

На правах рукописи



ЧЕКИНА Елена Владимировна

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВЫХ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ
ДЛЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И УПРАВЛЕНИЯ
ДОРОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена на кафедре медицинской физики, математики и информатики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО СамГМУ Минздрава России), г. Самара.

Научный руководитель:

Головнин Олег Константинович

доктор технических наук, доцент,

заведующий кафедрой медицинской физики, математики и информатики,

ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет», г. Самара

Официальные оппоненты:

Сметанина Ольга Николаевна

доктор технических наук, доцент,

профессор кафедры вычислительной математики и кибернетики,

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Сусарев Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент,

заведующий кафедрой автоматизации и управления технологическими процессами,

ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», г. Самара

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет», г. Пенза

Защита состоится «4» июня 2026 года в 12:30 на заседании диссертационного совета 24.2.377.02 при ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ауд. 200.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, ФГБОУ ВО «СамГТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.02. Тел. (846) 337-04-43, e-mail: d24237702@samgtu.ru. В отзыве просим указывать почтовый адрес, номер телефона, электронную почту, наименование организации, должность, шифр и наименование научной специальности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «СамГТУ» и на сайте диссертационного совета 24.2.377.02 <https://d24237702.samgtu.ru/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.377.02

кандидат физико-математических наук, доцент



М. Н. Саушкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время информационные технологии играют одну из главных ролей в развитии дорожно-транспортной инфраструктуры Российской Федерации. Активная цифровизация дорожного хозяйства позволяет значительно повысить эффективность управления дорожным движением и транспортными потоками, снизить аварийность и обеспечить устойчивое экономическое развитие, при этом увеличивая сложность самой дорожно-транспортной инфраструктуры. Однако вместе с ростом сложности дорожно-транспортной инфраструктуры возникают новые задачи – проектирование эффективной организации дорожного движения (ОДД), учитывающей особенности улично-дорожной сети (УДС), транспортной обстановки, характеристик транспортных потоков, используемых средств управления, а также требований нормативной правовой и технической документации, что становится сложной проблемой, требующей комплексного подхода и анализа больших объемов разнородных данных.

Решение проблемы видится в создании систем поддержки принятия решений (СППР), которые позволят обрабатывать разнородные данные из множества различных источников, включая данные дорожных лабораторий, картографических сервисов, систем мониторинга транспорта, интеллектуальных транспортных систем, систем управления дорожным движением и других, формируя адекватную модель обстановки и помогая разрабатывать верифицируемые схемы ОДД, реализующие проектные решения.

Таким образом, решаемая в диссертации *научная задача* состоит в разработке моделей, методов и алгоритмов формирования и использования структурных схем ОДД, предназначенных для системного анализа и управления дорожным движением в системах поддержки принятия проектных решений.

Актуальность диссертации подтверждается соответствием развиваемой тематики приоритетным направлениям научно-технологического развития, утвержденным Указом Президента Российской Федерации от 18 июня 2024 г. № 529: «5. Интеллектуальные транспортные и телекоммуникационные системы, включая автономные транспортные средства». Научно-технические решения, представленные в диссертации, соответствуют Перечню важнейших наукоемких технологий, утвержденных тем же Указом: «14. Транспортные технологии для различных сфер применения (море, земля, воздух), в том числе беспилотные и автономные системы». Кроме этого, развиваемые в диссертации научно-технические решения соответствуют направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145: «е) повышение уровня связанности территории Российской Федерации путем создания интеллектуальных транспортных, энергетических и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики».

Степень разработанности темы исследований. В последние годы важной стала задача создания средств информационной поддержки принятия решений в составе интеллектуальных транспортных систем. Выполненные в диссертации исследования в области управления дорожным движением и транспортной инфраструктурой базируются на трудах ученых и практиков Зырянова В.В., Капитанова В.Т., Сильянова В.В. Значительный опыт накоплен в области интеллектуальных транспортных систем, связанный с работами Жанказиева С.В., Минниханова Р.Н., Михеевой Т.И., Elassy M., Fagoq M., Liu C. Информационные и геоинформационные технологии на транспорте развиваются в работах ученых: Сметаниной О.Н., Христодуло О.И., Цветкова В.Я., Jabeur N., Lai J., Syed M.A. В теорию и практику разработки интеллектуальных технологий для СППР значительный вклад внесли Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Чечнев В.Б., Consilvio A., Katanalp B.Y., Xu T.

Однако, главная трудность разработки СППР при управлении транспортом заключается в сложности выработки и проверки возможных решений по ОДД. При этом в процессе выработки решений необходимо объединить информацию из разных источников, имеющих

свою специфику представления данных, форматы хранения и методы обработки, что дополнительно создает значительные технические трудности. Кроме того, важным аспектом является необходимость учета особенностей конкретной местности и транспортной обстановки. Для верификации итоговых проектных решений необходимо интегрировать и поддерживать множественные представления и требования различных заинтересованных сторон, вовлеченных в процесс управления дорожным движением. Все эти факторы влияют на необходимость разработки методов, алгоритмов и средств, обеспечивающих принятие решений по ОДД в условиях растущей сложности дорожно-транспортной обстановки.

Объектом исследования является система организации и управления дорожным движением.

Предметом исследования являются модели, методы и средства, предназначенные для разработки систем поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением.

Целью диссертационной работы является разработка СППР по управлению дорожным движением, обеспечивающей подготовку и верификацию схем организации дорожного движения в условиях сложной дорожно-транспортной обстановки.

Научные и научно-технические задачи:

1. Провести анализ актуальных задач и современных научно-технических решений в области информационной поддержки при разработке проектов и схем ОДД;
2. Разработать модель цифровых структурных схем для системного анализа ОДД в условиях сложной дорожно-транспортной обстановки;
3. Разработать метод поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, позволяющий интегрировать доступную информацию и поддерживать множественные представления и требования различных заинтересованных сторон к схемам ОДД;
4. Разработать алгоритмы обработки и трансформации разнородной информации в процессе информационной поддержки принятия проектных решений, реализуемых в схемах ОДД;
5. Разработать систему поддержки принятия решений по управлению дорожным движением, реализующую предложенные модели, методы и алгоритмы.

Научная новизна работы содержится в следующих результатах:

1. Модель цифровых структурных схем для системного анализа ОДД, *отличающаяся* формализацией описания схем и *позволяющая* осуществлять инфраструктурное упорядочивание элементов УДС и технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) в условиях сложной дорожно-транспортной обстановки (п. 4 паспорта спец.);
2. Метод поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, *отличающийся* применением пространственно-функциональной декомпозиции к дорожно-транспортной обстановке и *позволяющий* интегрировать доступную информацию и поддерживать множественные представления и требования различных заинтересованных сторон к схемам ОДД (п. 4 паспорта спец.);
3. Алгоритмы обработки и трансформации разнородной информации в процессе информационной поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, *отличающиеся* совместным применением цифровых структурных схем ОДД и методов искусственного интеллекта и *позволяющие* использовать правила применения ТСОДД и проверять возможные решения в процессе проектирования схем ОДД (п. 12 паспорта спец.);
4. Система поддержки принятия решений по управлению дорожным движением, реализующая предложенные методы и алгоритмы (п. 9 паспорта спец.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения диссертации соответствуют паспорту научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по следующим направлениям исследований специальности: 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта, 9. Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений

и оптимизации технических объектов, 12. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

Теоретическая значимость результатов, полученных в диссертации, состоит в обосновании моделей, методов и алгоритмов цифровых структурных схем для системного анализа и управления дорожным движением. Предложенные методы и алгоритмы вносят вклад в развитие теории поддержки принятия решений и закладывают научно-технические основы для цифровой трансформации процессов разработки, согласования и эксплуатации проектов и схем ОДД.

Практическая значимость работы. Основным практическим результатом исследования – внедрение разработанных методов и алгоритмов, инструментальных и программных средств в практику при разработке проектов ОДД и СППР по управлению транспортом. Результаты исследований использовались при разработке следующих программ для ЭВМ: «Геоинформационная система интеграции и анализа неструктурированных данных на основе искусственного интеллекта»; «Система поддержки принятия проектных решений в процессе разработки цифровых проектов организации дорожного движения», «Программное обеспечение передвижной дорожной лаборатории для обследования транспортной инфраструктуры «AnchorLab».

Реализация и внедрение результатов работы. Теоретические и практические результаты работы внедрены и используются в повседневной деятельности отдела организации дорожного движения в ООО «ИнфраТрансПроект» при разработке проектов и схем ОДД. Результаты работы, связанные с поддержкой принятия проектных решений, реализованы в Департаменте транспорта Администрации г.о. Самара в ходе разработки проектов ОДД на УДС г.о. Самара и апробированы на 68 улицах суммарной протяженностью 156,3 км, что подтверждается Госавтоинспекцией Управления МВД России по г. Самаре. Разработанная СППР использована в МКУ «Дирекция благоустройства города Кирова» и апробирована на УДС г. Киров суммарной протяженностью 147,14 км. Результаты работы используются в подразделениях ГИБДД Управления МВД России по г. Кирову в повседневной деятельности по обеспечению безопасности дорожного движения. Результаты работы внедрены в учебный процесс Самарского государственного медицинского университета при подготовке обучающихся по специальности 30.05.03 Медицинская кибернетика.

Методология и методы исследования. Теоретической и методологической основой исследования послужили методы системного анализа, геоинформационного моделирования, теории принятия решений, теории множеств и объектно-ориентированного программирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель цифровых структурных схем для системного анализа ОДД, предназначенная для инфраструктурного упорядочивания элементов УДС и ТСОДД в условиях сложной дорожно-транспортной обстановки;
2. Метод поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, позволяющий интегрировать доступную информацию и поддерживать множественные представления и требования различных заинтересованных сторон к схемам ОДД;
3. Алгоритмы обработки и трансформации разнородной информации в процессе информационной поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, позволяющие использовать правила применения ТСОДД и проверять возможные решения в процессе проектирования схем ОДД;
4. Система поддержки принятия решений по управлению дорожным движением, реализующая предложенные методы и алгоритмы.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается корректным использованием теоретических и экспериментальных методов, базированием на фундаментальных трудах отечественных и зарубежных ученых, апробацией основных положений, полученных в диссертации, в печатных трудах, статьях и докладах на научно-технических конференциях и семинарах, применением результатов диссертации на практике, внедрением

в работу предприятий при решении спектра научно-технических и практических задач, в учебные процессы Самарского государственного медицинского университета.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных, всероссийских и региональных конференциях, выставках, конгрессах: 25-я междунар. конф. «Математика. Компьютер. Образование» (2018 г., г. Дубна); VIII Всерос. научн. конф. «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (с приглашением зарубежных ученых)» (2020 г., г. Уфа); XXIX Всерос. научн.-технич. конф. студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (2024 г., г. Рязань); Междунар. мультидисциплинар. конф. по промышл. инжинирингу и современным технологиям (2024 г., г. Владивосток); IV Междунар. научн.-практич. конф. «Цифровые технологии, оптика и материаловедение» (2025 г., г. Бухара, Узбекистан); XXV Междунар. научн.-технич. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения ректора ППИ Н.П. Сергеева и 80-летию Победы в Великой отечественной войне «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (2025 г., г. Пенза); 7-я Междунар. конф. по системам управления, матем. моделированию, автоматизации и энергоэффективности (2025 г., г. Липецк).

Публикации. Основные положения и результаты работы изложены в 18 публикациях, включающих: 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности; 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ; остальные 8 публикаций – в научно-технических журналах и сборниках научных статей и трудов.

Личный вклад. Все основные результаты работы получены автором лично. Программы для ЭВМ созданы на основе методов, моделей и концепций автора, изложенных в диссертации, под его руководством и при непосредственном участии. Работы, выполненные в соавторстве, посвящены решению конкретных научно-технических и практических задач на основе концепций, предложенных автором. В [1] автору принадлежит математическая модель дислокации геообъектов для ОДД, в [2] автору принадлежит расчетная модель повышения качества деятельности систем управления. В [3, 5, 17, 18] автор предложила математическое и алгоритмическое обеспечение для обработки данных в цифровых структурных схемах ОДД, а также обеспечила постановку, проведение экспериментов и подготовку выводов. В [6] автор предложила алгоритм извлечения правил применения ТСОДД из текстов технических стандартов и обеспечила его апробацию на типовых схемах и проектах ОДД. В [7] автор сформировала постановку задачи и обозначила гипотезу ее решения, приняла участие в обработке экспериментальных данных. В [8-10] автор обеспечила проектирование, разработку программ и подготовку документации. В [11, 12, 16] автор предложила алгоритмы трансформации дорожной информации в процессе разработки схем ОДД.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав основного материала, заключения, списка литературы из 115 наименований и трех приложений. Общий объем работы составляет 152 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основная цель, задачи и методы исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту. Приведены научная новизна и практическая ценность работы.

Первая глава посвящена анализу актуальных задач и современных научно-технических решений в области информационной поддержки при проектировании ОДД. Рассмотрены условия и факторы принятия проектных решений, проведен аналитический обзор технических систем обследования дорожно-транспортной инфраструктуры и систем, используемых для проектирования и разработки схем ОДД. Рассмотрены современные эффективные методы и технологии поддержки принятия проектных решений. Приведены критерии оценки эффективности схем ОДД.

Обоснованное принятие решений в сфере ОДД и развития транспортной инфраструктуры предполагает комплексный анализ внешних факторов (текущие показатели аварийности, интенсивности транспортных потоков, имеющаяся инфраструктура и др.), понимание

действующих ограничений и определение критериев выбора оптимальных вариантов (рис. 1). В качестве исходной информации для разработки схем ОДД используются: видеобанк дорожных данных с географической привязкой, карты местности, различная аналитическая информация. Весь набор структурированных и неструктурированных данных анализируется системой поддержки принятия решений для формирования оптимальных проектных решений, при этом условия оптимальности могут быть разными: снижение аварийности, увеличение пропускной способности, увеличение средней скорости и др.

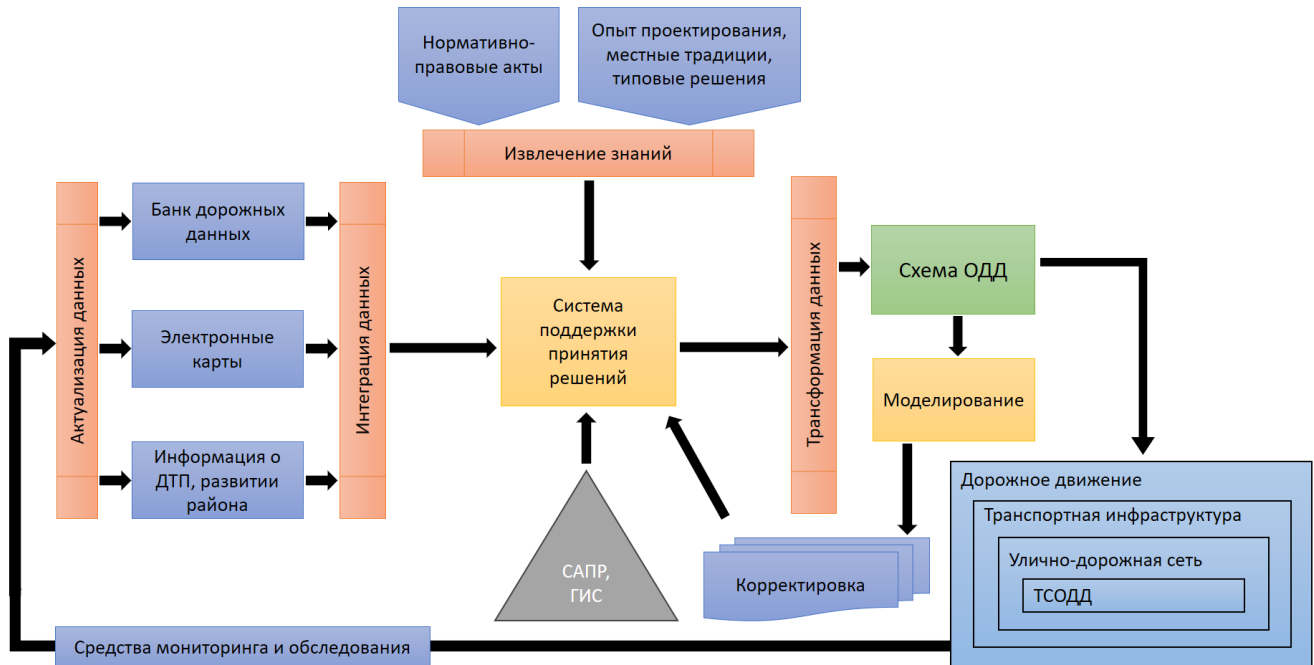


Рис. 1. Условия и факторы принятия решений при разработке проектов организации дорожного движения

Для обследования дорожной инфраструктуры применяются специализированные системы – передвижные дорожные лаборатории, которые обеспечивают сбор, обработку и анализ данных о состоянии дорожного полотна, конструктивных элементов и ТСОДД. Цифровизация процессов обследования и диагностики автодорог приводит к появлению больших объемов разнородных данных о дорожной инфраструктуре, которые представляются с использованием геоинформационных моделей и геоинформационных систем (ГИС) для дальнейшего анализа и структурирования. Применение ГИС способствует принятию решений относительно транспортного планирования и проектирования, создавая единое информационное пространство. Разработка проектных решений по ОДД выполняется с использованием специализированных систем автоматизированного проектирования. Оценка эффективности разработанных мероприятий по транспортному планированию выполняется при помощи средств транспортного моделирования, которые не интегрируют информацию систем проектирования.

Увеличение сложности транспортной системы порождает новые вызовы: необходимость разработки эффективных схем ОДД, учитывающих специфику УДС, ситуацию на дорогах, применяемые ТСОДД и требования нормативных документов, что превращается в сложную проблему, решение которой требует комплексного подхода и обработки значительных массивов разнообразной информации.

Во второй главе рассматриваются структура и параметры системы сбора и обработки дорожной информации на основе передвижной автомобильной лаборатории. Предложена модель цифровых структурных схем для системного анализа ОДД в условиях сложной дорожно-транспортной обстановки. Предложен метод поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, позволяющий интегрировать доступную информацию и поддерживать множественные представления и требования различных заинтересованных сторон, вовлеченных в процесс управления дорожным движением. Приведены результаты натурных испытаний.

Сбор дорожных данных осуществляется посредством аппаратного обеспечения дорожной лаборатории, которое включает устройство измерения пройденного пути, GPS/ГНСС-приемник, акселерометр, камеры панорамной видеосъемки, системный таймер и лидар. Данные устройств обрабатываются программными блоками, распознаваемые объекты наносятся на электронную карту геоинформационной системы согласно их координатам и вычисленной согласующим блоком протяженностью, наполняя пространственную модель электронной карты местности.

Модель цифровых структурных схем для системного анализа ОДД выступает в качестве основы для представления схем ОДД и, по сути, обеспечивает цифровое представление участка УДС, позволяющее проводить анализ, моделирование сценариев развития и оценивать эффективность решений на основе схем до их реализации на местности.

Участок УДС, для которого осуществляется построение схемы, описывается следующим образом:

$$District = (l_B, l_E, slope, radius, surface, l_{lines}, r_{lines}, reverse_{lines}, width),$$

где: $District$ – участок УДС, l_B – отметка начала участка УДС, м, l_E – отметка конца участка УДС, м, $slope$ – уклон, ‰, $radius$ – радиус кривых в плане, м, $surface$ – вид покрытия дорожного полотна, $surface \in \{\text{асфальтобетон, бетон, щебень, гравий, грунт}\}$, $width$ – ширина дороги на участке УДС, м, l_{lines} – количество полос для движения слева от осевой, r_{lines} – количество полос для движения справа от осевой, $reverse_{lines}$ – количество реверсивных полос.

Продольный уклон участка улично-дорожной сети определяется как набор уклонов на разных участках:

$$slope = (slope_B, slope_{B+1}, \dots, slope_E),$$

где $slope_B$ – уклон на начале участка УДС, м; $slope_E$ – уклон на конце участка УДС, м; Аналогично определяются другие характеристики автомобильной дороги: $surface$, $width$, l_{lines} , r_{lines} , $reverse_{lines}$.

Схема ОДД представляет собой набор дислоцированных ТСОДД s_i на участке УДС $District : S = (s_1, s_2, \dots, s_n)$.

ТСОДД представляется следующим образом:

$$s_i = (e_j, l_k, act, side),$$

где $i = \overline{1, n}$, n – количество ТСОДД в схеме ОДД; e_j – ТСОДД типа j , $j = \overline{1, m}$, m – общее количество типов ТСОДД: дорожных знаков ($j = 1$), светофорных объектов ($j = 2$), линий дорожной разметки ($j = 3$), искусственных дорожных неровностей ($j = 4$), пешеходных ($j = 5$) и дорожных ограждений ($j = 6$); l_k – место дислокации ТСОДД, при этом l_k связано со способом дислокации $l_k = (l_g, l_t, p, g)$, где l_g, l_t – глобальные координаты, $p = (p_t, p_n)$ – опора с типом $p_t \in \{\text{независимая, световая, консольная, растяжка, рамная, } \emptyset\}$ и допустимым числом группировок p_n , $g \in \{0, \dots, p_n\}$ – номер группировки, при этом 0 используется в случае, если установка осуществляется без опоры (на другом объекте); $k = \overline{1, K}$, K – количество мест возможной дислокации ТСОДД на участке УДС; act – статус ТСОДД, $act \in \{\text{установлен, требуется установить, требуется демонтировать, требуется замена}\}$; $side$ – место размещения ТСОДД относительно проезжей части, $side \in \{\text{слева, справа, на разделительной полосе, над проезжей частью}\}$.

Каждое ТСОДД в зависимости от типа j специфицируется A -дополнительными параметрами a_1, a_2, \dots, a_A , в случае их применимости. Для привязки ТСОДД к координатам электронной карты используются функции дислокации, которые преобразуют координаты из (отметка дороги l_b) в долготу l_g и широту l_t , и наоборот.

Таким образом, требуется сформировать схему ОДД S , которая оптимизирует безопасность при соблюдении ключевых требований. В качестве целевой функции выступает задача минимизации функции оценки рисков возникновения ДТП (относительная аварийность):

$$\theta = Accident(S) \rightarrow min.$$

Схема S должна удовлетворять системе ограничений:

1. Пропускная способность $Capacity(S)$ должна превышать требуемую (планируемую) интенсивность движения на участке дорожной сети. Функция, оценивающая пропускную способность участка дороги при реализации схемы S учитывает количество полос (l_lines , r_lines , $reverse_lines$), тип ТСОДД, геометрию, ограничения скорости, возможность остановки и стоянки:

$$Capacity(S) \geq I_c,$$

где I_c – требуемая (планируемая) интенсивность движения, трансп. средств / ч.

2. В проектируемой схеме ОДД должны отсутствовать нарушения требований нормативных документов (ГОСТ на применение и размещение ТСОДД). Функция проверяет корректность типов знаков, расстояния видимости, зоны действия:

$$Violations(S) = 0.$$

3. В каждой возможной локации размещения l_k (из k существующих) должно находиться не более заданного количества ТСОДД для снижения нагрузки на водителя и снижения визуального «шума»:

$$\forall k \in \overline{1, K} : ECount(l_k) \leq N,$$

где $ECount(l_k)$ – функция подсчета числа ТСОДД в месте дислокации l_k ; N – максимальное количество ТСОДД в месте дислокации l_k .

Цифровая структурная схема ОДД представляет собой формализованную модель, представляющую структурированное цифровое описание элементов УДС и ТСОДД на участке УДС, их взаимосвязей и параметров, предназначенную для системного анализа, моделирования, автоматизации проектирования и управления дорожным движением в различных условиях. Описание схемы формируется отдельными ТСОДД s_i , входящими в схему S на участке УДС $District$, т.е. отдельные ТСОДД выступают в качестве базовых элементов схемы, а правила применения ТСОДД описывают правила формирования структурных схем.

Цифровая структурная схема ОДД однозначно задаёт состав, структуру, взаимное расположение и режим функционирования всех ключевых объектов УДС и ОДД с помощью формальных правил объединения, пересечения, разности, дополнения и симметричной разности.

Объединение двух цифровых структурных схем S_1 и S_2 – это новая схема S_{union} , содержащая все элементы, входящие хотя бы в одну из схем:

$$S_1 \cup S_2 = \{s \mid s \in S_1 \text{ или } s \in S_2\}.$$

В объединении содержатся все уникальные элементы, которые присутствуют хотя бы в одной из схем. Если элемент встречается в обеих схемах одинаково – он включается только один раз.

Пересечение двух схем S_1 и S_2 – это схема S_{inter} , содержащая только те элементы, которые есть одновременно и в S_1 , и в S_2 :

$$S_1 \cap S_2 = \{s \mid s \in S_1 \text{ и } s \in S_2\}.$$

В пересечении содержатся только те объекты, которые есть в обеих схемах, полностью совпадая по параметрам.

Разность схем S_1 и S_2 – это схема S_{diff} , содержащая только те элементы S_1 , которые не входят в S_2 :

$$S_1 \setminus S_2 = \{s \mid s \in S_1 \text{ и } s \notin S_2\}.$$

В этом множестве останутся только те элементы, которые есть в первой схеме и полностью отсутствуют во второй.

Дополнение схемы S относительно универсального множества всех возможных элементов S_u – это схема S_{comp} , состоящая из элементов, которых нет в S :

$$S_u \setminus S = \{s \mid s \in S_u \text{ и } s \notin S\}.$$

Симметричная разность двух схем – это схема S_{simmdiff} , содержащая элементы, которые входят только в каждую из схем, но не в обе сразу:

$$S_1 \Delta S_2 = (S_1 \setminus S_2) \cup (S_2 \setminus S_1).$$

Т.е. объединение дает совокупную схему обоих участков УДС, пересечение – их общее пространство (например, общее пересечение дорог или дублирующиеся знаки), разность – элементы, которые присутствуют только в первой (или только во второй) схеме, дополнение – всё, что теоретически возможно, но не реализовано в текущей схеме, а симметричная разность – всё, что есть только в каждой из схем, но не в обеих сразу. Применение операций позволяет, например, находить объекты, требующие согласования (поиск разности), выявлять дублирующиеся элементы на стыках схем (пересечение), или формировать сводную схему для всего района по данным с разных участков УДС (объединение).

Введем следующие аксиомы и леммы, позволяющие далее применять модель цифровых структурных схем для анализа ОДД.

Аксиома 1 (существование схемы). Для любого допустимого множества элементов S_i , существует единственная структурная схема S , включающая все S_i как элементы:

$$\forall \{s_1, \dots, s_n\}, \exists! S: \{s_1, \dots, s_n\} \subseteq S.$$

Аксиома 2 (разрешимость операций). Операции объединения, пересечения, разности, симметричной разности всегда приводят к корректным схемам при выполнении их на корректных схемах: $\forall S_1, S_2, S_1 \cup S_2, S_1 \cap S_2, S_1 \setminus S_2, S_1 \Delta S_2$ – являются корректными схемами.

Аксиома 3 (равенство элементов схемы). Элементы схемы считаются равными тогда и только тогда, когда равны все их соответствующие параметры:

$$s_i = s_j \Leftrightarrow e_j = e'_j, l_k = l'_k, act = act', side = side'.$$

Лемма 1 (коммутативность объединения):

$$S_1 \cup S_2 = S_2 \cup S_1.$$

Доказательство: по определению объединения: $S_1 \cup S_2 = \{s \mid s \in S_1 \text{ или } s \in S_2\}$, $S_2 \cup S_1 = \{s \mid s \in S_2 \text{ или } s \in S_1\}$, оператор «или» симметричен; множества равны по определению. Лемма доказана.

Лемма 2 (коммутативность пересечения):

$$S_1 \cap S_2 = S_2 \cap S_1.$$

Доказательство: по определению пересечения: $S_1 \cap S_2 = \{s \mid s \in S_1 \text{ и } s \in S_2\}$, $S_2 \cap S_1 = \{s \mid s \in S_2 \text{ и } s \in S_1\}$, оператор «и» симметричен; множества равны. Лемма доказана.

Лемма 3 (ассоциативность объединения):

$$(S_1 \cup S_2) \cup S_3 = S_1 \cup (S_2 \cup S_3).$$

Доказательство: рассмотрим любой s , s принадлежит $(S_1 \cup S_2) \cup S_3$ тогда и только тогда, когда s есть либо в $S_1 \cup S_2$, либо в S_3 , а потому – в S_1, S_2 , либо S_3 . Аналогично для $S_1 \cup (S_2 \cup S_3)$. Следовательно, оба множества эквивалентны по определению объединения. Лемма доказана.

Лемма 4 (идемпотентность объединения и пересечения):

$$S \cup S = S; S \cap S = S.$$

Доказательство: $S \cup S = \{s \mid s \in S \text{ или } s \in S\} = \{s \mid s \in S\} = S$, $S \cap S = \{s \mid s \in S \text{ и } s \in S\} = \{s \mid s \in S\} = S$. Лемма доказана.

Введены теоремы, направленные на системный анализ организации дорожного движения в условиях сложной дорожно-транспортной обстановки с помощью цифровых структурных схем.

Теорема 1 (минимальность покрытия схемы с учётом дублирования): если схема $S = S_1 \cup S_2 \cup \dots \cup S_n$ включает дублирующиеся элементы, то $S_{\text{opt}} = \text{set}(S)$ минимально по мощности при сохранении покрытия, где set – операция получения множества уникальных элементов: $|S_{\text{opt}}| = |\bigcup_k S_k|$.

Доказательство: $\text{set}(S)$ содержит по определению все и только уникальные элементы из S , тогда любой элемент s , присутствующий в любом из S_k , включён в S , и, следовательно, в S_{opt} . Дублирование не влияет на покрытие (множество объектов), а только на количество повторов. После превращения в множество, ни один элемент не теряется, но каждый остаётся единственным, т.к. в множестве отсутствуют дубликаты. Таким образом, S_{opt} минимально по размеру и содержит ровно столько элементов, сколько уникальных объектов (никакой другой набор меньшего размера тот же объём не покрывает). Теорема доказана.

Теорема 2 (корректность схемы по ограничениям допустимых атрибутов): схема S корректна относительно множества допустимых атрибутов A , если $\forall s_i = ((a_1, \dots, a_A), l_k, act, side) \in S: (a_1, \dots, a_A, l_k, act, side) \in A$.

Доказательство: по определению, схема корректна только если все её элементы разрешены, если хотя бы один s_i из S нарушает это условие, схема становится некорректной. Если все элементы $s_i \in S$ содержат множество атрибутов, входящих в A , то ни одно требование не нарушено. Таким образом, условие полностью охватывает понятие корректности схемы (2.19). Теорема доказана.

Теорема 3 (недостижимость конфликта при строгой изоляции областей схем): пусть S_1 и S_2 – цифровые структурные схемы, причём для любых элементов $s_1 = ((a_1, \dots, a_A), l_{k1}, act_1, side_1) \in S_1$ и $s_2 = ((b_1, \dots, b_B), l_{k2}, act_2, side_2) \in S_2$ выполнено $l_{k1} \neq l_{k2}$. Пусть функция конфликта $\text{Conflict}(s_1, s_2)$ определена только для пар, где $l_{k1} = l_{k2}$ (то есть элементы относятся к одной и той же локации). Тогда ни одна пара элементов $s_1 \in S_1$ и $s_2 \in S_2$ не может находиться в конфликте.

Доказательство: по условию, для любых $s_1 \in S_1, s_2 \in S_2, l_{k1} \neq l_{k2}$, по определению функции конфликта $\text{Conflict}(s_1, s_2)$ определена и (потенциально) возвращает наличие конфликта только если $l_{k1} = l_{k2}$, но для всех пар (s_1, s_2) из $S_1 \times S_2$ всегда выполняется $l_{k1} \neq l_{k2}$, следовательно, ни для одной пары не выполняется $l_{k1} = l_{k2}$. Следовательно, функция $\text{Conflict}(s_1, s_2)$ не определена ни для одной пары элементов из S_1 и S_2 . Значит, ни одна пара элементов из S_1 и S_2 не может конфликтовать. Теорема доказана.

Приведенные аксиомы, леммы и теоремы в модели цифровых структурных схем применяются для того, чтобы обеспечить правильность выполнения операций (таких как объединение, пересечение, разность), минимизировать избыточность элементов при обработке данных, формально подтверждать корректность и непротиворечивость получаемых решений, а также автоматизировать процесс анализа сложных ситуаций на основе строгих и доказанных правил без необходимости повторной ручной проверки на каждом этапе построения или модификации схемы.

Таким образом, изложенная модель цифровых структурных схем позволяет выстроить последовательную и логически завершённую формализацию системы организации дорожного движения, охватив ключевые параметры элементов УДС, ТСОДД и их взаимосвязей, а также закладывает математические основы для последующего теоретического и аналитического рассмотрения ОДД.

Метод поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением использует продукционную модель для представления знаний: $(i); Q; P; A \rightarrow B; N$, где: i – имя продукции, Q – сфера применения: населенные пункты, вне населенных пунктов, P – условие – предикат, показывающий возможность применения продукции в заданных условиях, $A \rightarrow B$ – ядро продукции, \rightarrow – импликация, N – постулаты – предикат, истинный после инициации ядра продукции.

Для обозначения особенностей улично-дорожной сети, вычисляемых с помощью пространственных, топологических или атрибутивных операций, использованы булевы функции: $\text{Crossroad}(l_B, l_E)$ – функция возвращает признак наличия перекрестка на указанном участке УДС, $\text{Urban}(l_B, l_E)$ – функция возвращает признак прохождения указанного участка УДС в населенном пункте, $\text{First_traffic_light}(l_B, l_E)$ – функция проверки того, что светофор первый на въезде; $\text{Visibility_distance}(l_B, l_E)$ – функция возвращает числовое значение, соответствующее

щее расстоянию видимости в рассматриваемой точке l_B . Состав функций может дополняться.

Рассмотрим пример записи правила установки ТСОДД – предупреждающего знака 1.8 «Светофорное регулирование» – в соответствии с требованиями п.5.2.2 и п. 5.2.11 ГОСТ 52289-2019 в случае прохождения автодороги вне населенного пункта:

(i): (Установка_ДЗ_1.8_вне_нас_пункта); Q : «Знаки дорожные»; P : $Urban(l_B, l_E) = 0$; A : $(2, (L, 1, 1), \text{существует, справа}) \rightarrow B$: $(1, 1, (L-150 \dots 300, 1, 1), \text{требуется установить, справа})$; \emptyset .

где (i): (Установка_ДЗ_1.8_вне_нас_пункта) – имя продукции;

Q : «Знаки дорожные» – отметка о правилах использования дорожных знаков;

P : $Urban(l_B, l_E) = \{0\}$ – указание об использовании продукции для дорог вне населенных пунктов;

A : $(2, (L, 1, 1), \text{существует, справа})$ – условие применения продукции. Для рассматриваемого примера продукция применяется при установке существующего ТСОДД типа $j=2$ (светофорный объект) при дислокации на расстоянии L от начала оси на независимой опоре, в группировке 1, справа от оси дороги;

B : $(1.17, 1, 1, (L-150 \dots 300, 1, 1), \text{требуется установить, справа})$ – следствие применения продукции. При текущих условиях необходимо установить дорожный знак 1.18 «Светофорное регулирование», ТСОДД типа $j=1$ (дорожный знак) на расстоянии $L = 150 \dots 300$ м от начала оси на независимой опоре, в группировке 1, справа от оси дороги. Расстояние $L = 150 \dots 300$ м задается интервалом для выполнения требования п.5.2.2 ГОСТ 52289, применяемого для всех предупреждающих знаков.

Проектирование схем ОДД должно учитывать федеральные, региональные и муниципальные нормы, а также местные традиции. Типовые схемы ОДД упрощают процесс, но иногда требуются нестандартные решения из-за особенностей УДС.

Метод поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением предлагает применение пространственно-функциональной декомпозиции к дорожной обстановке, рекурсивно разделяя рассматриваемый участок УДС в его границах (l_B, l_E) на анализируемые подучастки, формируемые на основе общности свойств и выполняемых функций для транспортного процесса на заданном пространстве подучастка.

Тогда целевая схема ОДД $S_{B,E}^*$ на участке УДС $District_{B,E}$ с существующей ОДД $S_{B,E}$ для целевой функции θ будет формироваться с помощью рекурсивной функции:

$$S_{B,E}^* = \text{Solve}(District_{B,E}, S_{B,E}, \theta),$$

где $\text{Solve}()$ – функция нахождения решения. Определим функцию нахождения решения следующим образом.

В случае, если текущий рассматриваемый участок $District_{B,E}$ соответствует одной из типовых схем $S_{template}$, то типовая схема $\hat{S}_i \in S_{template}$ с наилучшим результатом целевой функции $\theta(\hat{S}_i)$ применяется как опорное решение

$$S_{B,E}^P: (S_{B,E} \subset S_{template}) \rightarrow S_{B,E}^P = \text{Merge}(S_{B,E}^P, \text{argmin}_{\hat{S}_i \in S_{template}}(\theta(\hat{S}_i))),$$

где $\text{Merge}()$ – функция объединения двух схем ОДД. При этом опорное решение для новых участков УДС может быть инициализировано пустым множеством $S_{B,E}^P = \emptyset$ или принимать значение текущей схемы ОДД для существующих участков УДС $S_{B,E}^P = S_{B,E}$.

В случае, если текущий рассматриваемый участок $District_{B,E}$ не соответствует ни одной из типовых схем, осуществляется разделение участка на множество подучастков с помощью функции $\text{Split}()$ и выполняется рекурсивный вызов функции

$$\text{Solve}(): (S_{B,E} \notin S_{template}) \rightarrow S_{B,E}^P = \text{Merge}(S_{B,E}^P, \text{Solve}(\text{Split}(District_{B,E}), S_{B,E}, \theta)).$$

Условие останова рекурсии – текущий рассматриваемый участок $District_{B,E}$ соответствует пустому множеству:

$$(District_{B,E} \in \emptyset) \rightarrow S_{B,E} = \emptyset.$$

Функция $Merge(S_1, S_2)$ выполняется с учетом составляющих схемы ОДД отдельных ТСОДД s_i , включенных в каждую из схем ОДД. При этом для ТСОДД, присутствующих в S_2 , но отсутствующих в S_1 , устанавливается состояние $act = \text{"требуется установить"}$, для отсутствующих в схеме ОДД S_2 ТСОДД устанавливается $act = \text{"требуется демонтировать"}$, для присутствующих в обеих схемах ОДД устанавливается статус $act = \text{"установлен"}$. После этого исключаются дублирующие друг друга ТСОДД, установленные в рамках одной пространственной локации l_k на одной стороне $side$.

Полученная в результате целевая схема ОДД $S_{B,E}^*$ должна пройти проверку по базе знаний требований для удовлетворения условиям. Для каждого предлагаемого проектного решения необходимо обеспечить проверку ограничения пропускной способности с помощью средств транспортного моделирования.

Для проверки эффективности предложенного метода проведены вычислительные эксперименты. Для этого выполнено построение схем ОДД для участков УДС различного размера и сложности (различия в количестве полос движения и участке прохождения автодороги). Реализация метода обеспечивает формирование схемы ОДД менее чем за 10 мин. для дорог протяженностью до 50 км. Время формирования схемы ОДД напрямую зависит от длины участка УДС и насыщенности инфраструктуры этого участка пересечениями, примыканиями, остановками общественного транспорта, парковками.

В процессе принятия проектных решений, помимо дорожной информации, требуется обрабатывать текстовую информацию нормативно-правовых и нормативно-технических актов, описывающих правила и типовые схемы применения ТСОДД в схемах ОДД. Кроме этого, необходимо обеспечить возможность проверки проектных решений в схеме ОДД по различным критериям оценки эффективности непосредственно в процессе проектирования.

В третьей главе предложены алгоритмы обработки и трансформации разнородной информации цифровых структурных схем ОДД в процессе информационной поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением. Приведено описание алгоритма, предназначенного для обработки текстовой информации в процессе информационной поддержки принятия решений, позволяющего извлечь и формализовать правила применения ТСОДД. Приведено описание алгоритма трансформации дорожной информации для оценки эффективности проектных решений непосредственно в процессе проектирования. Приведены результаты вычислительных экспериментов, подтверждающие эффективность предложенных алгоритмов. Представлена методика цифровизации процессов разработки, рассмотрения, согласования и утверждения проектов ОДД.

Алгоритм обработки текстовой информации в процессе информационной поддержки принятия решений позволяет оцифровать правила применения ТСОДД, описанные в нормативной технической документации. Алгоритм базируется на методах обработки естественного языка, методах на основе искусственного интеллекта, больших языковых моделях (LLM) и продукционной модели.

При создании базы знаний из текста технического стандарта, регулирующего применение ТСОДД, важно извлечь ключевые атрибуты $D = \{d_j\}$, $j = \overline{1..M}$, характеризующие конкретные ТСОДД, условия и правила их применения.

Алгоритм предполагает выполнение следующих шагов:

Шаг 1. На вход поступает машиночитаемый текст T технического стандарта общим объемом N символов.

Шаг 2. Машиночитаемый текст T разбивается на K частей по n символов в каждой, т.е. $K = \lceil N/n \rceil$, при этом размер блоков текста n выбирается исходя из вычислительных возможностей аппаратного обеспечения.

Шаг 3. Для каждой t_k из K частей текста T осуществляется следующая последовательность шагов.

Шаг 3.1. Для каждого атрибута d_j из множества D выполняется:

Шаг 3.1.1. Часть текста t_k и атрибут d_j встраиваются в prompt-запрос.

Шаг 3.1.2. Prompt-запрос поступает на вход LLM.

Шаг 3.1.3. LLM генерирует ответ по найденному атрибуту на каждую t_k часть текста документа.

Шаг 3.2. Объединение полученных ответов в один массив $\{d_j\}_{\forall(d_j \in D), t_k}$.

Шаг 4. Объединение полученных ответов в единый массив ответов $\{d_j\}_{\forall(d_j \in D, t_k \in T)}$.

Шаг 5. По каждому ответу осуществляется поиск ответа в исходном тексте, что позволяет верифицировать полученные результаты, для этого последовательно выполняются:

Шаг 5.1. Поиск по точному совпадению.

Шаг 5.2. Поиск на основе регулярных выражений.

Шаг 5.3. Поиск с учетом неточностей (нечеткий поиск).

Шаг 6. По набору верифицированных атрибутов \hat{D} осуществляется формирование правил, для чего на вход LLM подаются наборы верифицированных атрибутов $\hat{D} = \{\hat{d}_j\}$ и промпт для формирования правила в формате $(i); Q; P; A \rightarrow B; N$.

Шаг 7. Набор правил сохраняется в виде базы знаний и алгоритм завершается.

Приведены вычислительные эксперименты для наиболее объемных технических стандартов в области ОДД (табл. 1).

Таблица 1. Результаты вычислительных экспериментов по извлечению правил

Документ	Объем текста документа, символов	Кол-во извлеченных правил	Время извлечения, с	Точность (precision)	Полнота (recall)	F1-мера
ГОСТ Р 52289-2019	232 943	547	4 397	0,952	0,843	0,894
ГОСТ Р 52290-2024	43 451	62	3 412	0,934	0,882	0,907
СП 396.1325800.2018	308 697	669	5 115	0,961	0,833	0,892

Эксперименты показали, что с помощью предложенного алгоритма с высокими показателями точности и полноты могут быть обработаны документы, содержащие до 300 000 символов, что позволяет использовать алгоритм для первоначального наполнения и поддержания базы знаний в актуальном состоянии.

Для оценки эффективности проектных решений непосредственно в процессе проектирования предложен *алгоритм трансформации дорожной информации* «на лету», позволяющий специалистам-проектировщикам оценивать проектные решения по целому ряду параметров в режиме «онлайн», не погружаясь в процессы создания, идентификации и верификации транспортных моделей.

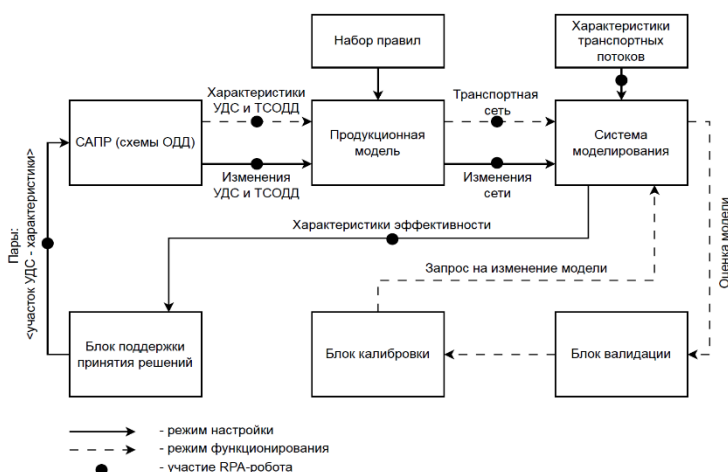


Рис. 2. Схема процесса интеграции данных

Предложенный алгоритм обеспечивает трансформацию мультиструктурной и мультимодальной информации, описывающей проектные решения, для оценки их эффективности с использованием средств моделирования (рис. 2). В алгоритме задача получения данных решается с помощью настраиваемых программных роботов (RPA), обработка данных осуществляется на основе производственной модели, а анализ данных выполняется с использованием микромоделей транспортных потоков. Так, RPA-робот имитирует работу человека и взаимодействует с системами транспортного проектирования и моделирования через графический интерфейс, а применение производственной модели позволяет формализовать правила для разработчиков схем ОДД.

Алгоритм предполагает последовательное выполнение следующих шагов:

Шаг 1. Из схемы ОДД извлекаются атрибуты, определяющие геометрические характеристики УДС, условия и особенности движения на участках УДС;

Шаг 2. Формируется набор правил преобразования информации;

Шаг 3. Выполняется идентификация параметров используемой транспортной модели по характеристикам транспортных потоков;

Шаг 4. Выполняется валидация транспортной модели;

Шаг 5. В случае необходимости, выполняется калибровка транспортной модели;

Шаг 6. Осуществляется извлечение проверяемых решений и внесение их в транспортную модель;

Шаг 7. Проводится экспериментальное исследование функционирования элементов транспортной модели для разработанных проектных решений в текущих и прогнозируемых параметрах («до – после»);

Шаг 8. Данные по оценке текущего варианта проектных решений представляются оператору в виде схемы ОДД.

Выполнены вычислительные эксперименты для проверки эффективности предложенного алгоритма на сложных УДС г. Самары (рис. 3).

В ходе экспериментов оценивалось время выполнения операций трансформации информации при следующих условиях: при введении запрета остановки транспортных средств вдоль проезжей части, строительства остановок общественного транспорта вне проезжей части, корректировки светофорных циклов. Результаты вычислительных экспериментов приведены на рис. 4.



Рис. 3. Участки УДС для проведения вычислительного эксперимента

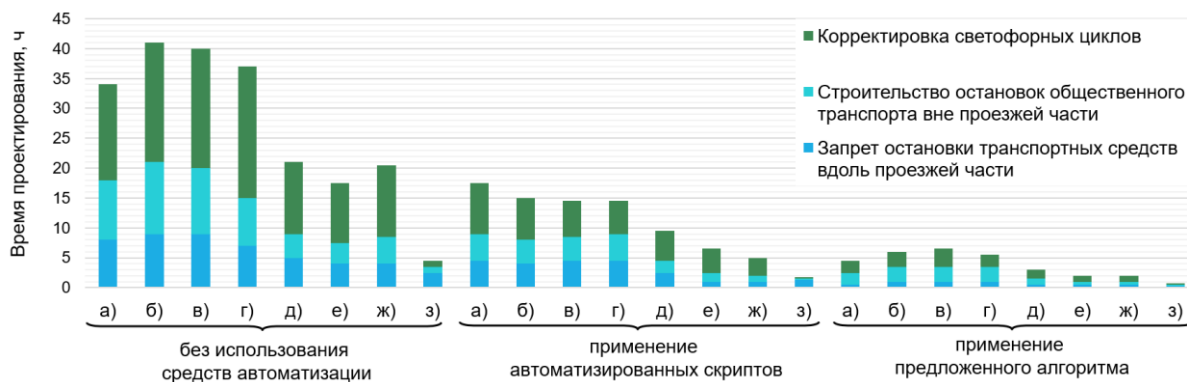


Рис.4. Результаты вычислительного эксперимента

Зафиксировано снижение трудоемкости при использовании предложенного алгоритма в среднем на 87% по сравнению с проектированием без использования средств автоматизации, и в среднем на 65% по сравнению с проектированием с использованием скриптов. На практике это позволит обеспечить повышение оперативности при оценке проектных решений и избавит проектировщика от необходимости выполнять работы по модификации транспортной модели при проверке проектных решений.

Предложена методика цифровой трансформации процессов разработки схем и проектов ОДД. Методика описывает правила формирования среды, в которой происходит объединение различных потоков данных, представленных в разных форматах в различных системах, собираемых из множества источников.

В четвертой главе описаны назначение и возможности разработанной системы поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, использующая предложенные во второй и третьей главах диссертации модели, методы и алгоритмы. Рассматривается применение системы для разработки схем ОДД в г. Киров и г. Самара. Приведены результаты проведенных экспериментов.

Разработанные модели, методы и алгоритмы обработки данных реализованы в составе СППР для цифрового проектирования ОДД. СППР базируется на трех разработанных программах для ЭВМ: программное обеспечение передвижной дорожной лаборатории для обследования транспортной инфраструктуры (AnchorLab); геоинформационная система интеграции и анализа неструктурированных данных на основе искусственного интеллекта (AnchorGIS); система поддержки принятия проектных решений в процессе разработки цифровых проектов организации дорожного движения (AnchorDSS).

СППР генерирует сценарные предложения по модификации ТСОДД, визуализируя рекомендации по изменению схемы ОДД. Проектировщик верифицирует предложенные мероприятия, после чего СППР передает данные в имитационную среду для оценки эффективности. Моделирование выполняется в режиме «исходное состояние» и режиме «проектное решение» с расчетом ключевых показателей (рис. 5).

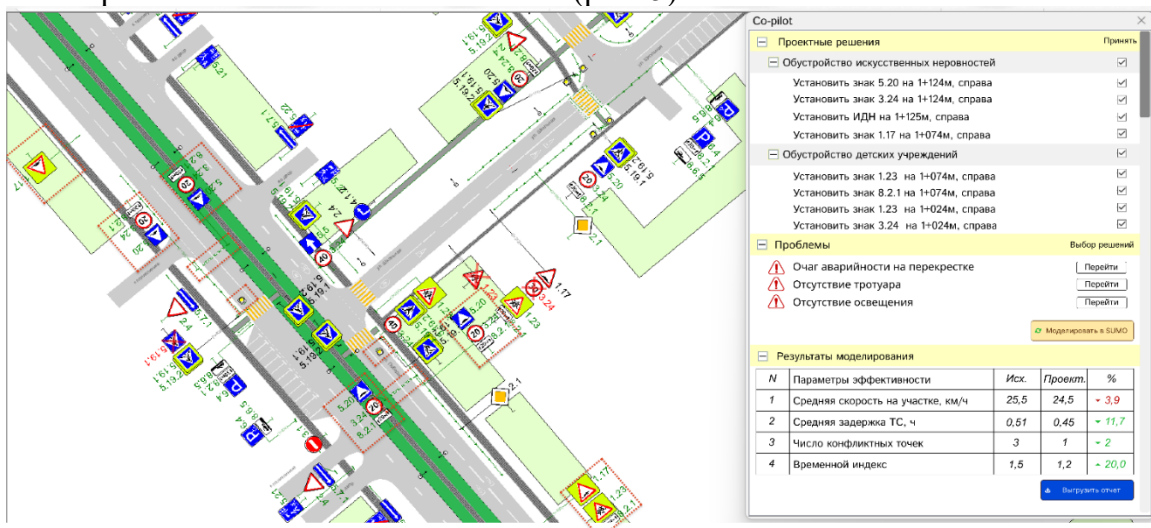


Рис. 5. Система поддержки принятия проектных решений – моделирование и анализ предлагаемых решений

Выполнена апробация разработанных моделей, методов, алгоритмов и программного обеспечения при разработке проектов (схем) ОДД и оценке их эффективности для участков УДС. Сбор исходных данных осуществлялся с использованием AnchorLab и передвижной дорожной лаборатории «Трасса» на базе автомобиля Geely Atlas. В качестве системы проектирования ОДД использована IndorTrafficPlan, в качестве средства моделирования – SUMO. Дорожные данные обработаны в AnchorGIS. В ходе исследования применялась AnchorDSS.

Исследование проводилось в ходе разработки проектной документации (схем) для ОДД на 68 улицах г. Самара суммарной протяженностью 156,3 км. Улицы расположены в разных районах города, отличающихся загруженностью УДС, составом транспортного потока, наличием общественного транспорта, числом точек притяжения, потребностью в парковочных местах. Сформированы схемы ОДД по указанным участкам УДС («до») и построены транспортные модели, далее с помощью предложенных в диссертации решений осуществлялось проектирование ОДД и внедрение разработанных проектных решений («после»). Проанализирована эффективность внедрения проектных решений в различных условиях. При моделировании оценивалось среднее время движения транспортных средств по участку УДС на поездку (табл. 2).

Таблица 2. Средние временные затраты на поездку

Метод проектирования	Исходная ситуация (0)				Запрет остановки транспортных средств вдоль проезжей части (1)				Строительство остановок общественного транспорта вне проезжей части (2)				Корректировка светофорных циклов (3)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Среднее время проезда, с	1271	1651	1117	1370	1213	1543	1109	1270	1150	1513	1080	1250	1150	1430	1070	1260

Другие показатели для участков УДС г. Самары, на которых проводилось обследование, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели оценки УДС для г. Самара

№	Показатель	Ед. изм.	«До»	«После»	Изменение
1.	Относительная аварийность	ДТП на 1 млн. авт.-км	0,57	0,53	-7,0%
2.	Средняя задержка транспортных средств в движении на километр УДС	ч/км	9,3	7,6	-18,3%
3.	Временной индекс на УДС	Относительная оценка	1,6	1,47	-8,1%
4.	Уровень обслуживания дорожного движения	Относительная оценка	D	C	-
5.	Показатель перегруженности дорог	Относительная оценка	0,19	0,12	-36,8%
6.	Буферный индекс	Относительная оценка	0,42	0,32	-23,8%

Таким образом, разработанные схемы ОДД обеспечивают повышение безопасности и эффективности дорожного движения.

Также с использованием предложенной СППР разработаны схемы ОДД для автомобильных дорог общего пользования местного значения на улично-дорожной сети г. Киров суммарной протяженностью 147,14 км. С использованием полученных в диссертации результатов разработано 137 локальных проектов управления транспортом в течение 2024–2025 гг. в ООО «ИнфраТрансПроект». Апробация показала, что применение результатов, полученных в диссертации, обеспечивает снижение временных затрат в среднем в 2 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Цель работы достигнута, при этом получены следующие результаты и выводы:

1. Проведен анализ актуальных задач и современных научно-технических решений в области информационной поддержки при разработке проектов организации дорожного движения. Сегодня информационные технологии оказывают значительное влияние на развитие транспортной инфраструктуры России, повышая эффективность дорожного движения и снижая аварийность, что способствует устойчивому экономическому развитию. Однако увеличение сложности транспортной системы создает новые проблемы, требующие учета множества факторов, включая характеристики УДС, применяемые средства ОДД и нормы законодательства. Для решения этих вопросов необходима интеграция и обработка разнородной информации из различных источников, таких как ПДЛ, картографические сервисы, мониторинговые системы транспорта, ИТС и АСУДД;

2. Предложена модель цифровых структурных схем для системного анализа организации дорожного движения в условиях сложной дорожно-транспортной обстановки. Модель обеспечивает инфраструктурное упорядочивание элементов улично-дорожной сети и технических средств организации дорожного движения. Модель служит концептуальной основой для всего последующего процесса: от описания характеристик участков УДС и конфигурации схем ОДД до формализации целевой функции и наложения ограничений в процессе разработки схем ОДД. Модель учитывает необходимую пространственную привязку всех элементов системы управления дорожным движением и позволяет СППР оперировать реальными объектами в их географическом контексте, при этом для визуализации могут быть использованы различные условные обозначения;

3. Разработан метод поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением, отличающийся применением пространственно-функциональной декомпозиции к дорожно-транспортной обстановке и позволяющий интегрировать доступную информацию и поддерживать множественные представления и требования различных заинтересованных сторон к схемам организации дорожного движения. Реализация метода обеспечивает возможность формировать схемы ОДД для УДС протяженностью до 50 км;

4. Разработаны алгоритмы обработки и трансформации разнородной информации в процессе информационной поддержки принятия проектных решений по управлению дорожным движением. Проведенные вычислительные эксперименты показывают, что с помощью предложенного алгоритма обработки текстовой информации в процессе информационной поддержки принятия решений могут быть обработаны документы, содержащие до 300 000 символов. Применение предложенного алгоритма трансформации дорожной информации для оценки эффективности проектных решений снижает трудозатраты, связанные с оценкой

эффективности плановых мероприятий по управлению дорожным движением, в среднем на 87% по сравнению с проектированием без использования средств автоматизации;

5. Разработана система поддержки принятия решений по управлению дорожным движением, реализующая предложенные модели, методы и алгоритмы. Выполнена апробация разработанных методов, алгоритмов и программного обеспечения при разработке проектов и схем ОДД для участков УДС в г. Самара (суммарной протяженностью 156,3 км) и г. Киров (суммарной протяженностью 147,14 км). По данным, полученным в ходе симуляционного моделирования, разработанные схемы и проекты ОДД обеспечивают повышение безопасности и эффективности дорожного движения. Использование предложенных в диссертации решений обеспечивает снижение времени, затрачиваемого на проектирование схем ОДД, в среднем в 2 раза.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Математическая модель стандарта ITS GIS по качеству функционала, комплексной дислокации и визуализации геообъектов / В. В. Елизаров, Н. А. Остроглазов, **Е. В. Чекина**, А. И. Чугунов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 6-2(86). С. 352–357. EDN FJYZIN. (**ВАК**)

2. Разработка модели повышения качества управления инновациями на промышленном предприятии / Н. В. Родионов, Р. С. Загидуллин, Т. С. Филиппова, **Е. В. Чекина** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 6. С. 266–273. DOI 10.24412/2071-6168-2021-6-266-273. EDN KVXCXG. (**ВАК**)

3. Чекина, Е. В. Цифровая трансформация процесса разработки проектов организации дорожного движения / **Е. В. Чекина**, О. К. Головнин // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 12. С. 206–209. EDN GBLMAO. (**ВАК**)

4. Чекина, Е. В. Системный анализ и информационное моделирование транспортно-логистической системы с автономными агентами / **Е. В. Чекина** // Научно-технический вестник Поволжья. 2025. № 10. С. 116–119. EDN HWFUPS. (**ВАК**)

5. Чекина, Е. В. Обработка информации систем мониторинга транспортной инфраструктуры при разработке цифровых проектов организации дорожного движения / **Е. В. Чекина**, О. К. Головнин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2025. № 4(56). С. 125–138. EDN GCINTO. (**ВАК**)

6. Головнин, О. К. Алгоритм извлечения правил применения технических средств организации дорожного движения из текстов технических стандартов / О. К. Головнин, **Е. В. Чекина**, М. В. Шестакова // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2025. Т. 14, № 4(72). С. 107–113. EDN HOOLPZ. (**ВАК**)

7. Головнин, О. К. интегральный мониторинг показателей функционирования транспортных систем / О. К. Головнин, **Е. В. Чекина**, Д. М. Иванова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2026. Т. 14, № 1(52). 9. DOI 10.26102/2310-6018/2026.52.1.003. EDN UJDKVN. (**ВАК**)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688855 Российская Федерация. Геоинформационная система интеграции и анализа неструктурированных данных на основе искусственного интеллекта : № 2024687958 : заявл. 18.11.2024 : опубл. 02.12.2024 / О. К. Головнин, **Е. В. Чекина**. EDN ASKORQ.

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024690758 Российская Федерация. Система поддержки принятия проектных решений в процессе разработки цифровых проектов организации дорожного движения : № 2024687752 : заявл. 18.11.2024 : опубл. 17.12.2024 / О. К. Головнин, **Е. В. Чекина**. EDN DWMRSC.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025610964 Российская Федерация. Программное обеспечение передвижной дорожной лаборатории для обследования транспортной инфраструктуры "AnchorLab" : заявл. 26.12.2024 : опубл. 16.01.2025 / **Е. В. Чекина**, О. К. Головнин. EDN IQVMXF.

Публикации в других научных изданиях

11. Чекина, Е. В. Создание онлайн-сервиса для автоматизированной разработки проектов организации дорожного движения [Электронный ресурс] / **Е. В. Чекина**, О. К. Головнин, Т. И. Михеева // Математика. Компьютер. Образование : тезисы докладов 25 международной конференции. Дубна, 2018. URL : <http://www.mce.su/rus/archive/abstracts/mce25/sect101361/doc312014/>.
12. Mikheeva, T. I. Digital transformation of network-centric geo-visualization transport infrastructure / T. I. Mikheeva, S. V. Mikheev, A. N. Tikhonov, **E. V. Chekina** // *Advances in Intelligent Systems Research*. 2020. Vol. 174. P. 200–202. DOI 10.2991/aistr.k.201029.038.
13. Чекина, Е. В. Построение цифровых двойников автомобильных дорог в среде интеллектуальной транспортной геоинформационной системы / **Е. В. Чекина** // ИТ & Транспорт : Сборник научных статей. Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственный центр "Интеллектуальные транспортные системы", 2021. С. 88–92. EDN JGMINS.
14. Чекина, Е. В. Анализ технико-экономических и эксплуатационных характеристик функционирования систем обследования транспортной инфраструктуры / **Е. В. Чекина** // ИТ & транспорт / ит & транспорт. Самара: Общество с ограниченной ответственностью "Научно-производственный центр "Интеллектуальные транспортные системы", 2024. С. 66–74. EDN CWINBS.
15. Чекина, Е. В. Информационная поддержка в процессе проектирования схем организации дорожного движения на основе интеллектуального анализа данных / **Е. В. Чекина** // Новые информационные технологии в научных исследованиях : Материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 27–29 ноября 2024 года. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2024. С. 150. EDN LBYFLY.
16. Чекина, Е. В. Методика трансформации дорожной информации для моделирования транспортных потоков / **Е. В. Чекина**, О. К. Головнин // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике : сборник статей XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию ректора Пензенского политехнического института Николая Петровича Сергеева и 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. Пенза: Пензенский государственный университет, 2025. С. 316–321. EDN GEEXFP.
17. Chekina, E. Sharing Transport Planning Information in Traffic Simulation Software / **E. Chekina**, O. Golovnin // 7th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA) / IEEE Xplore. 2025. P. 353–358. DOI: 10.1109/SUMMA68668.2025.11302212.
18. Chekina, E. V. A data-driven approach to decision-support system development for road traffic management/ **E. V. Chekina**, O.K. Golovnin // Fourth International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE 2025) / Proceedings of SPIE. 2025. Vol. 13662. 136620M. DOI: 10.1117/12.3072612.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.02,
созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
(протокол № 5 от «2» апреля 2026 г.)

Заказ № ____ . Формат 60x84 1/16 Усл. печ. л. 1.25. Тираж 100 экз.
Отпечатано в типографии Самарского государственного технического университета.
Отдел типографии и оперативной печати
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.