструктуры);
  - Разработка и внедрение систем технического (машинного) зрения для всех типов подвижного состава;
    - Создание отечественного центра радиоблокировки;
    - Модернизация бортовых систем ТПС для беспилотного управления (создание единого бортового устройства безопасности);
    - Создание и использование 3D цифровых карт;
    - Обеспечение безусловной информационной и кибербезопасности для каналов связи и передачи ответственной информации.

Для системы технического зрения ТПС, в состав которого входят набор датчиков (сенсоров) типа видеокамера, радар, лидар, тепловизор, вычислитель и блок определения препятствий, ставятся следующие задачи:

- определение объектов, находящихся в зоне видимости по пути следования локомотива/поезда;

- классификация объектов по типам (человек, большой неопределенный объект (от 1 м<sup>2</sup> и более), малый неопределенный объект (от 0,16 м<sup>2</sup> до 1 м<sup>2</sup>), и другие типы объектов в соответствии с классификацией);
- определение местоположения относительно железнодорожного пути, по которому производит движение ТПС (определение координаты, скорости объекта и расстояния до препятствия).

#### **Текущее состояние и планы**

В настоящий момент для маневрового локомотива работы находятся на этапе разработки и опытной эксплуатации. В частности, реализовано (на ст. Лужская):

- установлены системы машинного зрения на три локомотива серии ТЭМ7А (№№534,542,543);
- создано рабочее место машиниста оператора.

Для электропоезда Ласточка работы находятся на этапе разработки (реализация на МЦК):

- установлена система машинного зрения на ЭС2Г-113.
- создан центр дистанционного контроля и управления (ЦДКУ).

Разработаны и утверждены мероприятия по внедрению систем беспилотного управления на 2020 год:

- Работа консорциума по беспилотному управлению движением с привлечением ведущих технических университетов РФ;
- Разработка программного обеспечения для компонентов системы управления и подсистем электропоезда ЭС2Г;
- Проведение испытаний на ЭС2Г «Ласточка» разработанного программного обеспечения;
- Корректировка программного обеспечения и изменение схемы монтажа оборудования на электропоезде ЭС2Г;
- Эксплуатационные испытания электропоезда ЭС2Г «Ласточка» в информационном режиме;
- Корректировка программного обеспечения по результатам эксплуатационных испытаний;
- Подконтрольная эксплуатация в управляющем режиме;
- Ввод системы в постоянную эксплуатацию на одном электропоезде ЭС2Г в управляющем режиме.

#### **Количественные характеристики проекта**

Для установки системы технического зрения на 1 маневровый локомотив серии ТЭМ7А требуется потратить порядка 3 млн. руб. Для организации рабочего места оператора-машиниста на станции для удаленного управления маневровым локомотивом необходимо инвестировать не менее 15 млн. руб. Для установки системы технического зрения на 1 электропоезд типа ЭС2Г «Ласточка» затраты составляют порядка 15 млн. руб.

Стоимость создания центра дистанционного контроля и управления (ЦДКУ) для управления электропоездами типа ЭС2Г – рассчитываются исходя из наличия помещения и затрат на его подготовку. Для подготовленного помещения с организованным доступом к сети СПД стоимость организации одного рабочего места ориентировочно составляет 10-15 млн. руб. В состав рабочего места входит пульт и серверные компоненты.

Для системы расширенного технического зрения (СРТЗ), которое позволяет определять препятствия на пути движения поезда в зонах (областях) ограниченной видимости и местах повышенной опасности, где бортовая СТЗ не может справиться из-за характера местности и

нелинейности пути, необходим стационарный комплекс обнаружения препятствий. Затраты на строительство комплекса на объектах железнодорожной инфраструктуры составляют – 2-3 млн. руб.

Стоимостные показатели должны рассчитываться для каждого направления отдельно, т.к. они зависят от существующей инфраструктуры и парка ТПС. Отдельно рассчитываются:

- стоимость организации систем связи и передачи данных на всем протяжении работы беспилотного ТПС;
- оснащение ТПС современными приборами безопасности, включая систему машинного зрения.

### **Выводы**

Основными факторами влияния на управление движения поездами на всей сети железных дорог при использовании систем управления поездом в автоматическом режиме являются:

- Повышение уровня безопасности за счет исключения «человеческого фактора», уменьшение аварийных ситуаций;
- Для станций - повышение эффективности маневровой работы и повышение перерабатывающей способности за счет повышения скорости локомотива (до 15 км/ч вместо существующих 2 км/ч) при выполнении маневровых операций на станции при заезде на занятый путь;
- Для перегонов - повышение надежности выполнения графика движения поездов и снижение затрат (нагрузки) на тяговое энергоснабжение за счет использования энергоэффективного графика движения.

Дополнительные эффекты от внедрения получаются за счет:

- сокращения штата помощников машинистов (ведение поезда в одно лицо);
- сокращение ставок машиниста при одновременном введении новых должностей машинистов-операторов при создании центров дистанционного контроля и управления на станциях, перегонах и МЦК.

Наряду с определенными достижениями в области разработки беспилотного управления остаются проблемы, требующие дальнейших исследований. Прежде всего это проблема умышленных кибер атак на беспилотный транспортный объект [29]. Это проблема организации управления группами беспилотных средств, которая требует решения задач их синхронизации в транспортных сетях [30]. Эта проблема синхронизации требует объединения с технологиями многоцелевого управления [31]. Интерес представляет попытка переноса идеологии интернета вещей в среду беспилотных систем, при которой отдельный беспилотный транспортный объект рассматривается как элемент IoT технологии [32].

### **Список литературы:**

1. Gerhart, Grant; Shoemaker, Chuck (2001). Unmanned Ground Vehicle Technology. SPIE-International Society for Optical Engine. p. 97. ISBN 978-0819440594.
2. Ebken J., Bruch M., Lum J. Applying unmanned ground vehicle technologies to unmanned surface vehicles //Unmanned Ground Vehicle Technology VII. – International Society for Optics and Photonics, 2005. – Т. 5804. – С.585-596.
3. Ершов Н.В. Становление и развитие отечественного космического флота: историография проблемы // European Social Science Journal. 2014. № 4-1 (43). – С.427-436.

4. Цветков В.Я., Ознамец В.В., Филатов В.Н. Определение условной береговой линии по снимкам беспилотного летательного аппарата // *Информация и космос*. 2019.- №1. – С.126-131.
5. Gonzalez L. F. et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence revolutionizing wildlife monitoring and conservation // *Sensors*. – 2016. – Т. 16. – №. 1. – С.97.
6. Титов Е.К. Информационная ситуация при управлении транспортом с магнитной левитацией // *Наука и технологии железных дорог*. – 2019. – 4(12). – С.30-38.
7. Tsvetkov V. Ya. Information Situation and Information Position as a Management Tool // *European researcher*. 2012, 12-1 (36), p.2166- 2170.
8. Цветков В. Я., Охотников А.Л., Информационная управленческая ситуация на транспорте // *Государственный советник*. – 2018. -№2. – С.27-33.
9. Цветков В.Я. Развитие технологий управления // *Государственный советник*. – 2015. - №4(12). – С.5-10
10. Козлов А.В. Системный анализ распределенных систем // *ИТНОУ: Информационные технологии в науке, образовании и управлении*. - 2019. - № 1(11). – С.71-76.
11. Лёвин Б. А., Цветков В. Я., Дзюба Ю. В. Субсидиарное управление на железной дороге // *Мир транспорта*. - 2019. - Т. 17. - №4 (83). - С.22-35.
12. Цветков В.Я. Распределенное интеллектуальное управление // *Государственный советник*. – 2017. - №1. – С.16-22.
13. Rankin A. et al. Unmanned ground vehicle perception using thermal infrared cameras // *Unmanned Systems Technology XIII*. – International Society for Optics and Photonics, 2011. – Т. 8045. – С.804503.
14. Owens K., Matthies L. Passive night vision sensor comparison for unmanned ground vehicle stereo vision navigation // *Proceedings IEEE Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum: Methods and Applications (CVBVS'99)*. – IEEE, 1999. – С.59-68.
15. Moon H. C., Kim J. H., Kim J. H. Obstacle detecting system for unmanned ground vehicle using laser scanner and vision // *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*. – IEEE, 2007. – С.1758-1761.
16. Aguilar W. G. et al. Path Planning Based Navigation Using LIDAR for an Ackerman Unmanned Ground Vehicle // *International Conference on Intelligent Robotics and Applications*. – Springer, Cham, 2019. – С.399-410.
17. Лёвин Б.А., Цветков В.Я. Цифровая железная дорога: принципы и технологии // *Мир транспорта*. - 2018. - Т. 16. - №3 (76). - С.50-61.
18. V. Ya. Tsvetkov, S.V. Shaytura, K.V. Ordov. Digital management railway // *Advances in Economics, Business and Management Research*, volume 105. 1st International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019), p.181- 185.
19. Щенников А.Н. Применение виртуальных блоков в управлении транспортом // *Наука и технологии железных дорог*. – 2019. – 1(9). – С.17 -26.
20. Ознамец В.В. Геодезическое обеспечение радиорелейного информационного пространства // *Наука и технологии железных дорог*. – 2019. – 1(9). – С.46 -52.
21. Pezeshkian N., Nguyen H. G., Burmeister A. Unmanned ground vehicle radio relay deployment system for non-line-of-sight operations. – *SPACE AND NAVAL WARFARE SYSTEMS CENTER SAN DIEGO CA*, 2007.
22. Цветков В.Я., Дзюба Ю.В. Радиорелейное информационное пространство // *Автоматика, связь, информатика*. 2019. № 4. С.24-25.

23. Tripathi B. et al. An RF relay based control and communication system for Unmanned Ground Vehicle and Micro Air Vehicle //2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). – IEEE, 2015. – С.406-409.
24. Розенберг Е.И., Розенберг И. Н., Цветков В. Я., Шевцов Б.В. Устройство контроля подвижного объекта. Патент на полезную модель. № RU 95851 U1. Зарегистр. 10.07.2010.
25. Цветков В.Я., Ознамец В.В. Применение радиометок при мониторинге железнодорожных дорог // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 3. С.14-15.
26. Савиных В.П. Использование методов дистанционного зондирования для управления транспортом // Науки о Земле. - 2-2012.- С.58 – 61.
27. Лapidус Б. М., Мачерет Д. А., Вольфсон А. Л. Теория и практика управления эксплуатационными затратами железнодорожного транспорта. – Общество с ограниченной ответственностью "МЦФЭР", 2002.
28. Brosinsky C. A. et al. Integrating intrinsic mobility into unmanned ground vehicle systems //Unmanned Ground Vehicle Technology III. – International Society for Optics and Photonics, 2001. – Т. 4364. – С.19-27.
29. Gay C. et al. Operator suspicion and decision responses to cyber-attacks on unmanned ground vehicle systems //Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. – Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, 2017. – Т. 61. – №. 1. – С. 226-230.
30. Ren H. et al. Synchronization of network systems via aperiodic sampled-data control with constant delay and application to unmanned ground vehicles //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019.
31. Tsvetkov V. Ya. Multipurpose Management// European Journal of Economic Studies. 2012. № 2 (2). p.140-143.
32. Ziebinski A. et al. Soft real-time systems for low-cost unmanned ground vehicle //International Conference on Computational Collective Intelligence. – Springer, Cham, 2019. – С.196-206.

УДК: 681.3.06

## ПРИМЕНЕНИЕ ЗАЩИТНОГО КОНТЕКСТА В ПРОЦЕССЕ СИТУАЦИОННОГО АНАЛИЗА

- Самойлов Л.К.** д.т.н., профессор, Южный федеральный университет (ЮФУ), E-mail: sbelyakov@sfnedu.ru, Таганрог, Россия
- Залилов Э.Ф.** аспирант, Южный федеральный университет (ЮФУ), E-mail: ezalilov@sfnedu.ru, Таганрог, Россия
- Белякова М.Л.** к.т.н., доцент, Южный федеральный университет (ЮФУ), E-mail: mbelyakova@sfnedu.ru, Таганрог, Россия
- Зубков С.А.** Директор, Научно - технический центр, Южный федеральный университет (ЮФУ), E-mail: zubkov@intech.ru, Таганрог, Россия
- Аннотация.** В работе рассматривается процесс ситуационного анализа пространственной области, представленной картографически. Аналитический процесс заключается в визуальном изучении пользователем-аналитиком картографических материалов, получаемых по запросам от сетевого картографического сервиса. Предполагается, что для решения поставленной задачи аналитик строит рабочую область карты, наполняя ее необходимыми объектами и отношениями. Рассматривается уязвимость процесса анализа, обусловленная наличием объектов с дефектами отображения. Их наличие снижает целостность визуализации и, как следствие, отрицательно сказывается на уровне ситуационной осведомленности аналитика. Рассматриваются пути решения данной проблемы, состоящий в переходе в более безопасный контекст работы. Предлагаются модель оценки допустимого уровня дефектов в визуализированной области анализа, и метод изучения «характерных» точек временных рядов, описывающих картографические изображения в сеансе. Предлагается способ выбора защитного контекста из набора контекстов геосервиса.
- Ключевые слова:** управление анализом, интеллектуальные геоинформационные системы, контекст, ситуационная осведомленность.

## APPLICATION OF PROTECTIVE CONTEXT IN THE PROCESS OF SITUATIONAL ANALYSIS

- Samoylov L.K.** Professor, Southern Federal University, E-mail: lksamoylov@sfnedu.ru, Taganrog, Russia
- Zalilov E.F.** Post-graduate Student, Southern Federal University, E-mail: ezalilov@sfnedu.ru, Taganrog, Russia
- Belyakova M.L.** Ph.D., associate Professor, Southern Federal University, E-mail: mbelyakova@sfnedu.ru, Taganrog, Russia
- Zubkov S.A.** Director of the Center, Southern Federal University, E-mail: zubkov@intech.ru, Taganrog, Russia
- Annotation.** The paper considers the process of situational analysis of the spatial domain, presented cartographically. The analytical process consists in the visual study by the user-analyst of the cartographic materials received upon requests from the network cartographic service. It is assumed that to solve the problem, the analyst builds the working area of the map, filling it with the necessary objects

and relationships. The vulnerability of the analysis process due to the presence of objects with display defects is considered. Their presence reduces the integrity of visualization and, as a result, adversely affects the level of situational awareness of the analyst. The ways to solve this problem, consisting in the transition to a safer work context, are examined. A model is proposed for assessing the permissible level of defects in the visualized area of analysis, and a method for studying the “characteristic” points of time series describing cartographic images in a session. A method for selecting a protective context from a set of geoservice contexts is proposed.

**Keywords:** analysis management, intelligent geographic information systems, context, situational awareness.

### **Введение**

Необходимость в получении геоданных в сложившейся проблемной ситуации, прогноз ее развития, оценка альтернатив решений имеется в различных задачах управления транспортными системами. Находясь в контуре управления сложной системой, аналитики с помощью геоинформационных систем и сервисов решают трудно формализуемые задачи, результаты решения которых непосредственно влияют на физическую среду. Важной особенностью рассматриваемого класса задач является их диалоговый характер. Чтобы найти выход из создавшейся ситуации, аналитику необходимо ее изучить в контексте естественных условий возникновения, классифицировать и затем приступить к генерации и выбору решения. Перечисленные действия образуют то, что называется ситуационным анализом (СА).

Процесс СА начинается с того, что эксперт-аналитик строит начальный вариант рабочей области анализа. Эта область представляет собой фрагмент глобальной карты, хранимой геосервисом. Аналитик отбирает в рабочую область данные, полезные для дальнейшего анализа. Изучая визуально рабочую область, аналитик накапливает потенциал знаний, необходимый для достижения ситуационной осведомленности и адекватной оценки событий и явлений. Возможно, что изменяющееся понимание смысла ситуации приведет к новой постановке задачи и изменению стратегии ее решения. Перечисленные действия повторяются циклически до нахождения приемлемого результата.

По ряду объективных причин [1] картографические данные могут содержать ошибки, неточности, которые порождают дефекты отображения фрагментов карты. Наличие дефектов в потоке таких данных не считается аномальным, однако несет в себе угрозу потери аналитиком ситуационной осведомленности. Соответственно, возрастает возможность появления ущерба из-за неадекватно принятого решения. С точки зрения информационной безопасности [2], данная угроза может быть использована для атаки на процесс анализа. Суть атаки заключается в добавлении такого объема геоданных невысокого качества, который спровоцирует недопустимое возрастание уровня дефектов карты. Обратим внимание, что обнаружить атаку можно только в процессе диалога аналитика с геосервисом. Она реализуется в определенном контексте изучения картографических материалов.

Противодействие атаке может осуществляться либо аварийной остановкой процесса анализа, либо продолжением с активизацией некоторых защитных мер. Удаление объектов и отношений из рабочей области изменяет смысл картографического изображения. Его полезность неизбежно снижается. Поэтому защитной реакцией должно стать изменение контекста анализа. Новый поток картографических данных должен компенсировать потерю смысла. Аналитик

должен получить возможность продолжить анализ в выбранном смысловом направлении, используя другую комбинацию объектов и отношений.

В данной работе предлагается подход к обнаружению и противодействию атакам, основанный на применении специальных моделей потока данных с дефектами и управления процессом анализа.

### **Обзор известных решений.**

Задача отбора нужных картографических данных для решения поставленной задачи является одной из главных при проведении ситуационного анализа с помощью геосервисов [3]. Использование источников неактуальной и недостоверной информации является уязвимостью, устранить которую невозможно. Современные геосервисы относятся к системам big data, накапливающим сведения об окружающем мире не только от сенсорных сетей, систем аэрокосмического наблюдения, но и из социальных сетей. Информация обладает разным качеством, однако несет в себе пространственно-временную привязку и может быть использована для пространственного анализа. Риск использования некачественных данных снижается сертификацией источников и применением регламентированных шаблонов и методик отбора данных. Однако, такой подход неэффективен при решении нестандартных проблем, когда задействуется креативность аналитика и важные, но недостаточно проверенные данные.

Необходимо отметить, что снижение достоверности отображения картами земной поверхности неизбежно. Нормативный период обновления картографических данных может не соответствовать скорости процессов, происходящих в реальном мире. Например, изменение рельефа, вызванное природной катастрофой, может появиться на картах лишь через несколько лет. Поэтому на практике прибегают к некоторым приемам оперативного картографирования [4], выполняющегося либо автоматически, либо вручную картографами-волонтерами. В обоих случаях на картах появляются объекты, изображения которых неточны и не согласованы с окружающими базовыми элементами географической основы. Очевидно, что эти объекты порождают визуально видимые дефекты картографических изображений. Тем не менее, их использование на картах во многих случаях полезно, поскольку повышает уровень ситуационной осведомленности аналитика.

Обнаружение дефектов на картах, возникших при ее построении, является одной из стандартных функций геосервисов [5,6]. Алгоритмы выявления дефектов основаны на контроле геометрических ограничений. Например, контролируется наложение линий друг на друга, дублирование одних и тех же объектов, недопустимые пересечения, и ряд других. Однако, геометрия не является единственным фактором, определяющим смысл изображения. Комбинации геометрических фигур имеют определенный смысл, который формально не выводится из соотношения их формы и размеров. Функции выявления дефектов не связаны с интерактивным диалогом построения и анализа областей карты. Поэтому решить проблему описанным образом невозможно, если не привлекать средства смыслового контроля изображения карты.

Анализируя современные подходы к обеспечению безопасности киберфизических систем [7], следует отметить, что рассматриваемая уязвимость относится к прикладному уровню. Применяемые здесь методы защиты способны в некоторой степени понизить степень уязвимости. Например, аутентификация источников данных гарантирует определенное качество геоданных. Однако, на практике всегда будут существовать не аутентифицированные

источники, наличие которых компрометирует рабочую область.

Аналогично, нереальным оказывается установить для каждого источника уровень доверия, зависящий от уровня риска принятия решений. Попытка изучить и оценить каждый возникающий в сети источник данных требует огромных затрат.

Известен подход к выявлению атак, основанный на классификации [8,9]. Суть подхода заключается в сборе данных о наблюдавшихся в реальности атаках и последующем применении одной из моделей машинного обучения. Данный подход дает хороший результат, когда имеются информативные признаки атаки и стабильность их измерения. Трудность применения данного подхода к рассматриваемой проблеме в отсутствии информативных признаков, позволяющих выявить начало атаки. Причина в том, что анализ носит преимущественно визуальный характер, при котором задействованы механизмы психо - физического восприятия аналитика.

### **Уязвимость анализа, использующего поток картографических изображений с дефектами.**

Под дефектом в данной работе понимается некорректное взаимное расположение объектов на карте, которое фиксируется при визуальном анализе. Как уже отмечалось, наличие данных с дефектами в потоке картографических данных является вполне обычным. Восприятие человеком изображений определяется общим количеством картографических сущностей на экране [10], поэтому незначительная доля дефектов не компрометирует картографический образ рабочей области в сознании аналитика. Высокая доля дефектов разрушает образ, что заставляет рассматривать ее как уязвимость. Анализ позволил выделить ее особенности:

1) визуальное изучение рабочей области формирует картографический образ в сознании аналитика. Целостный и достоверный образ способствует выработке эффективных решений. Нарушение целостности и достоверности образа приводит к отрицательным последствиям;

2) картографический образ формируется только в процессе интерактивного анализа рабочей области карты. Возникающий поток должен включать в себя данные определенного смыслового содержания. Все другие данные являются избыточными и компрометируют образ.

Исходя из этого, угрозой является недопустимое увеличение уровня избыточности потока данных. Избыточная часть может быть декомпозирована на две составляющие. Первая составляющая – это естественная избыточность, обусловленная разнообразием информационного содержания электронных географических карт. Большое число типов объектов, слоев и тематических групп никогда не используются одновременно. Для решения определенных классов задач создаются подмножества, образующие контекст анализа. Контексты – это смысловые фильтры данных, отражающие структуру базы данных геосервиса.

Вторая составляющая – это методическая избыточность, порожденная методом построения карты. Карты, изготовленные специалистами-картографами с применением современных средств съемки земной поверхности, такой избыточностью не обладают. Карты, фрагменты карт или отдельные объекты, нанесенные на карту картографами-волонтерами, программами-ботами социальных сетей и систем мониторинга, избыточность вносят. Она проявляется в том, что аналитик, изучающий карту, должен затратить усилия на фильтрацию дефектов. Методическая составляющая избыточности представляет наибольший интерес при анализе безопасности потока картографических данных.

Рассмотрим, каким образом следует оценивать опасность методической составляющей. Для этого будем считать, что для каждого аналитика субъективно задано (в его профайле)

максимальное число объектов  $N^*$ , комфортно воспринимаемое при визуальном анализе картографического изображения. Обозначим через

$$\alpha = n_d / N^*, \quad (1).$$

долю объектов, содержащих дефект. Значение  $\alpha$  может использоваться для обнаружения атаки: если оно больше некоторого порогового значения  $\alpha^*$ , то число объектов с дефектами компрометирует картографический образ. Таким образом, функция защиты должна непрерывно контролировать число объектов с дефектами в области визуального анализа.

Трудность выявления объектов, порождающих дефекты отображения в неоднозначности и неопределенности относительного расположения фигур. Пересечение, смежность, нахождение внутри или снаружи легко формализуются геометрически, однако трудно интерпретируются при целостном восприятии области земной поверхности. Определенные виды дефектов выявить несложно. Например, на рис. 1 показан фрагмент карты, на котором явно видны дефекты пересечения контуров зданий треками передвижения велосипедистов. Следует обратить внимание, что аномальное пересечение двух объектов порождает новый объект, отображающий дефект. Назовем такие объекты d-объектами. Именно их число учитывается в выражении (1).

Если дефект не имеет естественного визуального представления, для него может быть введено специальное обозначение. Такой случай показан на рис. 2. Место парковки автомобильного транспорта не может находиться в данном месте, поскольку на карте рельефа здесь находится углубление (рис. 3). В данном случае дефект возник из-за несогласованности геоданных.

Таким образом, с помощью программно реализованных алгоритмов обнаружения d-объектов возникает возможность подсчитать  $n_d$ . Чтобы принять решение о допустимости доли дефектных объектов, необходимы знания о поведении аналитика, использующего картографические изображения с дефектами. Источником таких знаний может быть последовательность контекстов, которую аналитик использовал в сеансе.



Рисунок 1. Пример явного d-объекта.



Рисунок 2. Пример неявно указанного d-объекта.



Рисунок 3. Причина возникновения d-объекта

Будем считать, что геосервис использует контексты для анализа и известны результаты наблюдения поведения потока картографических данных в сеансах анализа. Эти временные ряды отражают субъективную реакцию аналитика, решающего задачу определенного смыслового содержания. Ряд представляется наборами

$$\{ \langle t_i, C(t_i), F(t_i) \rangle \}, i = 0, 1, 2, \dots, t_i \in [0, T], \quad (2).$$

где  $T$  - длительность сеанса анализа,  $C(t_i)$  - наименование используемого контекста в момент времени  $t_i$ ,  $F(t_i)$  - функция геосервиса, вызванная через интерфейс клиентского программного обеспечения в момент времени  $t_i$ . Технически ряд (2) восстанавливается из лога вызовов функций в сеансе. Заметим, что с помощью ряда (2) может быть построен производный ряд  $\{ \langle t_i, n_d(t_i) / N^* \rangle \}, i = 0, 1, 2, \dots, t_i \in [0, T]$  для оценки реакции пользователя на поток дефектных объектов.

Достаточно очевидным представляется статистическая обработка временного ряда. Однако, такой подход не дает ожидаемого результата. Особенность визуального анализа картографических изображений человеком состоит в том, что он в течение определенного времени способен «не замечать» дефекты. При статистических расчетах это учесть невозможно. В результате статистические оценки уровня  $n_d$  могут отличаться от экспертных, как показывает анализ, на 15-50%. Поэтому более достоверным представляется выявление «характерных» точек во временных рядах, связанных с изменением контекста. Таковыми, с точки зрения авторов, являются моменты перехода из одного контекста в другой со следующими особенностями:

1) моменту перехода предшествовал рост относительной доли дефектов. На рис.4 показан пример фрагмента временного ряда, показывающий подобную ситуацию. Через  $C_a$  и  $C_b$  обозначены контексты анализа;

2) длительность нахождения в новом контексте оказалась небольшой, при этом относительная доля дефектов была выше, чем в предыдущем и последующем контекстах.

Возможный вариант временного ряда показан на рис. 5. Здесь  $C_a, C_b$  и  $C_c$  - последовательность сменяющихся контекстов. Длительность интервала времени использования контекста  $C_b$  не должна превышать десятка секунд.

3) Моменту окончания сеанса предшествовал рост относительной доли дефектов. Пример временного ряда приведен на рис. 6.

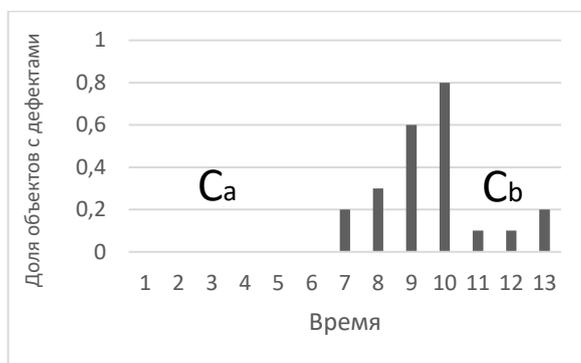


Рисунок 4. Рост доли дефектов при переходе между контекстами

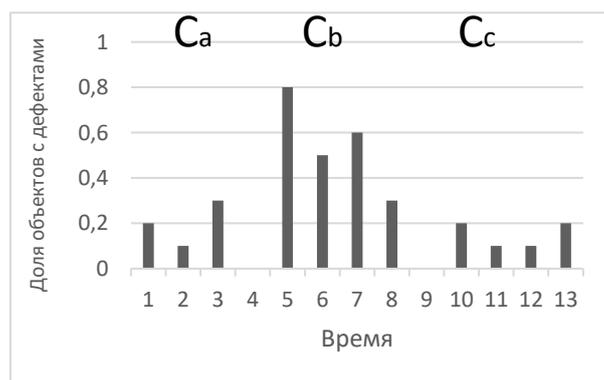


Рисунок 5. Кратковременный рост доли дефектов

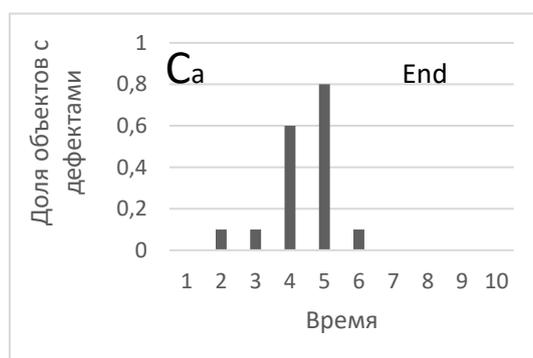


Рисунок 6. Рост доли дефектов перед окончанием сеанса

Перечисленные «характерные» точки соответствуют смысловому характеру визуального анализа: пользователь начинает ощущать дискомфорт от слишком большой доли дефектов и

реагирует на нее переключением контекста или завершением сеанса.

### Нахождение защитного контекста

Под контекстом в области исследования контекстно зависимых систем традиционно понимают любую информацию, позволяющую идентифицировать сложившуюся ситуацию и предпринять адекватные действия для решения поставленной задачи [11]. При выполнении ситуационного анализа описание контекста задает границы пространственной, временной и семантической области анализа. Программа-интерпретатор контекста выполняет операции по отбору запрошенных пользователем объектов соответственно границам.

Употребляемый в настоящей работе термин «смысл» подразумевает интуитивное осознание ситуации аналитиком в процессе диалога с геосервисом. Если контекст не соответствует смыслу, интерактивное взаимодействие между ними наполняется избыточностью и становится малополезным. Характерно то, что несовпадение контекста и смысла ситуации может возникать в процессе анализа с достаточно высокой вероятностью. Вероятность тем выше, чем неопределенней постановка исходной задачи и заметнее «knowledge gap» при оценке ситуации [12,13]. Ключевым вопросом использования контекстов является выявление того из них, который в наибольшей степени соответствует смыслу текущей ситуации. Традиционно для этого вводят разнообразные метрики близости, отражающие опыт наблюдения изучаемых объектов [14]. Метрики тесно связаны с концептуальной моделью самого контекста.

Задача выбора защитного контекста заключается в следующем: геосервис включает в себя описание множества контекстов  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ , каждый из которых может устанавливаться аналитиком в сеансе произвольное число раз. Например, для корпоративного геосервиса контекст «Инженерные сети» включает в себя правила отбора разнотипных трубопроводов, проводных и радиокommunikаций и связанную с ними аппаратуру; контекст «Логистика» - правила отбора транспортных систем предприятия, склады и площадки для хранения, упаковки и погрузки продукции. Последовательность контекстов в сеансе образует цепочку

$C^{(m)} = \{c_i^{(m)}\}, C^{(m)} \subseteq C$ , где  $m$  – номер сеанса. Пусть в момент времени  $t_a$  при установленном контексте  $C(t_a)$  имеет место атака на картографический образ аналитика. Необходимо выбрать контекст  $c_{prot} \in C$ , обеспечивающий безопасное продолжение анализа в том же смысловом направлении.

Анализируя постановку задачи, с большой степенью уверенности можно утверждать, что безопасность продолжения анализа обеспечивается заменой текущего контекста любым другим. Это объясняется маловероятным использованием одного и того же источника данных разными контекстами. Поэтому далее рассматривается поиск контекста, сохраняющего смысловое направление анализа.

Будем считать, что смысловая направленность отражается цепочкой контекстов. Тогда, имея набор данных о цепочках для различных сеансов, можно утверждать, что

1) два сеанса  $x$  и  $y$  проводились в одном и том же смысловом направлении, если соответствующие им цепочки эквивалентны:

$$|C^{(x)}| = |C^{(y)}|,$$

$$\forall 0 < a \leq |C^{(x)}| : c_a^{(x)} = c_a^{(y)}.$$

2) два сеанса  $x$  и  $y$  частично проводились в одном и том же смысловом направлении, если

они включают в себя один или несколько эквивалентных фрагментов цепочек:

$$\tilde{c}^{(x)} \subset C^{(x)}, \tilde{c}^{(y)} \subset C^{(y)}, |\tilde{c}^{(x)}| = |\tilde{c}^{(y)}|,$$

$$\forall c_a^{(x)} \in \tilde{c}^{(x)}, c_a^{(y)} \in \tilde{c}^{(y)} : c_a^{(x)} = c_a^{(y)}.$$

Приведенные утверждения позволяют сформулировать следующий алгоритм определения защитного контекста:

- 1)  $c_{prot} = \emptyset$ , считать *ЗаданнойЦепочкой* цепочку текущего сеанса;
- 2) сортировать имеющиеся цепочки контекстов в порядке возрастания частоты встречаемости.
- 3) цикл по списку отсортированных цепочек:
  - 3.1) если *ТекущаяЦепочка* эквивалентна *ЗаданнойЦепочке*, то перейти к п. 5
  - 4) если *ТекущаяЦепочка* частично соответствует смыслу *ЗаданнойЦепочки* И в *ТекущейЦепочке* существует контекст  $c_{next}$ , находящийся после эквивалентного фрагмента цепочки, ТО  $c_{prot} = c_{next}$ .
  - 5) Конец.

Если по окончании работы алгоритма  $c_{prot} = \emptyset$ , это говорит о целесообразности завершения текущего сеанса. В противном случае аналитику будет предложено продолжить работу в новом контексте.

#### Обсуждение предложенного метода

Главной особенностью задачи анализа потока картографических данных состоит в неопределенности цели, для достижения которой создается поток. По этой причине сложно конструировать четкую и определенную модель потока, позволяющую оценивать и управлять его полезностью. Использование данных из логов вызова функций в сеансе позволяет решать данную проблему за счет накопления опыта наблюдения процесса. Современные средства геосервисов позволяют накапливать такие данные. Соответственно, увеличивается возможность снизить неопределенность за счет использования опыта.

Специфика использования потока данных заставляет изучать его в терминах смысла действий пользователя. Предложенные в данной работе формальные определения понятий «смысл» и «смысловое направление» позволили по-новому решать задачу защиты процесса использования потока данных. Категория смысла хотя и не относится к проблематике обработки данных, но должна учитываться при их непосредственном использовании в принятии решений.

Отличительной особенностью рассмотренного метода анализа потока является ориентация на защиту процесса принятия решения. Визуальный анализ картографических изображений сильно влияет на образ ситуации, возникающий в сознании аналитика. Как следствие, дефекты отображения данных порождают уязвимость его ситуационной осведомленности. Поэтому угроза идентифицируется не только свойствами данных, но и возможной реакцией на них пользователя. Специфичность приобретает механизм восстановления процесса анализа. Он не является традиционным «rollback» на предыдущую точку, а предусматривает продвижение в наиболее вероятном смысловом направлении.

#### Заключение

Поток картографических данных, возникающий в процессе решения прикладной задачи

пользователем, оказывает серьезное влияние на качество решения. Необходимость в получении актуальной информации заставляет обращаться к «ненадежным» источникам, данные которых порождают дефекты картографического отображения, но имеют высокую ценность для принятия решений. С одной стороны, это способствует нахождению эффективных и нестандартных решений, с другой – провоцирует искажение представления об анализируемой ситуации при недопустимо высоком уровне дефектов. Результатом может стать неадекватное решение. В данной работе предложен метод анализа потока, позволяющий найти компромисс. Дальнейшим направлением исследования представляется разработка моделей угроз, зависящих от свойств источников данных, методов предварительной оценки последствий атак.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-07-00074 и № 20-01-00197.

### Список литературы

- 1 Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., Rhind D. W. *Geographic Information Systems and Sciences*, 3rd ed., Wiley, 2011.
- 2 ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408-1-2012 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Часть 1. Введение и общая модель.
- 3 Розенберг И.Н. Ситуационный центр как сложная организационно-техническая система // Славянский форум. 2019. № 4. С. 129-138.
- 4 Goodchild M.F. (2007) Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221.
- 5 <https://www.autodesk.com/products/autocad/included-toolsets>
- 6 <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>.
- 7 Alguliyev R., Imamverdiyev Y., Sukhostat L. // *Cyber-physical systems and their security issues, Computers in Industry*. 2018. № 100(9). P. 212-223.
- 8 Ntalampiras S. Automatic identification of integrity attacks in cyber-physical systems // *Expert Systems with Applications*. 2016. №58(10). P. 164-173.
- 9 Lun Y. Z., D’Innocenzo A., Smarra F., Malavolta I., Di Benedetto M. D. State of the art of cyber-physical systems security: an automatic control perspective // *Journal of Systems and Software*. 2016. № 149(3). P. 174-216.
- 10 Ooms K., Andrienko G., Andrienko N., De Maeyer P., Fack V. Analysing the spatial dimension of eye movement data using a visual analytic approach // *Expert Systems with Applications*. 2016. № 39. P 1324–1332.
- 11 A. Dey, G. Abowd (2000). Towards a better understanding of context and context-awareness, CHI 2000 Workshop on the What, Who, Where, When, and How of Context-Awareness, pp. 304–307.
- 12 Berndtsson M., Mellin J. *Active Database Knowledge Model*, Encyclopedia of Database Systems, Liu L., Özsu M.T. (eds). Springer, New York. 2018.
- 13 Kotkov D., Wang S., Veijalainen J. Survey of serendipity in recommender systems // *Knowledge-Based Systems*. 2016. №111(8). P. 180–192.
- 14 Belyakov S.L., Bozhenuyk A.V., Rozenberg I.N. Intuitive Figurative Representation Decision-Making by Map Data // *Journal of Multiple-Valued Logic and Computing*. 2018. № 2-3. P. 165-175.

УДК: 625.17.1

## ОСОБЕННОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ ПО ВЫПРАВКЕ ПУТИ ОДИНОЧНЫМИ ПУТЕВЫМИ МАШИНАМИ

**Коваленко Н. И.** д.т.н., профессор, Российский университет транспорта (МИИТ),  
E-mail: kni50@mail.ru, Москва, Россия

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

**Аннотация.** Считается, что технология выполнения работ одиночными путевыми машинами имеет ресурсосберегающую направленность в виде: сокращения времени технологических окон; экономии энергозатрат за счёт уменьшения количества путевых машин; сокращения трудозатрат как результат такого уменьшения. Для исследования последствий такой технологии работ и качества их выполнения одиночными машинами при производстве планово-предупредительных работ при содержании пути, был выполнен анализ результатов работы машин «Duomatic 09-32 CAT на полигоне северного Казахстана Казахстанской железной дороги. Выбранный полигон примыкает к Западно-Сибирской железной дороге - филиалу ОАО «РЖД», имеющего достаточно близкие природно-климатические условия географического расположения. В результате проведенных исследований установлено, что при реализации таких технологий, в целом наблюдался рост количества неисправностей ГРК, что следует рассматривать как результат некачественного выполнения работ одиночной машиной.

**Ключевые слова:** работа одиночных путевых машин, ресурсосберегающая технология, планово-предупредительные работы, содержание железнодорожного пути, технологическое окно, экономия энергозатрат, сокращение трудозатрат.

## FEATURES OF WORK ON STRAIGHTENING THE PATH BY SINGLE MACHINES

**Kovalenko N.I.** DofSci.(Tech.), Professor, Russian University of Transport (MIIT),  
E-mail: kni50@mail.ru, Moscow, Russia

**Kovalenko N.A.** PhD.(Tech.), Assoc.professor, Russian University of Transport (MIIT),  
E-mail: nina-alex-kov@mail.ru, Moscow, Russia

**Annotation.** It is believed that the technology for performing work with single track machines has a resource-saving focus in the form of: reducing the time of technological windows; saving energy by reducing the number of track machines; reduced labor costs as a result of such a reduction. To study the consequences of such a technology of work and the quality of their performance by single machines in the production of preventive maintenance while maintaining the track, an analysis was made of the results of the operation of Duomatic 09-32 CAT machines at the training ground of northern Kazakhstan of the Kazakhstan Railway. The selected landfill adjoins the West Siberian Railway, a branch of Russian Railways, which has fairly close natural and climatic conditions of geographical location. As a result of the studies, it was found that during the implementation of such technologies,

in general, an increase in the number of failures of the gas distribution system was observed, which should be considered as a result of poor-quality performance of work by a single machine.

**Keywords:** Operation of single track machines, resource-saving technology, preventive maintenance work, maintenance of the railway track, technological window, saving energy costs, reducing labor costs.

### Введение.

При реализации задач программы ОАО «РЖД» по ресурсосбережению [1] достаточно распространенным является выполнение работ с применением одиночных путевых машин для устранения локальных отступлений в содержании верхнего строения пути. Считается, что такой вариант выполнения работ имеет ресурсосберегающую направленность в виде: сокращения времени технологических окон; экономии энергозатрат за счёт уменьшения количества путевых машин; и сокращения трудозатрат как результат такого уменьшения.

С целью исследования качества выполнения работ одиночными машинами при производстве планово-предупредительных операций содержания пути [2, 3], был выполнен анализ результатов работы машин «Duomatic 09-32 CAT». В качестве объекта для проведения исследований был выбран полигон северного Казахстана Казахстанской железной дороги. Выбранный полигон примыкает к Западно-Сибирской железной дороге - филиалу ОАО «РЖД», и имеет достаточно близкие природно-климатические условия географического расположения. На исследуемом участке пути в ноябре месяце 2017 года была выполнена планово-предупредительная выправка одиночной машиной «Duomatic 09-32 CAT» №3094.

По результатам проведенного анализа ведомостей оценки состояния пути формы ПУ-32 за апрель 2018 года на исследуемом отрезке пути после проведенных работ наблюдается большое количество отступлений по уровню, просадке, перекосу и рихтовке (рис. 1). Оценка состояния указанного отрезка пути на май месяц 2018 года составляет 150 баллов.

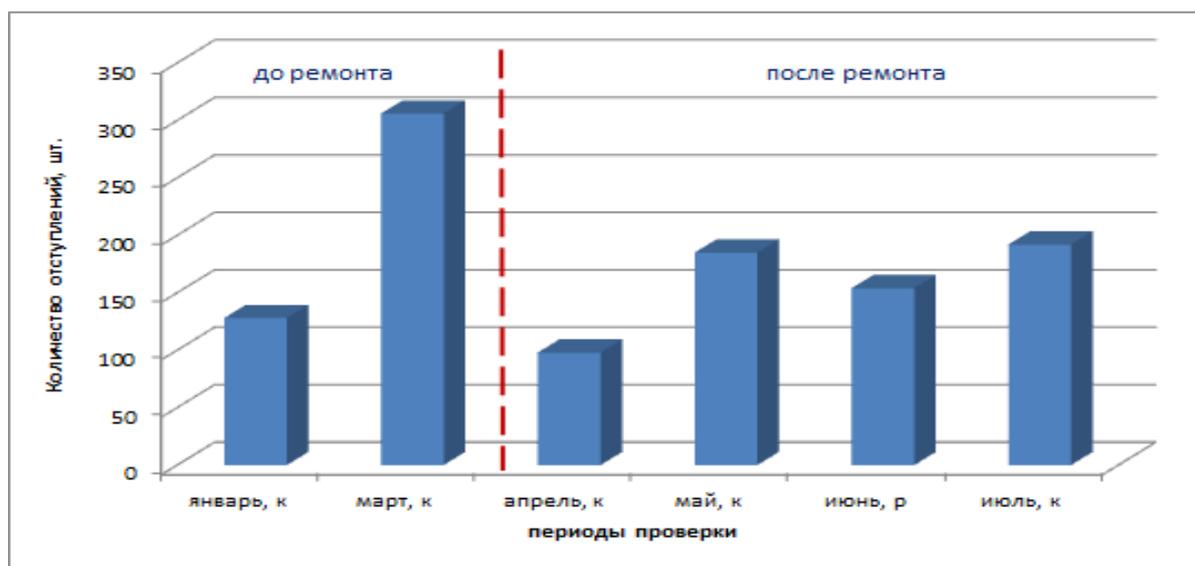


Рисунок 1. Диаграммы динамики развития отступлений геометрии рельсовой колеи (далее, ГРК) до и после проведения ремонта машиной «Duomatic 09-32 CAT» №3094

В соответствии с Инструкцией по текущему содержанию железнодорожного пути, утвержденной МПС России от 01.07.2000 г. № ЦП-774 (редакция от 21.01.2008) (далее - Инструкция ЦП-774), разработанными на её основе уточнениями, введенными распоряжением ОАО «РЖД» от 29 декабря 2012 г. № 2791р (далее - уточнения от 29 декабря 2012 г. № 2791р) и дополнениями, введенными распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября года № 2288р (далее - дополнения от 14 ноября 2016 г. № 2288р), такое состояние пути оценивается как «удовлетворительное» и является недопустимым при надлежащем качестве выполнения ремонта.

В соответствии с «Руководством, по комплексной оценке, состояния участка пути (километра) на основе данных средств диагностики и генеральных осмотров пути», утвержденном распоряжением ОАО «РЖД» №2536р от 14 декабря 2009г. в таблице приведены основные нормативы балльности для оценки состояния рельсовой колеи.

Таблица 1.

Нормативы балльной оценки состояния колеи по показаниям путеизмерительного вагона на участках со скоростью движения поездов более 60 км/час.

Качественная оценка	Количественные критерии качественной оценки				
	На километре			На участке подразделения	
	Количество отступлений по всем параметрам по степеням			Балловая оценка километра	Среднее количество баллов на километре
	II	III	IV		
«Отлично»	До 5	0	0	10	До 25
«Хорошо»	6÷25	0	0	40	25÷80
«Удовлетворительно»	Более 25	0	0	150	80÷180
«Удовлетворительно»	Независимо	1÷6	0	150	80÷180
«Неудовлетворительно»	Независимо	Более 6	0	500	Более 180
«Неудовлетворительно»	Независимо		1 и более	500	Более 180

На выбранном полигоне при исследовании общего количества отступлений до ремонта, по результатам контрольных проверок, за январь 2017 года и за март 2017 года (рисунок 1) установлено следующее.

Выявлено существенное увеличение общего количества отступлений всех оценочных параметров ГРК в марте месяце 2017 года, составляющего порядка 300 баллов, по сравнению с состоянием этих же параметров в январе месяце 2017 года, составляющих порядка 120 баллов (рисунок 1).

Существенное увеличение показателей ГРК в марте месяце 2017 года по сравнению с данными на январь 2017 года связано с общим ухудшением состояния балластной призмы, вызванного климатическими особенностями расположения данного участка железнодорожной линии во время весенней распутицы, которая сопровождается периодом интенсивного таяния снега и, соответственно, ухудшения состояния балластной призмы.

После выполнения ремонтных работ машиной «Duomatic 09-32 CAT» №3094 в ноябре месяце 2017 года, не отмечается какого-либо заметного улучшения показателей ГРК в 2018

году по результатам, как контрольного прохода путеизмерительного вагона, так и по результатам рабочих проверок (рисунок 1).

Более того, следует отметить обратный процесс – тенденцию увеличения общего количества неисправностей.

Увеличение количества неисправностей по результатам контрольного прохода путеизмерительного вагона можно отнести как проявление нестабильности состояния железнодорожного пути и его балластной призмы после производства ремонтных работ. В частности, после выполнения работ машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094 (рисунок 1).

В этой связи, возникла необходимость экспертной оценки эффективности и качества выполненных работ по планово-предупредительной выправке пути исследуемой машиной за истекший период 2017-2018 года на основании данных путеизмерительного вагона.

Методика оценки качества работы машин «*Duomatic 09-32 CAT*» заключается в сравнении количества отступлений от норм содержания геометрии рельсовой колеи (за исключением ширины колеи) и приращений значения скользящего среднестатистического состояния рельсовой колеи (далее, ССКО) от одного прохода путеизмерительного вагона к другому за периоды до и после работы машин. При рассмотрении общего количества неисправностей, выявленных в период стабильного состояния балластной призмы в зимних условиях с общим количеством отступлений зафиксированных после выполнения ремонта машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094, исследованиями не отмечается существенного общего уменьшения неисправностей как результата выполнения ремонтных работ.

Следующий этап сопоставительного анализа результатов контрольных проверок в мае месяце 2018 года (рисунок 1) и рабочих проверок путеизмерительного вагона в июне месяце 2018 года и в июле месяце 2018 года показал тенденцию роста общего количества неисправностей состояния ГРК по результатам рабочих проверок следует рассматривать как результат некачественного выполнения работ, в данном случае, машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094.

Основанием для такого вывода является сопоставление общего количества неисправностей ГРК, зависящих от состояния балластной призмы, по результатам зимнего контрольного прохода путеизмерительного вагона с общим количеством неисправностей, зависящих от состояния балластной призмы, по результатам летних проходов путеизмерительного вагона в июне месяце (рисунок 1) и июле месяце.

Аргументом, подтверждающим низкое качество производства работ, например, машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094, являются материалы рисунка 1, которые следует рассматривать со следующих позиций:

Во-первых, оценка процесса роста общего количества неисправностей «до ремонта» - в марте месяце 2017 года следует рассматривать как процесс естественного ухудшения состояния балластной призмы, вызванного весенней распутицей, и не связанного с ростом предотказного состояния ГРК, предполагающего его техногенный характер.

Во-вторых, оценка динамики процесса изменения количества отступлений положения ГРК «после проведения ремонта» - в частности, уменьшение количества отступлений положения ГРК в апреле месяце вызвано климатологическими факторами в виде существенного улучшения природных параметров улучшения состояния балластного слоя после распутицы, то есть в результате высыхания балластной призмы. Положительному эффекту уменьшения количества отступлений положения ГРК способствовал и факт производства ремонтных работ

машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094 в этот же период времени.

В-третьих, рост общего количества отступлений положения ГРК в мае месяце вызван последствиями периода обкатки пути после ремонта.

В-четвертых, дальнейший рост количества отступлений положения ГРК в июне и июле месяцах следует рассматривать как результат некачественного выполнения работ машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094.

В-пятых, комплексной технологической экспертизой завода-изготовителя путевых машин компании «PLASSER&THEURER» (Австрия) установлено, что подбивочные блоки германско-российского производства компании «EdelserviceGmbH» для машин «*Duomatic 09-32 CAT*» находятся в технически неисправном состоянии, их дальнейшая эксплуатация без проведения капитального ремонта невозможна. Кроме того, значительная часть деталей и комплектующих блока являются бывшими в употреблении.

Результатом выявленного неудовлетворительного состояния пути по оценочным показателям ГРК, стало крушение пассажирского поезда «Байтерек», сообщением Астана-Алматы на перегоне Шыганак-Шу 1 500 км, 2 пикет, произошедшее 17 июня 2018 года около 13 час. 25 мин. в Жамбынской области. В результате крушения пострадали 22 человека и погиб 12 летний ребенок.

На участке крушения поезда в течение 15.10.2017 года, по имеющимся данным в отчете Шуйской механизированной дистанции пути «О работе путевых машин за 2017 год», проводила выправку пути путевая машина «*Duomatic 09-32 CAT*» с регистрационным номером 3094 после работы щебнеочистительной путевой машины.

Общее заключение по оценке выполнения работ машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094:

а) Увеличение количества неисправностей по результатам контрольного прохода путеизмерительного вагона «после выполнения ремонта» (рисунок 1) можно отнести как результат нестабильного состояния железнодорожного пути и его балластной призмы после производства ремонтных работ машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094.

б) Рост количества неисправностей ГРК, в целом, следует рассматривать как результат некачественного выполнения работ машиной «*Duomatic 09-32 CAT*» №3094 на рассмотренном полигоне.

В соответствии с Правилами и технологией выполнения основных работ при текущем содержании пути, утвержденных МПС РФ 30 июня 1997 № ЦПТ-52 (далее - ЦПТ-52), разработанными на их основе Техническими условиями на работы по реконструкции (модернизации) и ремонту железнодорожного пути, утвержденными распоряжением ОАО «РЖД» от 18 января 2013 года № 75р (далее - ТУ от 18.01.2013) и их изменениями и дополнениями согласно распоряжения ОАО «РЖД» от 19 января 2018 года №101р (далее - распоряжение 101р от 19.01.2018) установлены определённые технологические схемы производства путевых работ.

В частности, при производстве планово-предупредительной выправки пути используется, как правило, комплекс путевых машин, таких как ДУОМАТИК, динамический стабилизатор, планировщик балласта и других (рисунок 2). Их технологическая последовательность и условия применения определяются состоянием пути до ремонта по результатам мониторинга и результатами, которые определяются поставленными задачами [2, 3]. Немаловажную роль в выборе той или иной технологии играют технико-экономические показатели выполняемого комплекса работ [4, 5].



Рисунок 2. Пример современного технологического комплекса планово-предупредительной выправки бесстыкового пути, где:

- 1 – восстановление рельсовых плетей (сварка) с применением передвижной рельсосварочной машины (далее, ПРСМ-6) при необходимости;
- 2 – затяжка и смазка элементов промежуточных рельсовых скреплений (ПМГ-1М), замена негодных элементов, удаление регулировочных прокладок;
- 3 – локальная балластировка пути хоппер-дозаторными вагонами ВПМ-770 с локомотивом (на рисунке обозначен как лок.);
- 4 – выправка пути и машиной ДУОМАТИК и стабилизация машиной ДСП-С;
- 5 – планировка балластной призмы машиной ПБ-01;
- 6 – шлифовка рельсов рельсошлифовальным поездом РШП-48.

Критериями назначения выправки пути служат: отклонения от норм (номинальных значений) рельсовых нитей по уровню, местным просадкам, отводам возвышения наружных нитей в местах сопряжения прямых с кривыми, а также неплотное прилегание рельса к подкладкам или шпал к балластной постели и другие параметры (рисунок 3).

После выправки пути (машиной ДУОМАТИК) необходимо восстановить очертания балластной призмы с пополнением шпальных ящиков. При подъёмке пути до 30 мм предварительно выгрузить балласт не требуется, так как шпальные ящики после выправки будут заполнены балластом не менее чем на две трети.

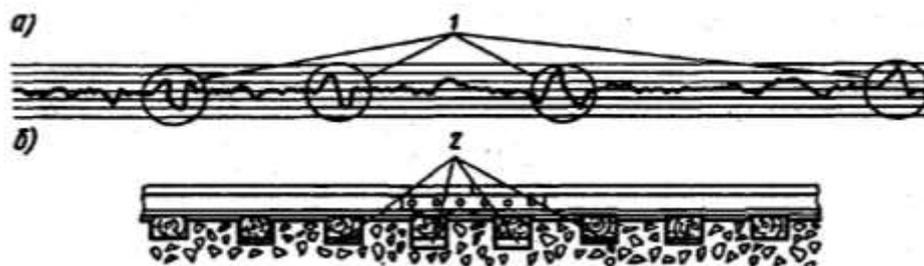


Рисунок 3. Признаки необходимости проведения выборочной (неотложной или первоочередной) выправки пути, где: а) - фрагмент записи перекосов III степени из путеизмерительной ленты; б) - продольный разрез пути (по торцам шпал) в зоне стыка; 1 - просадки и перекосы II и III степени; 2 - пустоты под шпалами.

Если предусматриваются подъемки больше 30 мм, перед подбивкой производится выгрузка балласта на концы шпал с последующим его перемещением в середину колеи вручную или с помощью планировщика (ПБ-01), а после выправки дополнительная выгрузка балласта (ВПМ-770) с восстановлением очертаний призмы и пополнением шпальных ящиков. Такая технология является обязательной при выправке бесстыкового пути для обеспечения его устойчивости. Динамический стабилизатор (ДСП-С) пропускается только после восстановления очертаний балластной призмы и заполнения шпальных ящиков [6, 7].

При соблюдении технических и технологических требования на выполнение планово-предупредительной выправки пути в соответствии с ТУ от 18.01.2013 и распоряжением 101р от 19.01.2018 на выполнение планово-предупредительного ремонта пути, при соблюдении требования необходимости его выполнения машинным способом по методу фиксированных точек или с применением автоматизированных выправочных систем, будет достигнута цель по восстановлению равноупругости подшпального основания и уменьшению степени неравномерности отступлений в положении рельсовых нитей по уровню и в плане, а также просадок пути.

При этом должно быть обеспечена оценка состояния ситуации по оппозиционным признакам: штатная - не штатная ситуация [8], например, совпадение начал переходных и круговых кривых по возвышению и положению пути в плане, соблюдение норм уклонов отвода возвышения и так далее.

### Список литературы

1. Энергосбережение на железнодорожном транспорте. Под редакцией Гапановича В.А. Учебник – М.: Издательский дом МИСиС, 2012.– 620 с.
2. Коваленко Н.И., Гринь Е.Н. Технология предотвращает угрозу// Мир транспорта. 2011. № 5. С. 138-142.
3. Коваленко Н.И., Гринь Е.Н. Факторный анализ оценки состояния пути // Путь и путевое хозяйство №1, 2013 г., С. 22-23.
4. Волков Б.А., Коваленко Н.И., Добрин А.Ю., Коваленко А.Н. О методике планирования расходов на текущую эксплуатацию пути // Путь и путевое хозяйство, №5, 2018, С. 23-26.
5. 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.
6. Локтев Д.А., Быков Ю.А., Коваленко Н.И. Использование метода анализа размытия изображения для определения внешних дефектов железнодорожного пути // Наука и техника транспорта. №1. 2016. – С. 42 – 49.
7. Сычев В.П., Виноградов В.В., Быков Ю.А., Коваленко Н.И. Об автоматизированной технологии текущего содержания железнодорожного пути // Вестник МГСУ. №3. 2016. – С. 84-93.
8. Tsvetkov V. Ya. Opposition information analysis // European Journal of Technology and Design. – 2014. - Vol. (6), № 4, pp189-196.