

На правах рукописи

Ван

ВАН ЖУНЬЧЖОУ

**МЕТОДЫ РАЗРАБОТКИ АРХИТЕКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ
ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ В КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ
РЕСПУБЛИКЕ**

Специальность 2.9.8. – Интеллектуальные транспортные системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону - 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Донской государственный технический университет».

Научный руководитель -	Зырянов Владимир Васильевич доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Жанказиев Султан Владимирович доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Организация и безопасность движения, интеллектуальные транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» Кущенко Лилия Евгеньевна доктор технических наук, доцент, профессор кафедры эксплуатации и организации движения автотранспорта, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный университет им. В.Г. Шухова»
Ведущая организация -	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Защита диссертации состоится «17» октября 2025 г. в 11:00 час. на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.138.02 на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, ауд. 426.

С диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и в фундаментальной библиотеке по адресу: 302028, г. Орел, пл. Каменская, д. 1.

Автореферат разослан «__» ____ 2025 г. Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ им. И.С. Тургенева» (<http://oreluniver.ru>) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (www.vak.minobrnauki.gov.ru).

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, в двух экземплярах направлять в диссертационный совет 99.2.138.02 по адресу: 302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77, тел.: + 79208120727, e-mail: maxim.ka@mail.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Кулев М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Увеличение количества заторов на дорогах, сложности с обеспечением мобильности и рост числа дорожно-транспортных происшествий оказывают существенное влияние на социально-экономическое состояние современного общества, негативным образом сказываются на повседневной жизни людей. В настоящее время одним из самых перспективных способов решения транспортных проблем является внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Одним из приоритетных условий при создании ИТС является разработка архитектуры для системной реализации функций и процессов до того, как приступают к проектированию и строительству ИТС. Архитектура ИТС позволяет устраниить такие типичные ситуации, когда внедряются отдельные невзаимосвязанные элементы ИТС.

Однако и научные исследования и практика обычно рассматривают архитектуру ИТС изолированно от общего процесса развития ИТС. Фактически как российский, так и китайский опыт показывают, что ИТС создаются практически на директивной основе, когда жестко указывается какие компоненты и подсистемы должны внедряться. Недооценка важности качественной архитектуры ИТС является достаточно распространенной ошибкой, когда без проработки архитектуры приступают к этапам проектирования и реализации. На 16-ом Всемирном конгрессе по интеллектуальным транспортным проблемам приводилась информация, что проектные показатели достигаются только по 32% ИТС, частично достигаются в 44% проектов и не достигаются в 24% проектов.

Актуальность архитектуры ИТС возрастает синхронно с увеличением количества различных приложений и функциональных направлений в транспортно-дорожном комплексе, умных городах и в повседневной жизни людей. Поэтому сохранение подхода к архитектуре как к некоторой детализированной типичной структуре не обеспечит ожидаемую эффективность. Акцент должен делаться не только на компонентах и технических средствах ИТС, но главным образом на потоках данных, которыми должны обмениваться эти компоненты как между собой, а также с внешней средой до уровня индивидуальных пользователей.

Китайская программа «Строительство транспортной державы» предусматривает активное развитие интеллектуальных транспортных систем, стимулирование интеграции новых технологий, таких как большие данные, интернет, искусственный интеллект и блокчейн, с транспортной отраслью. В настоящее время в крупных городах, таких как Пекин, Шанхай и Гуанчжоу, построены передовые интеллектуальные транспортные системы. С развитием технологий интеллектуальные транспортные системы будут становиться всё более популярными, особенно в городах второго и третьего уровней, где население обычно составляет от 5 до 10 миллионов человек. Существует неоспоримая актуальность исследования и разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем в современном контексте городского планирования и управления.

Степень разработанности темы исследования.

Научным и практическим разработкам по интеллектуальным транспортным системам и организации дорожного движения в России, Китае и других странах, а также снижению аварийности и заторовых ситуаций на улично-дорожной сети посвящены труды таких ученых, как Агуреев И.Е., Власов В.М., Донченко В.В., Дорохин С.В., Душкин Р.В., Евстигнеев И.А., Евтуков С.А., Евтуков С.С., Ерёмин С.В., Жанказиев С.В., Зырянов В.В., Клявин В.Э., Новиков А.Н., Новиков И.А., Пугачев И.Н., Сильянов В.В., Трофименко Ю.В., Шевцова А.Г., Ван С., Ван Ч., Лю Д., Лю Х., Мэн Т., Чжан К., Чжан Ц., Ци Т., Цюй Д., Барсело Х., Даганзо К., Махмассани Х. и другие, результаты которых были использованы при выполнении исследований.

Научные исследования и практические разработки в области ИТС в Китае и за рубежом в основном фокусируются на отдельных сервисах и функциях, таких как управление дорожным движением, обработка данных, оптимизация маршрутов и т.д. Однако, не в полной мере учитывается системный подход к разработке архитектуры ИТС, в соответствии с которым компоненты должны предоставлять сервисы, необходимые конечным пользователям, последовательным и согласованным образом.

Цель диссертационной работы: развитие методов разработки архитектуры ИТС как инструмента управления процессом создания интеллектуальной транспортной системы.

Задачи исследования:

- анализ существующих подходов к разработке архитектуры интеллектуальных транспортных систем с выделением классификационных признаков как на уровне межгосударственной, национальной архитектур ИТС, так и на уровне основных методов разработки архитектуры ИТС; научно-технической литературы по данной проблеме в различных странах и существующих методов разработки архитектуры ИТС;

- обоснование методов разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем и их применения в КНР;

- разработка архитектуры ИТС, которая обеспечивает взаимодействие и синергию между различными транспортными элементами – транспортными средствами, инфраструктурой и информационными системами для повышения безопасности, управляемости транспортных потоков;

- создание физической архитектуры платформы кооперативной ИТС (К-ИТС) управления интеллектуальными тоннелями и валидации К-ИТС на основе моделирования в различных сценариях.

Объект исследования:

Архитектура интеллектуальных транспортных систем.

Предмет исследования:

Методы разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем.

Рабочая гипотеза:

Использование метода разработки процессно-ориентированной архитектуры для создания архитектуры К-ИТС на основе национальной архитектуры ИТС может повысить эффективность ИТС.

Научная новизна исследования:

- определены новое содержание и последовательность создания архитектуры ИТС по функциональным признакам сложности разработки, модульности физической архитектуры, требованиям моделирования логической архитектуры, условиям обслуживания и обновления, методам анализа потоков данных;

- разработан алгоритм разработки логической и физической архитектур ИТС, адаптированный к практике КНР, дополненный совокупностью приложений, использованием больших данных для новых сервисов и обратными связями между приложениями и сервисами;

- предложены методические рекомендации по созданию архитектуры кооперативных интеллектуальных транспортных систем (К-ИТС) в контексте национальной архитектуры ИТС Китая с использованием процессно-ориентированного метода с описанием иерархии логических функций и диаграммы потоков данных функциональных доменов платформы К-ИТС;

- определены параметры выбора маршрута на уровне микромоделирования в зависимости от доли подключенных автомобилей в диапазоне от 20 до 80%, определяющие вероятность выбора следования по назначенному маршруту, обеспечивающему снижение времени поездки.

Теоретическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы заключается в развитии алгоритмов, методов и моделей создания архитектуры ИТС обеспечивающих системную реализацию функций и процессов ИТС.

Практическая значимость работы:

Практическая значимость работы заключается в формировании архитектуры для разработки кооперативных интеллектуальных транспортных систем по управлению дорожным движением. Полученные результаты имеют прикладной характер и используются для решения практических задач управления дорожным движением в КНР.

Методы исследования:

Диссертационная работа выполнена на основе результатов научных исследований, трудов ведущих ученых России, КНР и других стран в области интеллектуальных транспортных систем.

Положения, выносимые на защиту:

- классификация методов разработки архитектуры ИТС, включающая характеристики анализа сервисов ИТС, сложности моделирования архитектуры, модульности, условий обновления;

- алгоритмы разработки архитектуры логической и физической архитектур ИТС, адаптированные к практике КНР, включающие условия разработки региональной архитектуры в соответствии реалиями конкретных регионов, обеспечивая при этом их согласованность и интеграцию в общенациональную систему ИТС;

- логическая архитектура кооперативной ИТС на основе национальной архитектуры ИТС Китая с диаграммой потоков данных функционального домена и физическая архитектура платформы К-ИТС

управления интеллектуальными тоннелями.

- параметры выбора маршрута на уровне микромоделирования определяющие вероятность выбора следования по назначенному маршруту в зависимости от доли подключенных автомобилей.

Степень достоверности и апробация результатов.

Обоснованность и достоверность выносимых на защиту научных результатов обеспечиваются применением методики исследования на основе апробации результатов исследования на международных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-практических конференциях: VII Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте» (г. Орел, 2021); Всероссийская (национальная) научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки и техники. 2021» (г. Ростов-на-Дону, 2021); IX Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте» , (г. Орел, 2023); International conference «Smart technologies for society, government, economy» (г. Ростов-на-Дону, 2023); Международном научном форуме «Наука и инновации - современные концепции» (г. Москва, 2023); IV Международная конференция «Устойчивое и инновационное развитие в цифровом глобальном пространстве» (г. Ростов-на-Дону, 2024); X Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и инновации на транспорте» (г. Орел, 2024); Международная научно-практическая конференции «Интеллектуальные транспортные системы в дорожном комплексе» (ИТС-2024) (г. Ростов-на-Дону, 2024 г.)

Информационная база исследования.

В качестве эмпирической и информативной базы исследования использованы статистические данные, характеризующие состояние развития ИТС в КНР и за рубежом, материалы технических изданий и периодической печати, методы системного и сравнительного анализа, статистических группировок, анализ первичной документации, статистической отчетности.

Личный вклад автора.

Автором сформулированы цели и задачи работы, определены и осуществлены направления теоретических исследований. Все основные результаты исследования и варианты разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем получены автором самостоятельно.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Выполненные исследования отвечают формуле паспорта научной специальности 2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы: пункт 2. Разработка методов анализа и синтеза интеллектуальных транспортных систем, их архитектуры, алгоритмов создания, функционирования, диагностирования, восстановления работоспособности; пункт 12. Нормативное регулирование разработки и реализации интеллектуальных транспортных систем.

Публикации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8 научных работах, в том числе три в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных

ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, одна, входящая в международную реферативную базу Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, основных результатов и выводов, двух приложений, содержит 170 страниц, 11 таблиц, 35 рисунков. Библиографический список включает 102 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, излагаются цели исследования, научная новизна и практическая ценность, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Анализ развития и внедрения интеллектуальных транспортных систем» проводится анализ развития интеллектуальных транспортных систем (ИТС) на международном и национальном уровнях, с акцентом на рассмотрение основных концепций и архитектурных подходов, принятых в различных странах, включая Китай.

Детально рассматривается история развития ИТС, начиная с первых попыток автоматизации и сбора данных о дорожном движении до современных систем, которые интегрируют передовые технологии, такие как искусственный интеллект, большие данные и облачные вычисления. Особое внимание уделяется эволюции технологий, которые позволили перейти от простого мониторинга и управления транспортными потоками к более сложным системам принятия решений, способным адаптироваться к изменяющимся условиям в реальном времени.

Анализируются различные модели и архитектуры ИТС, применяемые в мире. Приводятся примеры из Европы, Северной Америки и Азии, где каждый регион разработал уникальные подходы, соответствующие местным культурным, экономическим и технологическим особенностям. Особое внимание уделяется китайской национальной архитектуре ИТС, которая разрабатывается с целью не только улучшения дорожной безопасности и снижения заторов, но и поддержки устойчивого развития городских агломераций.

Формулируются основные проблемы и вызовы, стоящие перед разработчиками и эксплуатантами ИТС, включая вопросы интеграции, стандартизации, защиты данных и обеспечения приватности. Обсуждается необходимость международного сотрудничества в области разработки общих технических стандартов и обмена лучшими практиками.

Эта глава задает тон всей диссертационной работе, подчеркивая важность комплексного подхода к разработке ИТС, который учитывает как технологические, так и социально-экономические аспекты.

Во второй главе «Обзор методов построения архитектур интеллектуальных транспортных систем» проведен теоретический анализ методов разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем. Основное внимание уделяется необходимости выбора оптимального подхода к

проектированию в контексте быстро меняющихся технологических и социальных условий. Исследуются и сравниваются основные методики, а также их применимость в различных операционных средах. В таблице 1 показана разработанная автором классификация методов разработки архитектуры ИТС:

Таблица 1 – Классификация методов разработки архитектуры ИТС

Факторы	Процессно-ориентированный метод	Объектно-ориентированный метод	Сравнение
Метод анализа	Сервисы ИТС анализируются с точки зрения функциональных процессов, и считается, что ИТС завершается комбинацией функций.	При анализе с точки зрения объектов, участвующих в ИТС, считается, что системы ИТС состоят из объектов и связей между ними.	Первый вариант подходит для задач в области обработки данных, где состав системы рассматривается как совокупность процессов или функций, работающих с данными; второй вариант больше соответствует человеческому пониманию мира, где системы рассматриваются как совокупности взаимодействующих, но независимых друг от друга объектов.
Обновление и обслуживание	При модификации или добавлении новых сервисов необходимо еще раз пройти этапы разработки архитектуры, которая должна быть интегрирована с существующим содержанием.	При изменении или добавлении сервиса необходимо найти соответствующий класс объекта и т.д. и изменить его содержимое.	При первом обновлении необходимо задействовать всю структуру содержания обновления, что легко пропустить; при втором - для соответствующего класса объектов необходимо изменить соответствующее содержание; в отличие от этого, второй вариант имеет очевидные преимущества.
Сложность моделирования логической архитектуры	Представление его логических функциональных элементов и связей между ними, в основном с помощью диаграмм потоков данных.	Для наглядного описания логических архитектурных элементов необходимы объектная, динамическая и функциональная модели.	Первый вариант более прост и соответствует лишь функциональной модели одной из моделей второго варианта; логическое моделирование второго варианта относительно сложно.
Сложность модульности физической архитектуры	Требование меньшего анализа и разграничения функций логической архитектуры.	Анализируются логические функциональные элементы, соответствующие каждому пользовательскому сервису, что представляет собой большой объем анализа.	Модульность логических функциональных элементов требует многостороннего анализа физической реализации каждого логического функционального элемента; второй вариант более требователен с точки зрения объема работы.

В рамках процессно-ориентированного подхода основное внимание уделяется логике и последовательности процессов, что позволяет обеспечить чёткую структуризацию и оптимизацию процессов ИТС. Рассмотрены ключевые аспекты такого подхода, включая моделирование процессов, анализ потоков данных. На рис. 1 показана диаграмма уровней взаимосвязи потоков данных логической архитектуры ИТС (Функциональные домены - 1, 2, 3 ...; системные функции - 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, ...; функции – 1.1.1, 1.1.2, 1.2.1, 2.1.1, 2.2.1, 3.1.1, 3.1.2, ...).

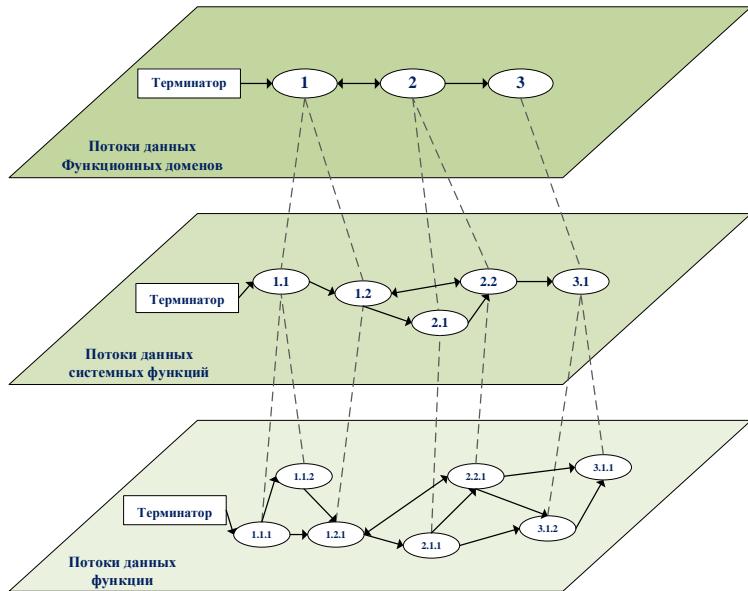


Рис. 1 – Диаграмма уровней взаимосвязи потоков данных логической архитектуры ИТС

На рис. 2 показано преобразование логических функциональных элементов ИТС в физические элементы систем.

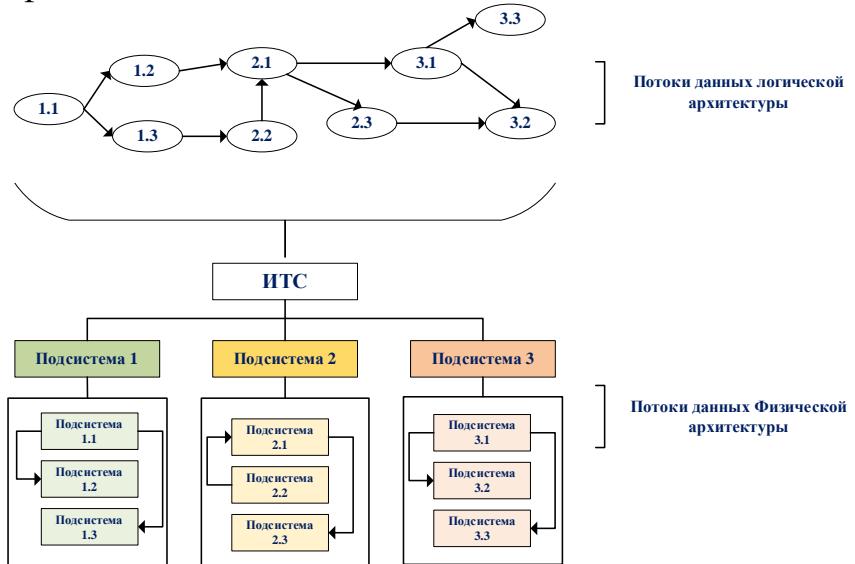


Рис. 2 – Преобразование логических функциональных элементов ИТС в физические элементы систем

Показаны преимущества использования процессно-ориентированного подхода, такие как повышение гибкости и масштабируемости систем, улучшение управления рисками и безопасности данных. Однако, также указываются и

ограничения, включая сложности адаптации стандартных процессов в условиях, требующих высокой степени индивидуализации и адаптивности. Приводятся конкретные примеры из практики, демонстрирующие успешное применение процессно-ориентированного подхода в реальных условиях эксплуатации интеллектуальных транспортных систем.

Заключительная часть главы посвящена алгоритму разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем, учитывающего специфику КНР. На рис. 3 показан алгоритм разработки архитектуры ИТС, адаптированный к практике КНР:

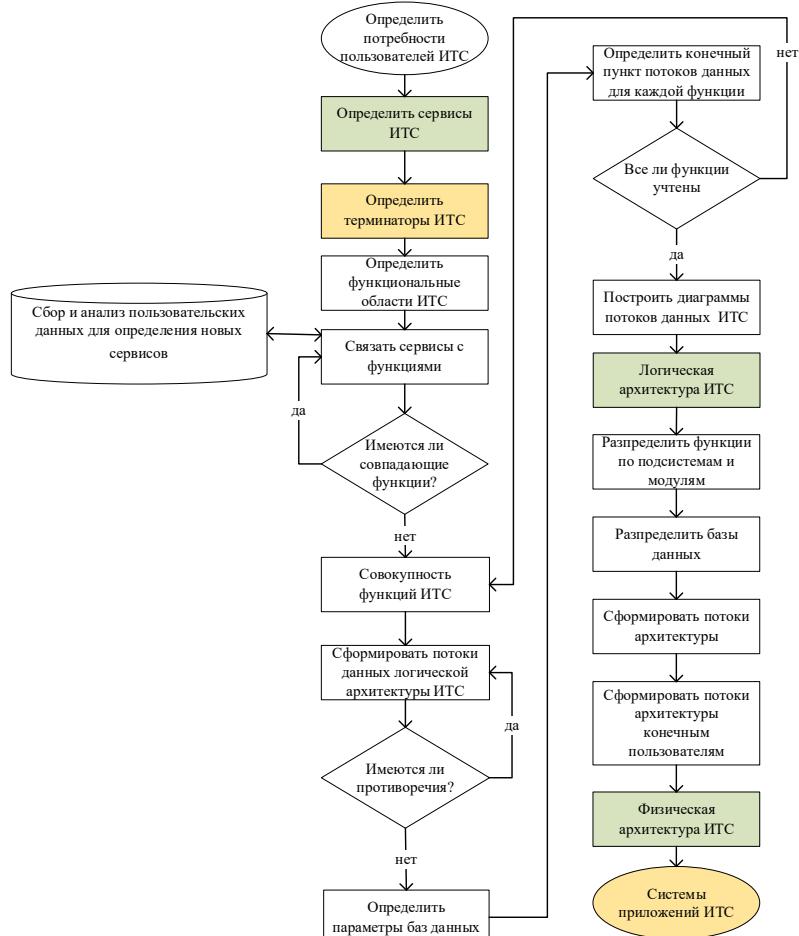


Рис. 3 – Алгоритм разработки архитектуры ИТС, адаптированный к практике КНР
(Авторская разработка)

В третьей главе «Разработка региональной архитектуры интеллектуальных транспортных систем» приведены теоретические положения региональной архитектуры ИТС. Концепция региональной архитектуры интеллектуальных транспортных систем (ИТС) важна для развития и интеграции современных транспортных решений на муниципальном и региональном уровнях.

Одним из основных аспектов разработки региональной архитектуры ИТС является её взаимосвязь с национальной архитектурой. Согласованность между национальной и региональной архитектурами обеспечивает единообразие и совместимость систем, что важно для обеспечения бесперебойного взаимодействия и обмена данными между различными регионами и системами.

Это также способствует более эффективному использованию инвестиций в ИТС, поскольку региональные проекты могут опираться на уже разработанные и апробированные технологии и подходы.

В этой главе рассматриваются два основных метода разработки региональной архитектуры, которые помогают адаптировать национальные стандарты к реалиям конкретных регионов, обеспечивая при этом их согласованность и интеграцию в общенациональную систему ИТС.

Первый подход основан на использовании уже существующих элементов национальной архитектуры ИТС, адаптируя их к специфическим региональным потребностям. Этот метод часто применяется, когда национальная архитектура достаточно развита и предоставляет широкий спектр решений, которые могут быть эффективно интегрированы в региональные проекты без значительных изменений. Основное преимущество такого подхода заключается в экономии времени и ресурсов на разработку, поскольку большая часть инфраструктурных и технологических решений уже проработана и опробована в других регионах. Однако это также может ограничить возможности для инноваций и адаптации к уникальным местным условиям.

Второй подход предполагает более глубокую разработку с начальной стадии, что актуально для случаев, когда существующие национальные решения не удовлетворяют уникальным требованиям региона или когда национальная архитектура не полностью разработана. Этот метод требует значительных усилий по исследованию и разработке, включая сбор данных, анализ потребностей пользователей, проектирование логических и физических структур архитектуры, а также создание индивидуализированных прикладных решений. Преимуществом является возможность создания гибкой и адаптированной к местным условиям системы, способной максимально эффективно решать специфические задачи.

В четвертой главе «Моделирование разработки архитектуры кооперативных интеллектуальных транспортных систем» К-ИТС представлена как фундаментальная основа для современных интеллектуальных транспортных систем, способных адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям эксплуатации.

Разработка архитектуры кооперативных интеллектуальных транспортных систем (К-ИТС) в Китае основывается на использовании процессно-ориентированного подхода, который позволяет детально анализировать и интегрировать различные компоненты системы для достижения оптимальной функциональности и взаимодействия. Этот подход подчёркивает важность чёткого определения и последовательного выполнения процессов, которые включают сбор данных, их обработку, обмен информацией и управление в рамках одной интегрированной системы. В ходе диссертационной работы китайская национальная архитектура ИТС была адаптирована для создания современной и эффективной архитектуры К-ИТС.

Процессно-ориентированный подход в разработке К-ИТС обеспечивает точное моделирование логической архитектуры кооперативных интеллектуальных транспортных систем, что критически важно для определения

требований к каждому аспекту системы и для обеспечения их взаимодействия в реальном времени. Диаграмма уровней взаимосвязи потоков данных логической архитектуры платформы К-ИТС показана на рис. 4 (системные функции - 1, 2, 3 ...; функции – 1.1, 1.2, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2 ...):

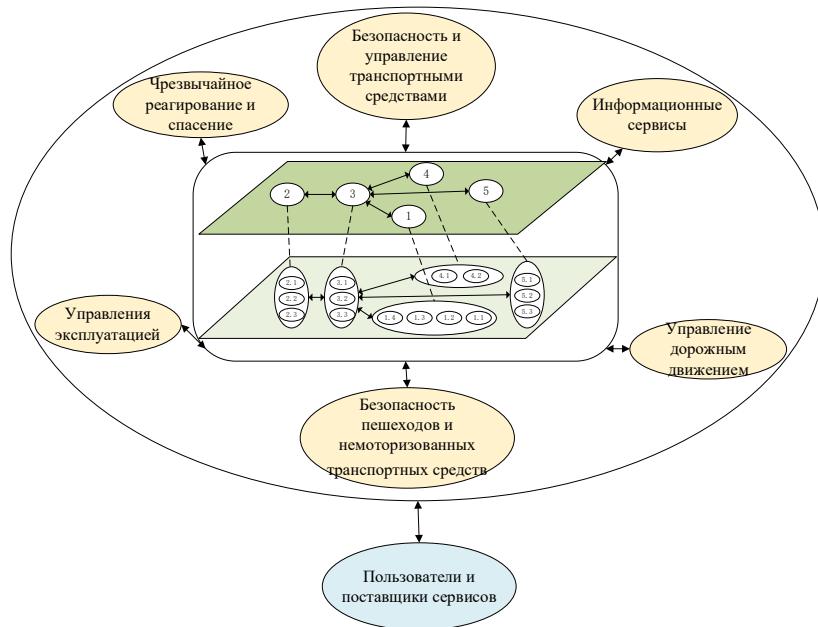


Рис. 4 – Диаграмма уровней взаимосвязи потоков данных логической архитектуры платформы К-ИТС (Авторская разработка, ссылка на табл. 4.2)

Разработанная диаграмма потоков данных функционального домена платформы К-ИТС показана на рис. 5.

Сценарии использования и реализации К-ИТС:

- внедрение К-ИТС на уровне города, где система может управлять всеми аспектами дорожного движения, от мониторинга состояния транспортных средств и дорожных условий до реализации автоматических решений в случае возникновения чрезвычайных ситуаций. Это включает в себя использование передовых алгоритмов для анализа данных о транспортных потоках и предоставление рекомендаций по оптимизации потоков в режиме реального времени.

- разработка и применение стандартов и протоколов в К-ИТС необходимы для обеспечения совместимости и взаимодействия между различными системами и устройствами, что является основой для создания открытой и масштабируемой транспортной системы. Это позволяет различным поставщикам технологий и услуг интегрировать свои решения в единую экосистему К-ИТС.

Также разработана платформа кооперативных интеллектуальных автомагистралей включая тоннели как наиболее важный элемент. Тоннели на автострадах играют важную роль в улучшении линейности маршрутов и сокращении расстояния поездки. Однако, из-за структуры тоннели создают условия, близкие к закрытым пространствам. Это может привести к авариям из-за внезапных изменений визуальных условий, что часто вызывает дорожные

происшествия, включая цепочные столкновения.

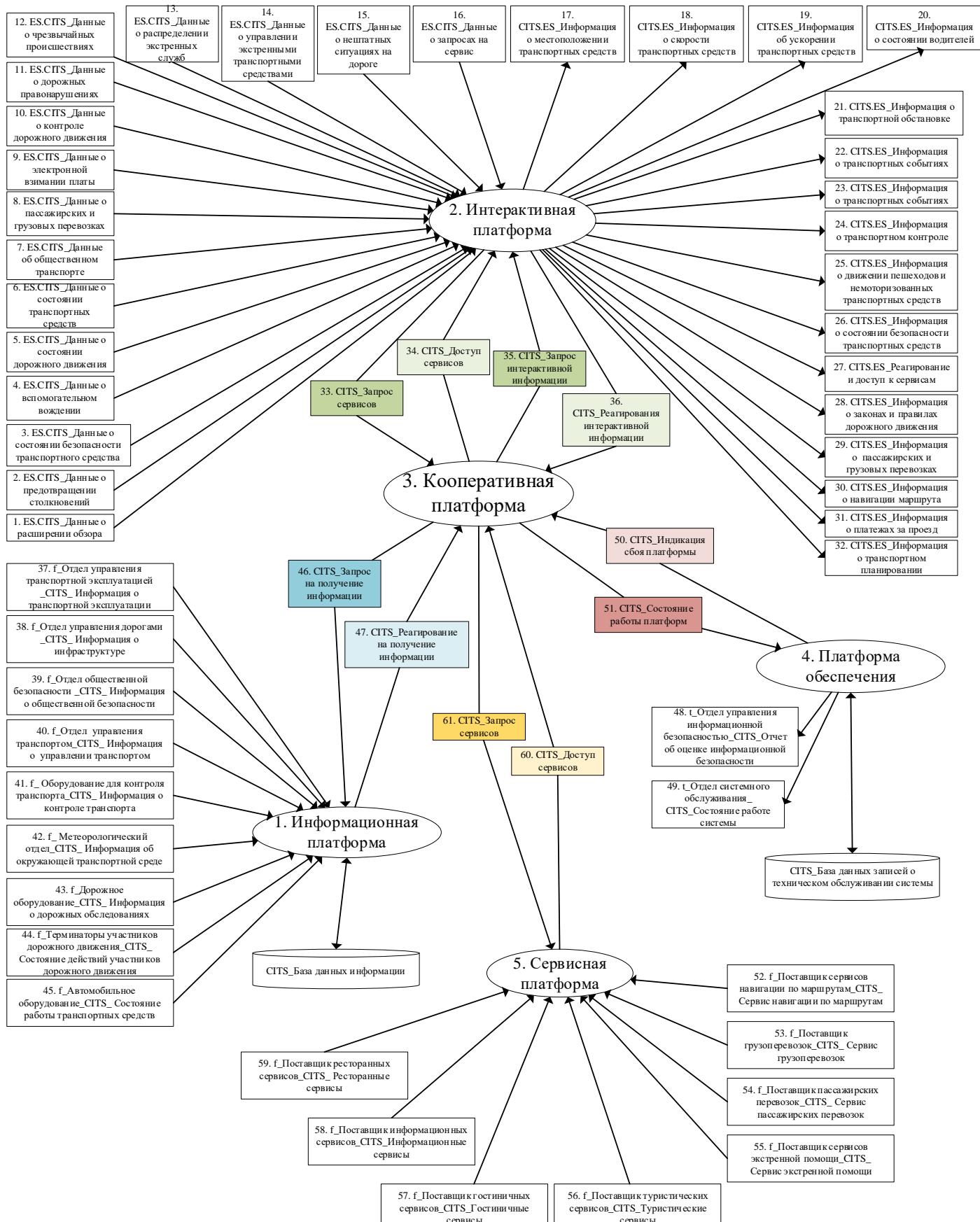


Рис. 5 – Диаграмма потоков данных функционального домена платформы кооперативных интеллектуальных транспортных систем (Авторская разработка)

Это достаточно актуально для провинции Шаньси территория которой характеризуется сложным рельефом, включая горы, холмы, плато и впадины, причем горные и холмистые районы составляют более двух третей общей площади, большинство из которых находятся на высоте от 1000 до 2000 метров. Специфическая географическая среда Шаньси обусловила большое количество туннелей на её автомагистралях. Для разработки архитектуры К-ИТС для тоннелей необходимо учесть следующие группы потребностей пользователей:

- сбор и обработка данных включая данные подключенных и автономных автомобилей, интеграция и управление данными, устранение информационных барьеров между различными системами для реализации обмена данными;

- управление дорожным движением в реальном режиме времени как в централизованном, так и в децентрализованном режимах в соответствии с интенсивностью движения, внешним освещением и погодными условиями с использованием интеллектуальных алгоритмов для обеспечения безопасности движения, интеграция функций различных систем в единый пользовательский интерфейс для удобства централизованного контроля и управления;

- информационное обеспечение водителей о ситуации в тоннелях и на подходах к ним, маршрутное ориентирование в реальном режиме времени, управление оборудованием в чрезвычайных ситуациях с помощью системы экстренного реагирования и управления. Предоставление регуляторным органам и частным лицам актуальной и точной информации через приложения, WeChat, веб-сайты и другие платформы.

Разработанная физическая архитектура платформы К-ИТС управления интеллектуальными тоннелями включает:

- **информационная платформа:** с помощью видеонаблюдения и различных типов датчиков внутри тоннеля определяется информация о транспортных средствах (включая скорость, расстояние и тип транспортного средства), состоянии воздуха в тоннеле и пожаре;

- **интерактивная платформа:** обеспечивает взаимодействие в реальном времени и обмен данными о дорожном движении между всеми транспортными средствами, дорогами и центрами управления. Она использует многорежимные средства беспроводной связи для обеспечения связи между транспортным средством и автомобилем, между автомобилем и дорогой и между человеком и автомобилем в совместной среде транспортного средства и дороги;

- **кооперативная платформа:** отвечает за совместную обработку различных типов дорожной информации, чтобы обеспечить необходимые функции для работы системы. На основе собранных данных о движущихся транспортных средствах она контролирует и направляет транспортные средства в тоннеле в режиме реального времени, чтобы избежать дорожно-транспортных происшествий.

- **платформа обеспечения:** решает задачи управления в чрезвычайных ситуациях, создавая планы реагирования на чрезвычайные ситуации, отслеживая чрезвычайные ситуации в режиме реального времени и своевременно отправляя экстренные ресурсы;

- **сервисная платформа:** предоставляет информационные услуги

государственным органам, предприятиям, персонально участникам дорожного движения с помощью различных средств, таких как приложения для мобильных телефонов, автомобильные терминалы, Интернет, дорожные информационные табло, дорожное радио, трансляции в тоннелях и электронные экраны.

Физическая архитектура платформы К-ИТС управления интеллектуальными тоннелями показана на рис. 6:

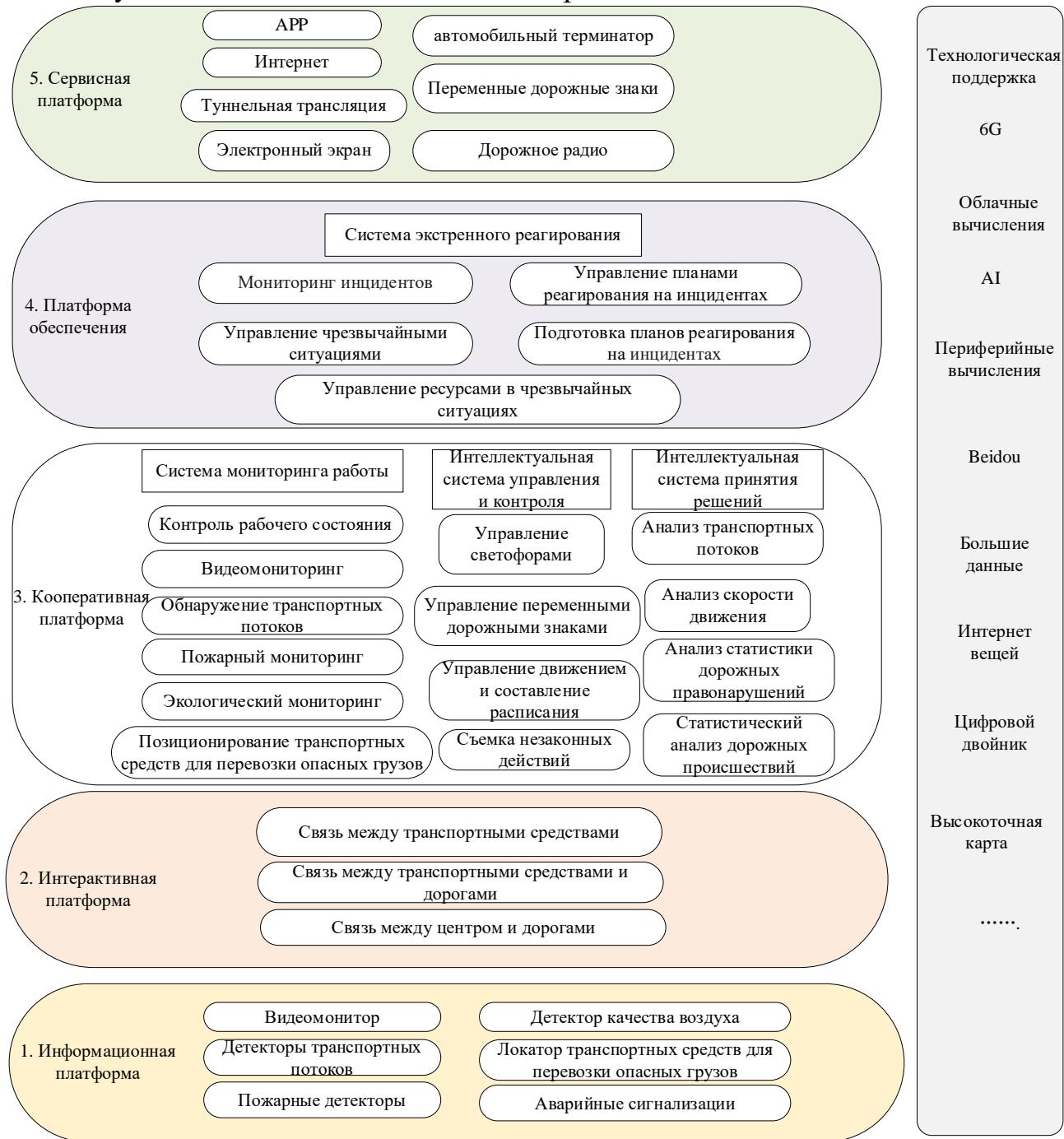


Рис. 6 – Физическая архитектура платформы К-ИТС управления интеллектуальными тоннелями (Авторская разработка)

В кооперативной платформе (как центральная система) система мониторинга работы отвечает за сбор данных и мониторинг рабочего состояния, а также управляет аварийными ситуациями; интеллектуальная система управления и контроля принимает события, осуществляет управление контролльным оборудованием и инициирует план по устранению события;

интеллектуальная система принятия решений обеспечивает поддержку принятия решений для каждой системы.

Информация о дорожно-транспортном происшествии, полученная информационной платформой, передается на платформу обеспечения через кооперативную платформу, а система экстренного реагирования на платформе обеспечения оперативно реагирует.

В платформе обеспечения схема обработки данных системы экстренного реагирования показана на рис. 7:

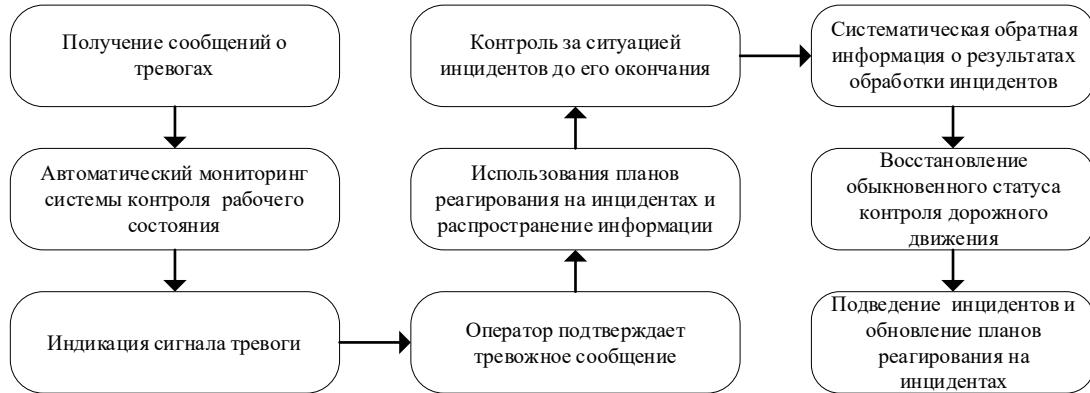


Рис. 7 – Схема обработки данных системы экстренного реагирования

Валидация архитектуры кооперативных интеллектуальных транспортных систем (К-ИТС) осуществлена на основе моделирования в различных сценариях. Для моделирования в условиях ИТС использовалось программное обеспечение AIMSUN с моделью движения следующего вида:

$$V_1 \leq b_{n+1}\tau + \sqrt{b_{n+1}^2\tau^2 - b_{n+1} \left\{ 2[x_n(t) - s_n - x_{n+1}(t)] - v_{n+1}(t)\tau - \frac{v_{n+1}^2(t+\tau)}{2b'_{n+1}} \right\}} \quad (1)$$

$$V_2 \leq v_{n+1}(t) + 2,5a_{n+1}\tau \left(1 - \frac{v_{n+1}(t)}{v_f} \right) \sqrt{0.025 + \frac{v_{n+1}(t)}{v_f}} \quad (2)$$

$$v_{n+1}(t+\tau) = \min\{V_1; V_2\} \quad (3)$$

На каждом шаге выбирается минимальное значение скорости из двух возможных.

Ключевые параметры для моделирования в условиях ИТС:

τ - время запаздывания;

b' - оцениваемое замедление;

θ - фактор чувствительности;

h - минимальная дистанция следования.

Вероятность выбора назначенного маршрута в зависимости от доли подключенных автомобилей оценивается по логит-модели, параметры которой определены в исследовании:

$$P_k = \frac{1}{1 + \exp \sum ((c_i - c_k)\theta)} \quad (4)$$

где P_k – вероятность следования по назначенному маршруту;

c_i, c_k – стоимость прохождения i -го автомобиля по назначенному маршруту;

θ – параметр модели.

Влияние параметров логит-модели на выбор маршрута показана на рис. 8:

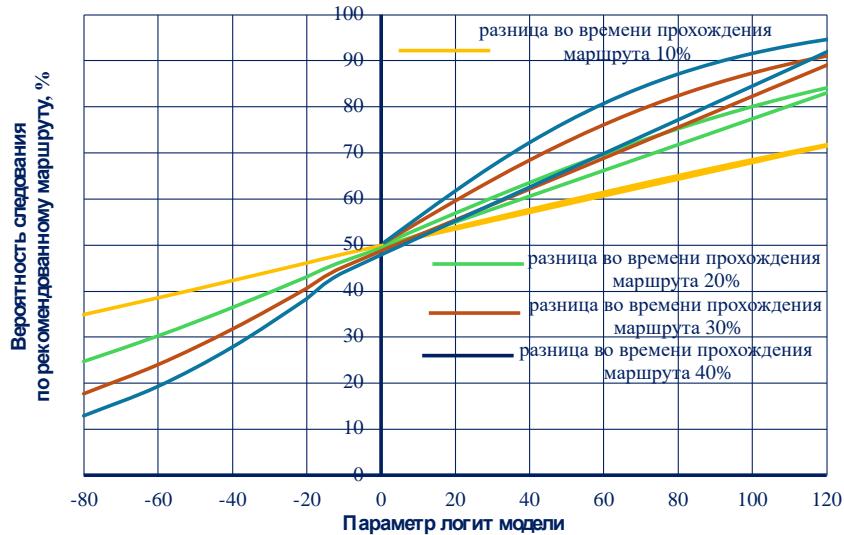


Рисунок 8 – Влияние параметров логит-модели на выбор маршрута

Перечень сценариев моделирования:

- отсутствие инцидента, движение обычных автомобилей.
- наличие инцидента, движение обычных автомобилей.
- наличие инцидента, участие 20% подключенных автомобилей.
- наличие инцидента, участие 40% подключенных автомобилей.
- наличие инцидента, участие 60% подключенных автомобилей.
- наличие инцидента, участие 80% подключенных автомобилей.

Общий вид зависимостей для определения скорости и задержек в зависимости от доли подключенных автомобилей имеет следующий вид:

$$v = a + bd + cd^2 \quad (5)$$

$$d = t_{d0} \exp \left(-\frac{d}{d_m} \right) \quad (6)$$

где v – скорость транспортного потока, км/ч;

d – задержки, с/км;

t_{d0} – задержки в обычном потоке, с/км;

d_m – доля подключенных автомобилей, до которой происходит значительное снижение задержки.

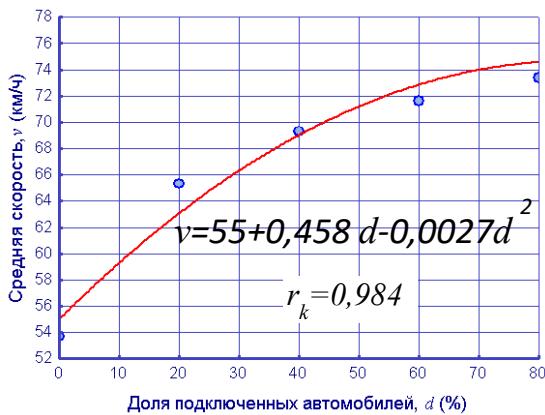


Рис. 9 – Зависимость между долей подключенных автомобилей и скоростью

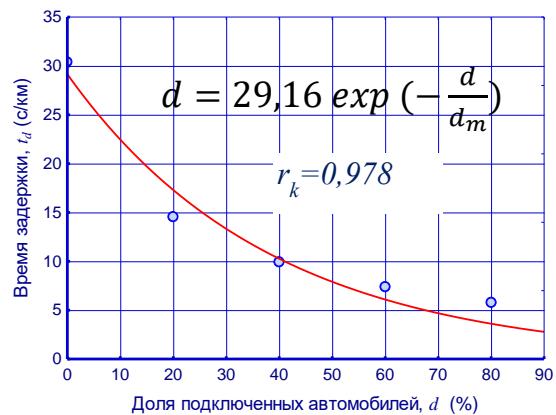


Рис. 10 – Зависимость между долей подключенных автомобилей и задержкой

С увеличением доли подключенных автомобилей в системе К-ИТС можно существенно сократить время задержки, увеличить среднюю скорость движения, уменьшить длину очередей и время в пути, а также снизить стандартное отклонение скорости. В сравнении с сценарием 1 (инцидент без подключенных автомобилей), сценарии с подключенными автомобилями показали следующие улучшения в таблице 2:

Таблица 2 – Показатели, полученных в результате моделирования для различных сценариев.

Сценарий	1	2	3	4	5
Доля подключенных автомобилей, %	0	20	40	60	80
Время задержки, сек/км	30,39	14,5	9,95	7,37	5,8
Скорость, км/ч	53,71	65,31	69,31	71,66	73,37
Время в пути, сек	74,08	58,06	53,79	51,6	50,24

Время задержки: при увеличении доли подключенных автомобилей до 20 %, время задержки уменьшилось на 52,2 %, при 40 % подключенных автомобилей – на 67,2 %, при 60 % – на 75,7 %, и при 80 % – на 80,9 %.

Скорость: при 20 % подключенных автомобилей, средняя скорость увеличилась на 21,6 %, при 40 % – на 29 %, при 60 % – на 33,4 %, и при 80 % – на 36,6 % подключенных автомобилей.

Время в пути: при 20 % подключенных автомобилей, время в пути сократилось на 21,6 %, при 40 % – на 27,4 %, при 60 % – на 30,3 %, и при 80 % – на 32,2 %.

На основе анализа времени задержки может быть определено снижение временных потерь t на один автомобиль на каждый километр в различных экспериментальных сценариях с участием подключённых автомобилей. Совокупное сокращение временных потерь t_c рассчитывается по следующей формуле:

$$t_c = t * q \quad (7)$$

где t – сокращение временных потерь на один автомобиль, сек/(км·авт);

t_c – общее сокращение временных потерь, сек/(км·ч);

q – интенсивность, авт/ч.

Ценность потерь времени человека $VOTT_p$ (юань/ч) может быть рассчитана по следующей формуле:

$$VOTT_p = \frac{Per_{income}}{Time_{work}} \quad (8)$$

где Per_{income} – среднедушевой располагаемый доход городского населения в соответствующем городе, юань;

$Time_{work}$ – рабочее время, соответствующее Per_{income} , час (ч).

В 2024 году среднедушевой располагаемый доход городского населения провинции Шаньси составил 43,036 юаней, $VOTT_p=22,41$ юаня/ч.

При расчёте только сокращения экономических потерь водителей, полученные результаты представлены в таблице 3:

Таблица 3 – Снижение экономических потерь

Сценарий	2	3	4	5
Доля подключенных автомобилей, %	20	40	60	80
Задержка t , сек/(км·ч)	15,89	20,44	23,02	24,59
t_c , час/(км·ч)	13,24	17,03	19,18	20,49
Снижение экономических потерь на 1 автомобиль, юань/(км·ч)	0,1	0,13	0,14	0,15
Снижение экономических потерь в реальном примере, юань/(км·ч)	296,81	381,8	429,99	459,31

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Полученные в диссертационной работе результаты являются теоретической и практической основой решения задач, заключающихся в разработке архитектуры К-ИТС на основе Китайской национальной архитектуры интеллектуальных транспортных систем.

2. Сформированные в диссертации требования к процессно-ориентированному и объектно-ориентированному методам разработки архитектуры обеспечивают более глубокие знания различных методов разработки. Это имеет большое значение для стран, выбирающих собственные методы развития архитектуры интеллектуальных транспортных систем. Из приведенного анализа видно, что оба метода имеют свои особенности в рамках системы ИТС. Процессно-ориентированный метод проще и практичнее, но для более сложных систем, когда требуются новые пользовательские сервисы, его сложнее пересматривать; объектно-ориентированный метод требует логического анализа каждого пользовательского сервиса ИТС по отдельности, что является большой нагрузкой, но его удобно обновлять и поддерживать. Поэтому при выборе метода разработки архитектуры ИТС можно учитывать существующий фундамент разработки, уровень знаний разработчиков и другие факторы. С учетом существующего в Китае фундамента для разработки архитектуры ИТС, в качестве руководства принят процессно-ориентированный метод.

3. В данном исследовании теоретическая ценность заключается в предложении алгоритма разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем, учитывающего специфику Китая. Это не только

способствует лучшему пониманию и решению сложных проблем городского транспорта, но и предоставляет новую перспективу для будущих исследований ИТС.

4. Созданы логическая архитектура К-ИТС и ее диаграмма потоков данных для функционального домена. С применением процессно-ориентированного подхода были оптимизированы взаимодействия между различными функциональными доменами системы, что способствовало повышению уровня безопасности и эффективности системы, особенно в аспектах управления данными и информационной безопасности.

5. Созданы физическая архитектура платформы К-ИТС управления интеллектуальными тоннелями на основе логической архитектуры К-ИТС. С помощью единой платформы сбора данных, взаимодействия данных и интегрированного управления бизнесом она объединяет все виды данных о дорожном движении и разрушает информационные барьеры между различными системами для обеспечения совместного использования данных. Мониторинг и управление транспортными средствами в тоннеле в режиме реального времени могут быть достигнуты за счет взаимодействия данных о движении между транспортными средствами, дорогами, центром и совместной обработки различных типов дорожной информации во избежание дорожно-транспортных происшествий.

6. На основании проведенного моделирования и анализа можно сделать вывод, что введение кооперативных интеллектуальных транспортных систем (К-ИТС) в управлении транспортными потоками приводит к значительным улучшениям в плане эффективности и безопасности дорожного движения. В частности, К-ИТС позволяют снизить время задержек на 50-80%, уменьшить длину очередей и время в пути, а также увеличить среднюю скорость движения на 20-40% и уменьшить стандартное отклонение скорости, что свидетельствует о повышении стабильности движения. Эти результаты подтверждают эффективность разработанной логической и физической архитектуры К-ИТС и её пригодность для применения в реальных условиях эксплуатации.

7. При увеличении доли подключённых автомобилей с 20 % до 80 % снижение экономических потерь составляет 54,7 %. Данный результат подтверждает высокую эффективность интеграции подключённых автомобилей в дорожную инфраструктуру с точки зрения макроэкономической выгоды. Таким образом, внедрение технологий К-ИТС не только способствует улучшению показателей безопасности и пропускной способности, но и оказывает прямой положительный эффект на социально-экономические издержки, связанные с дорожно-транспортными заторами.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ван Ж. Особенности методов разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем в Китайской Народной Республике. Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 1-3(84). – С. 103-110. (ВАК)
2. Ван Ж., Зырянов В.В. Анализ методов разработки архитектуры

интеллектуальных транспортных систем. Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 2-1(85). – С. 106-112. (ВАК)

3. Ван Ж., Зырянов В.В. Архитектура кооперативных интеллектуальных транспортных систем. Мир транспорта и технологических машин. – 2024. – № 3-2(86). – С. 119-125. (ВАК)

4. Wang R. Zyryanov V. A. Method for Designing the Architecture of Intelligent Transportation Systems in the People's Republic of China. XII International Scientific and Practical Forum “Environmentally Sustainable Cities and Settlements: Problems and Solutions” (ESCP-2023). E3S Web of Conferences. 2023. 403, 07022. 7 p. doi.org/10.1051/e3sconf/202340307022. (Scopus, Web of science)

5. Жуньчжоу В. Интеллектуальные системы управления дорожным движением / В. Жуньчжоу, В. В. Зырянов // Информационные технологии и инновации на транспорте: Материалы VII Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Орел, 18–19 мая 2021 года. Том 1. – Орел: Орловский государственный университет, 2021. – С. 157-169. – EDN XGSJJG.

6. Ван Ж. Интеллектуальная транспортная система на основе интернета транспортных средств в Китае / Ж. Ван // Образование и наука в России и за рубежом. – 2019. – № 14(62). – С. 206-210. – EDN LBPRIP.

7. Ван Ж. Эволюция интеллектуальной транспортной системы (ИТС) и исследование ее моделей / Ж. Ван // Образование и наука в России и за рубежом. – 2021. – № 1(77). – С. 163-167. – EDN WYVSCJ.

8. Ван Ж. Анализ развития интеллектуальных транспортных систем. Международный научный форум: Наука и инновации - современные концепции. В 2-х томах, Москва, 28 декабря 2023. Том 1. – С. 142-146.

Ван Жуньчжоу

Методы разработки архитектуры интеллектуальных транспортных систем
в Китайской Народной Республике

Печатается в авторской редакции
Подписано в печать ____ 2025. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе. Усл.печ.л. 1,00.
Тираж 100 экз. Заказ ____.