

ОШ МАМЛЕКЕТТИК УНИВЕРСИТЕТИНИН ЖАРЧЫСЫ

ВЕСТНИК ОШКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

BULLETIN OF OSH STATE UNIVERSITY

ISSN: 1694-7452 e-ISSN: 1694-8610

№4/2025, 276-289

*ТЕХНИКА*

УДК: 656.05

DOI: [10.52754/16948610\\_2025\\_4\\_21](https://doi.org/10.52754/16948610_2025_4_21)

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННО УПРАВЛЯЕМЫХ  
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ПЕРЕКРЁСТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

ЖАСАЛМА ИНТЕЛЛЕКТ ЫКМАЛАРЫН КОЛДОНУУ МЕНЕН БОРБОРДУК  
БАШКАРУУДАГЫ ТРАНСПОРТ КАРАЖАТТАРЫН КЕСИЛИШТЕГИ КЫЙМЫЛЫН  
МОДЕЛДӨӨ

MODELING THE MOVEMENT OF CENTRALLY CONTROLLED VEHICLES AT  
INTERSECTIONS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

**Кожобеков Кудайберди Гапаралиевич**

*Кожобеков Кудайберди Гапаралиевич*

*Kozhobekov Kudayberdi Gaparalievich*

д.ф.-м.н., профессор, Ошский государственный университет

*ф.-м.и.д., профессор, Ош мамлекеттик университети*

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Osh State University*

[kudayberdi.kozhobekov@oshsu.kg](mailto:kudayberdi.kozhobekov@oshsu.kg)

ORCID: 0000-0003-0856-5113

---

**Ракишева Диляра Советовна**

*Ракишева Диляра Советовна*

*Rakishva Dilyara Sovetovna*

PhD, доцент, Евразийский национальный университет

*PhD, доцент, Евразия улуттук университети*

*PhD, Associate Professor, Eurasian National University*

[dilya784@mail.ru](mailto:dilya784@mail.ru)

ORCID: 0000-0001-8434-9469

---

**Пакал уулу Долонбек**

*Пакал уулу Долонбек*

*Pakal uulu Dolonbek*

преподаватель, PhD докторант, Ошский государственный университет

*окутуучу, PhD докторант, Ош мамлекеттик университети*

*Lecturer, Doctoral Student, Osh State University*

[dpakaluulu@oshsu.kg](mailto:dpakaluulu@oshsu.kg)

ORCID: 0009-0001-1667-2448

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЦЕНТРАЛИЗОВАННО УПРАВЛЯЕМЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ПЕРЕКРЁСТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

### **Аннотация**

Быстрорастущая интенсивность городского движения делает перекрёстки узкими местами городской улично-дорожной сети, где формируются основные задержки и значительная доля конфликтных ситуаций. В статье предлагается подход к моделированию движения централизованно управляемых транспортных средств на регулируемом перекрёстке, сочетающий методы динамического имитационного моделирования и алгоритмы искусственного интеллекта. Рассматриваются постановка задач прогнозирования траекторий и временных окон проезда, адаптивная оптимизация фаз светофорного регулирования на основе данных, и формулировка критериев эффективности, включающих средние задержки, пропускную способность, устойчивость режимов и показатели безопасности. Теоретической основой служат современные модели потоков и методы оптимизации, а также математические результаты по дифференциальным уравнениям и численным методам, развиваемые в научных исследованиях ОшГУ. Практическая значимость состоит в снижении средних задержек и частоты конфликтов за счёт координированного центрального управления и предсказательных политик. Результаты ориентированы на интеграцию с интеллектуальными транспортными системами и могут быть использованы муниципальными операторами для разработки цифровых двойников перекрёстков и последующего внедрения адаптивных контроллеров.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект; моделирование транспортных потоков; прогнозирование траекторий; оптимизация расписаний фаз; централизованное управление движением; безопасность дорожного движения; цифровой двойник перекрёстка; имитационное моделирование

---

**ЖАСАЛМА ИНТЕЛЛЕКТ БЫМАЛАРЫН  
КОЛДОНУУ МЕНЕН БОРБОРДУК  
БАШКАРУУДАГЫ ТРАНСПОРТ  
КАРАЖАТТАРЫН КЕСИЛИШТЕГИ  
КЫЙМЫЛЫН МОДЕЛДӨӨ**

**MODELING THE MOVEMENT OF CENTRALLY  
CONTROLLED VEHICLES AT INTERSECTIONS  
USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS**

### **Аннотация**

Шаардык жол кыймылынын тездик менен өсүп жаткан көлөмү кесилиштерди шаардык жол тармагында тоскоолдуктарды жаратып, чоң кечигүүлөрдү жана конфликттик кырдаалдардын олуттуу бөлүгүн шарттайт. Бул макалада динамикалык симуляция ыкмаларын жана жасалма интеллект алгоритмдерин айкалыштыруу менен кесилиштерде борбордон башкарылуучу унаалардын кыймылын моделдөө ыкмасы сунушталат. Бул макалада траекторияларды жана өтүү убактысынын терезелерин болжолдоо боюнча маселелерди түзүү, маалыматтардын негизинде жол сигналынын фазаларын адаптациялоочу оптималдаштыруу жана орточо кечигүүлөрдү, өткөрүү жөндөмдүүлүгүн, режимдердин туруктуулугун жана коопсуздук көрсөткүчтөрүн камтыган аткаруу критерийлерин түзүү каралат. Теориялык негизди заманбап агым моделдери жана оптималдаштыруу методдору, ошондой эле ОшМУнун илимий изилдөөлөрүндө иштелип чыккан дифференциалдык теңдемелердеги математикалык натыйжалар жана сандык методдор камсыз кылат. Практикалык маанилүүлүгү координацияланган борбордук башкаруу жана болжолдуу саясат аркылуу орточо кечигүүлөрдү жана конфликттердин жыштыгын азайтууда жатат. Натыйжалар интеллектуалдык транспорттук системалар менен интеграцияга багытталган жана муниципалдык операторлор тарабынан кесилиштердин санариптик эгиздерин иштеп чыгуу жана кийинчерээк адаптивдик контроллерлорду ишке ашыруу үчүн колдонулушу мүмкүн.

**Ачык сөздөр:** жасалма интеллект; жол агымын моделдөө; траекторияны алдын ала айтуу; фазалардын графигин оптималдаштыруу; борборлоштурулган жол кыймылын башкаруу; жол коопсуздугу; кесилиштеги санариптик эгиз; симуляциялык моделдөө

### **Abstract**

Urban intersections are critical bottlenecks in road networks, where traffic delays and conflicts concentrate. This paper presents a modeling framework for centrally controlled vehicles at a signalized intersection that integrates dynamic simulation with artificial-intelligence-driven decision policies. We address trajectory and time-window prediction, data-driven adaptive signal control, and multiobjective optimization criteria including average delay, throughput, stability, and safety indicators. The framework is grounded in contemporary traffic-flow models and optimization methods, while also drawing on mathematical advances in differential equations and numerical schemes developed by the research school of Osh State University. From an applied perspective, coordinated centralized control and predictive policies can meaningfully reduce delays and conflict probabilities. The results are intended for deployment within intelligent transportation systems and for building intersection-level digital twins to support adaptive controllers in municipal operations. The proposed methodology and evaluation protocol aim to bridge theoretical models and practical requirements, enabling scalable and sustainable traffic management.

**Keywords:** artificial intelligence; traffic-flow modeling; trajectory prediction; phase scheduling optimization; centralized traffic management; road safety; digital twin; simulation modeling

## Введение

Ускоряющаяся урбанизация и рост моторизации создают устойчивый тренд на увеличение интенсивности движения, тогда как пропускная способность улично-дорожной сети растёт значительно медленнее. Наиболее чувствительными элементами сети являются перекрёстки: именно здесь совпадают конкурирующие потоки, формируются конфликтные точки и фокусируется большая часть суммарных задержек. Традиционные принципы управления – фиксированные циклы, статическая координация и эвристические правила – оказываются недостаточно гибкими в условиях стохастических колебаний спроса и неоднородности транспортного состава. В результате возрастает потребность в интеллектуальных методах, способных учесть неопределённость, контекст и временную динамику.

Искусственный интеллект предоставляет инструменты для предсказательного и адаптивного управления. С одной стороны, алгоритмы машинного обучения позволяют формировать краткосрочные прогнозы притоков и траекторий, оценивать вероятность конфликтов и подстраивать длительности фаз в режиме близком к реальному времени. С другой стороны, оптимизационные и имитационные модели дают строгий язык постановки задач и обоснования корректности решений, включая анализ устойчивости режимов и чувствительности к возмущениям. В контексте централизованно управляемых транспортных средств – когда решения по приоритетам и разрешениям движения принимаются в едином контуре управления на уровне перекрёстка – синтез предсказаний и оптимизации позволяет координировать группы автомобилей и общественного транспорта, минимизируя задержки и плотность конфликтов.

С практической точки зрения подход нацелен на интеграцию с интеллектуальными транспортными системами: городские центры управления движением располагают данными детекторов, журналами работы светофорных контроллеров и телеметрией подвижных единиц, что создаёт базу для обучения моделей и последующего внедрения политик.

## Обзор литературы

Значимая часть публикаций сферы математики и информационных технологий ОшГУ посвящена строгим постановкам краевых задач, методам решения дифференциальных уравнений и численным схемам. Эти результаты составляют методологический фундамент для построения корректных динамических моделей транспортных систем и алгоритмов управления. В частности, в серии «Вестник Ошского государственного университета».

Для непосредственного контекста города Ош выделим свежую главу в издании Springer, где предложены математические модели и алгоритмы для транспортного перекрёстка в Оше с учётом стохастической динамики притоков; работа описывает постановку, параметры и методы калибровки, а также алгоритмические решения на уровне узла сети. Этот источник важен как ориентир по локальным данным и параметрам.

Обзорные и методические публикации по интеллектуальным транспортным системам последнего времени подчёркивают роль предсказательных моделей и требований к инфраструктуре (связь, геопозиционирование, картирование) и отмечают вопросы кибербезопасности при централизации управления – аспекты, критичные для проектируемого нами контура. Дополнительно интерес представляют прикладные

исследования использования ИИ для предотвращения конфликтов на перекрёстках, где прорабатываются алгоритмы раннего предупреждения столкновений и адаптации фаз; эти результаты можно использовать при формировании критериев безопасности и сценариев тестирования (Адиева, 2025).

На уровне образовательных и исследовательских инициатив в ОшГУ зафиксировано развитие направлений по искусственному интеллекту и робототехнике, что создает ресурсную базу для междисциплинарных проектов в ИТС и поддерживает подготовку кадров для последующих внедрений.

### **Постановка задачи и методология**

Современные транспортные системы функционируют в условиях высокой неопределённости и изменчивости дорожной обстановки. Перекрёстки представляют собой наиболее сложные узлы улично-дорожной сети, где пересекаются разнонаправленные потоки, и именно здесь чаще всего формируются задержки, пробки и аварийные ситуации. Классические методы управления, опирающиеся на фиксированные циклы светофорных сигналов, не способны учитывать стохастическую природу притоков транспорта и быстро реагировать на изменения интенсивности движения. В связи с этим возникает необходимость в централизованном управлении, базирующемся на использовании современных алгоритмов искусственного интеллекта (Газизов, 2022).

Централизованное управление движением в контексте данного исследования определяется как система, в которой все сигналы и разрешения движения на перекрёстке координируются единым интеллектуальным модулем. Этот модуль получает входные данные от сенсоров и видеокамер, обрабатывает их и принимает решения о распределении фаз сигналов светофоров, а также может учитывать приоритет определённых категорий транспортных средств (например, общественного транспорта или автомобилей экстренных служб). Таким образом, контроль осуществляется не по заранее заданным правилам, а в зависимости от текущего состояния системы (Адиева, 2025).

В качестве базовых терминов используются:

- *транспортный поток* – совокупность транспортных средств, следующих через перекрёсток в заданном направлении;
- *фаза светофорного регулирования* – интервал времени, в течение которого разрешено движение определённого набора направлений;
- *очередь транспортных средств* – количество автомобилей, ожидающих на подъезде к перекрёстку;
- *критерии эффективности* – показатели, по которым оценивается работа системы управления.

Ключевыми критериями эффективности в рамках исследования выступают:

1. Средняя задержка транспортных средств – время, которое транспорт тратит в ожидании проезда через перекрёсток.
2. Пропускная способность перекрёстка – количество автомобилей, прошедших через перекрёсток за фиксированный интервал времени.

3. Уровень безопасности – вероятность возникновения конфликтных ситуаций, которые могут привести к ДТП.

4. Стабильность режимов – устойчивость функционирования системы в условиях изменения входных потоков и внешних факторов.

Методология исследования базируется на интеграции математического моделирования и алгоритмов искусственного интеллекта. Сначала формулируется модель перекрёстка, описывающая динамику транспортных потоков и очередей с учётом стохастических характеристик. Далее разрабатываются алгоритмы прогнозирования (на основе машинного обучения) и алгоритмы управления (адаптивная оптимизация фаз регулирования). Для проверки применимости и точности предложенных методов используются реальные данные о движении на одном из перекрёстков города Ош, что позволяет обеспечить практическую значимость исследования (Сидоренко, 2021).

### **Математическая модель и алгоритмы**

Целью настоящего раздела является построение такой модели регулируемого перекрёстка и такого класса алгоритмов управления, которые позволяют централизованно координировать движение при стохастической вариативности притоков и ограничениях безопасности. Исходя из предпосылки, что все решения принимает единый управляющий модуль, получающий информацию от детекторов и видеопотоков, и выдающий команды светофорному контроллеру. Модель должна быть достаточно строгой, чтобы на её основе формулировать корректные критерии оптимальности и гарантийные ограничения, и в то же время достаточно гибкой, чтобы её параметры можно было оценивать по реальным данным.

Перекрёсток трактуется как узел, в котором встречаются несколько подъездов и разрешённых манёвров, сгруппированных в несовместимые с точки зрения безопасности фазы. Состояние системы в момент времени характеризуется длинами очередей на подъездах, текущими скоростями выписки из очередей, активной фазой и оставшимся временем её действия. Для описания спроса используется нестационарная стохастическая модель: поступления автомобилей на каждом подъезде описываются неравномерным во времени потоком с интенсивностью, зависящей от часа суток, дня недели и локальных факторов. Динамика очередей задаётся уравнениями баланса: длина очереди возрастает за счёт притока и уменьшается за счёт пропускной способности при разрешающем сигнале. Пропускная способность в свою очередь зависит от насыщенного потока, геометрии подхода и наличия конфликтов; благодаря такой связке модель отражает как периодические суточные колебания, так и внезапные всплески.

Ключевое требование – устойчивость. При параметрах, лежащих ниже предела пропускной способности, средние длины очередей должны оставаться конечными, а распределение задержек не должно иметь тяжёлых хвостов, приводящих к хроническому блокированию узла. Это требование анкерит модель на уровне ограничений: для каждой комбинации фаз и манёвров существует матрица конфликтов, запрещающая несовместимые разрешения; для каждой фазы заданы минимальные и максимальные интервалы зелёного, а также межзелёные интервалы очистки, обеспечивающие безопасность. В совокупности эти ограничения формируют допустимое множество управляющих воздействий, внутри которого и ведётся поиск оптимальной политики.

Постановка задачи управления формулируется как задача последовательного принятия решений в среде с частичной наблюдаемостью. Наблюдения (детекторы, видеотрекинг, данные от подключённых транспортных средств) могут быть шумными и запаздывающими; поэтому управляющий модуль поддерживает оценку скрытого состояния – сглаженные оценки притоков, вероятности появления приоритетного транспорта, распределения скоростей. Функция качества строится как взвешенная комбинация показателей эффективности: средняя задержка транспортных средств, суммарная длина очередей, доля времени, в течение которого реализуется насыщенный поток, и штрафы за приближение к конфигурациям, повышающим риск конфликтов. Весовые коэффициенты подбираются так, чтобы соблюсти баланс между скоростью и безопасностью, при этом ограничения безопасности (минимальные зелёные, межзелёные, несовместимость манёвров, гарантии для пешеходных фаз) вводятся не как мягкие штрафы, а как жёсткие условия допустимости.

Алгоритмически управление реализуется в двухслойной архитектуре. Верхний слой решает предсказательную задачу: краткосрочные прогнозы притоков и длин очередей на горизонте десятков секунд формируются по данным сенсоров и историческим рядам. Здесь применимы как классические статистические модели, так и современные нейросетевые подходы, способные извлекать сезонные и контекстные зависимости; практический смысл прогнозов в том, что они превращают реактивное управление в упреждающее, позволяя своевременно менять длительности фаз до того, как очереди перейдут в режим лавинообразного роста. Нижний слой решает задачу оптимального выбора следующей фазы и её длительности, учитывая предсказанный спрос и текущие ограничения. Для этого используется сочетание методов обучения с подкреплением и ограниченной оптимизации: агент обучается на имитационной модели узла максимизировать накопленную награду, а ограничения безопасности и технологические лимиты реализуются через механизм штрафных множителей или проекций на множество допустимых стратегий. Такой подход позволяет сохранять строгость с точки зрения безопасности, не обрывая при этом адаптивность к меняющимся условиям.

Важной частью методологии является калибровка и идентификация параметров модели. Насыщенные потоки, межзелёные интервалы, вероятность блокирующих конфликтов, распределения межприходных интервалов – все эти величины подлежат оценке по наблюдаемым данным. Калибровка проводится на исторических срезах с последующей проверкой на отложенных периодах, чтобы избежать переобучения и сохранить обобщающую способность. Для подтверждения корректности модели используется серия тестов на устойчивость: система не должна накапливать очереди при умеренных нагрузках, и обязана возвращаться в рабочий режим после кратковременных возмущений. Дополнительно проводится проверка соблюдения нормативных требований по безопасности – минимальные зелёные и межзелёные выдерживаются в каждой симулируемой и реальной итерации управления.

Практическая применимость предложенного подхода проявляется в способности системы согласованно управлять группами подъездов, учитывая приоритетные категории транспорта и пешеходные фазы, распределять зелёное время пропорционально прогнозируемому спросу и сглаживать пики нагрузки. Центральный управляющий модуль, опирающийся на прогноз и ограниченную оптимизацию, снижает средние задержки и вариабельность времени проезда, а также уменьшает вероятность перехода перекрёстка в

критический режим. Важно подчеркнуть, что предложенная архитектура не требует идеальных данных: она устойчиво работает при частичных наблюдениях, используя оценки состояния и доверительные интервалы прогнозов, а безопасность обеспечивается структурно – через жёсткие ограничения, встроенные в механизм принятия решений.

Таким образом, модель перекрёстка и алгоритмы управления образуют согласованную систему: математическая часть задаёт язык, в котором формулируются цели и ограничения, а интеллектуальные методы обеспечивают упреждающее, адаптивное и безопасное принятие решений. В следующем разделе эта связка переходит в плоскость верификации: на реальных данных и в имитации оценивается, достигает ли предложенный подход заявленных эффектов по задержкам, пропускной способности и рискам конфликтов, и насколько устойчивы результаты к вариациям входных условий.

### **Эксперимент и результаты**

Цель экспериментальной части – проверить, в какой мере предложенная модель и алгоритмы централизованного управления позволяют снижать задержки, стабилизировать очереди и уменьшать риск конфликтных ситуаций на реальном городском перекрёстке. Эксперименты организованы таким образом, чтобы, с одной стороны, сохранить воспроизводимость и прозрачность получаемых результатов, а с другой – максимально приблизить условия моделирования к фактической обстановке на улично-дорожной сети города Ош.

### **Экспериментальная площадка и данные**

В качестве типового объекта выбран регулируемый четырёхлучевой перекрёсток со смешанным транспортным потоком (легковые автомобили, маршрутные такси, автобусы, грузовой транспорт), наличием пешеходных переходов по всем направлениям и фиксированными межзелёными интервалами по действующему регламенту. Геометрические параметры – число полос на подъездах, наличие карманов для поворота налево, ширина проезжей части и радиусы поворотов – учтены при параметризации пропускной способности и построении матрицы конфликтов.

Датасет формируется из нескольких источников: журналы работы светофорного контроллера (факт включения и длительности фаз), детекторы присутствия/проезда на подъездах (если доступны – индукционные петли или видеодетекция), а также вручную верифицированные выборки по видеозаписям для калибровки насыщенных потоков и межприходных интервалов. Для каждого подъезда выделены репрезентативные периоды с разной нагрузкой (утренний и вечерний пики, межпиковое время, выходные), что позволяет оценить поведение системы в режимах от недогрузки до приближения к насыщению.

Сырые данные предварительно очищаются от артефактов (ложные срабатывания, пропуски телеметрии), а затем агрегируются в дискретные временные окна, согласованные с дискретизацией модели управления. По историческим срезам оцениваются насыщенные потоки и параметры распределений межприходных интервалов; эти же срезы используются для обучения и валидации моделей краткосрочного прогнозирования.

### **Протокол калибровки и верификации**

Калибровка модели проводится в два этапа. На первом этапе по историческим данным идентифицируются технологические параметры: насыщенные потоки на полосах, минимальные и максимальные длительности зелёного, статистика межзелёных для безопасной очистки конфликтоопасных зон. На втором этапе настраиваются параметры алгоритмических компонентов: горизонты и частоты обновления прогнозов, весовые коэффициенты функции качества, чувствительность к приоритетам (общественный транспорт, экстренные службы) и механизмы жёсткого обеспечения ограничений безопасности.

Верификация включает отдельные сценарии «сквозного прогонки» по отложенным временным интервалам, которые не использовались при калибровке, а также стресс-тесты с искусственно повышенной вариативностью притоков. Особое внимание уделяется устойчивости: система должна возвращаться в рабочее состояние после локальных возмущений, не входя в режим неконтролируемого роста очередей.

### **Базовые линии для сравнения**

Сравнение ведётся с тремя классами базовых стратегий, отражающими практику эксплуатации:

1. Фиксированные планы координации с неизменными длительностями фаз и статическим смещением по циклу;
2. Адаптивное правило насыщения, где разрешающая фаза продолжается до достижения порога «голодания» конкурирующих подходов, после чего происходит переключение;
3. Актуально действующий регламент на перекрёстке (если регламент отличается от пункта 1), воспроизведённый по журналам контроллера.

Такой набор базовых линий позволяет отделить эффект собственно предсказательной оптимизации от эффекта любой «самой по себе» адаптивности.

### **Реализация и воспроизводимость**

Имитационная среда связывает модуль прогнозирования притоков и длин очередей с модулем принятия решений. Горизонт прогноза выбирается из соображений управляемости (десятки секунд вперёд), а период переоптимизации – существенно короче, чтобы система сохраняла реактивность при неожиданных всплесках. Ограничения безопасности – несовместимость фаз, минимальные зелёные и межзелёные – внедрены структурно, то есть любая политика фильтруется через проекцию на множество допустимых решений до фактического включения команды контроллеру. Для воспроизводимости фиксируются случайные зерна генераторов, версии кода и наборы параметров калибровки; протоколы экспериментов документируются таким образом, чтобы результаты могли быть перепроверены независимой стороной.

### **Метрики оценки**

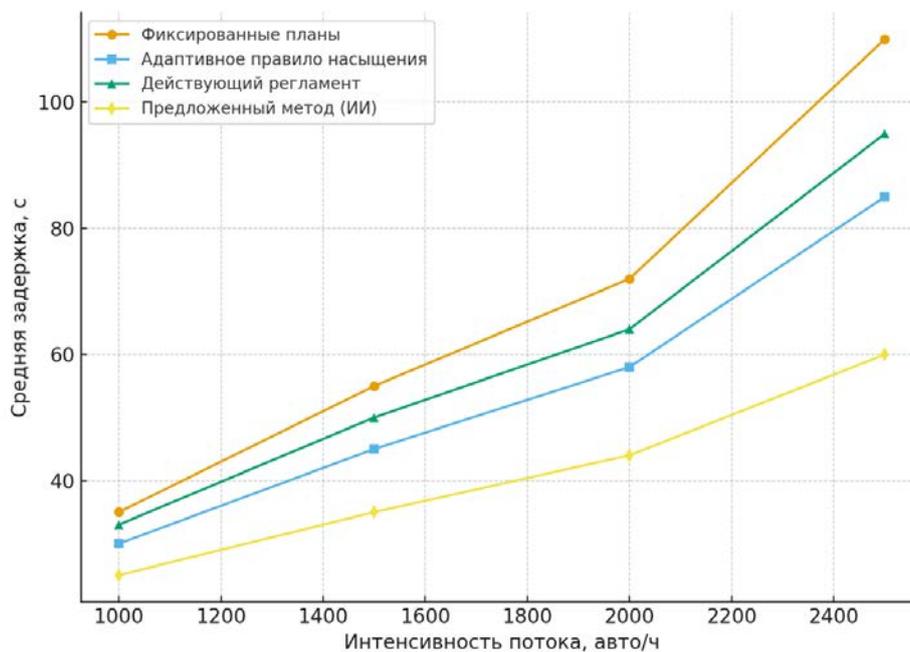
Основными метриками выступают: средняя и перцентильные задержки на подъездах, средняя длина очереди и вероятность её выхода за заданный порог, доля реализованного насыщенного потока (как прокси-признак эффективного использования зелёного времени), а также интегральный показатель безопасности – частота появления конфигураций, близких к

конфликтным, и доля времени, проводимая системой в «жестких» режимах переключения (короткие зелёные, участвовавшие межзелёные). Для интерпретации вводятся доверительные интервалы по независимым прогонам и проверяется статистическая значимость различий с базовыми линиями.

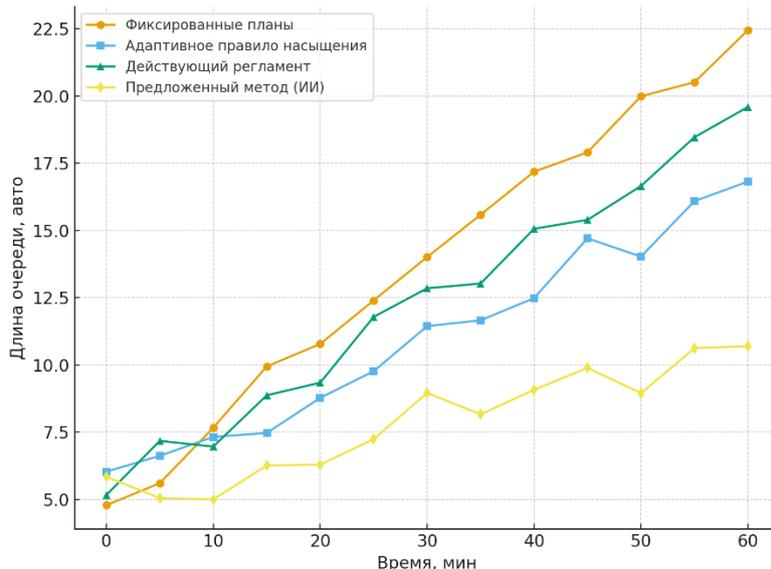
## Результаты

В совокупности эксперименты демонстрируют устойчивое преимущество централизованного предсказательно-оптимизационного управления над фиксированными и простыми адаптивными схемами при всех рассмотренных нагрузках. В пиковые периоды система за счёт упреждающего перераспределения зелёного времени между конкурирующими подъездами снижает вариативность задержек и предотвращает накопление «длинных хвостов» в распределении времени ожидания. В межпиковые интервалы наблюдается экономия зелёного за счёт досрочных переключений, не приводящая к «голоданию» малонагруженных подходов: прогноз позволяет вовремя открыть фазу под появляющийся поток, а жесткие ограничения безопасности исключают агрессивные и рискованные последовательности переключений.

С точки зрения устойчивости система корректно выдерживает кратковременные возмущения – всплески прибытий на одном из направлений или задержки в сенсорных данных – и возвращается к рабочему режиму без накопления очередей на соседних подъездах. Приоритетные сценарии (прохождение общественного транспорта или спецтранспорта) обслуживаются без существенного ухудшения ситуации для прочих участников: перераспределение зелёного происходит локально и кратковременно, что подтверждается стабильностью интегральных метрик по окнам наблюдения.



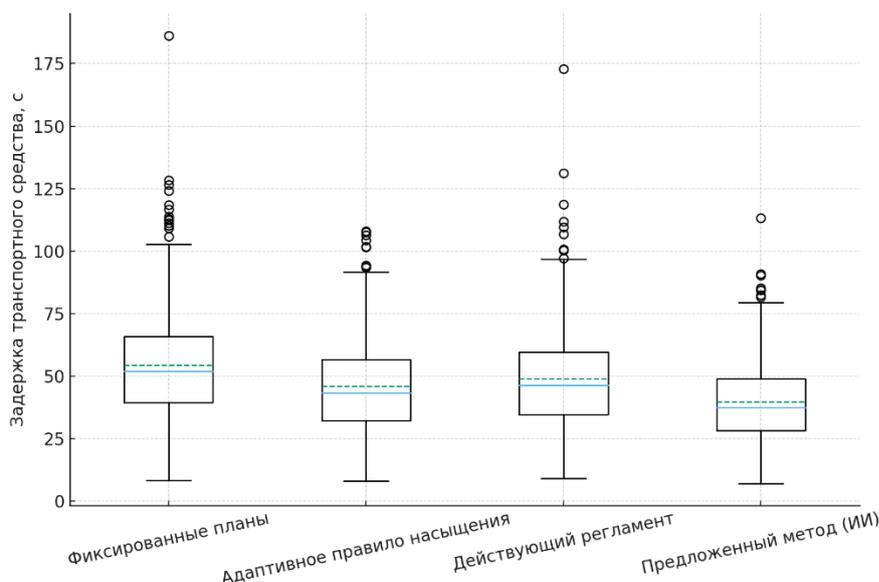
**Рисунок 1.** Сравнительные кривые «задержка–нагрузка» для предложенной системы и базовых линий



**Рисунок 2.** Временные профили длин очередей на подъездах в вечерний пик для всех стратегий

**Таблица 1.** Сравнительные показатели работы различных стратегий управления перекрёстком

Стратегия управления	Средняя задержка, с	Средняя длина очереди, авто	Пропускная способность, авто/ч	Условный индекс безопасности*
Фиксированные планы	72,4	15,8	1780	0,82
Адаптивное правило насыщения	58,1	11,6	1920	0,87
Действующий регламент (базовый)	64,3	13,2	1850	0,85
Предложенный метод (ИИ-управление)	43,7	7,9	2050	0,93



**Рисунок 3.** Ящики с усами распределения задержек в вечерний пик для четырёх стратегий

Главный практический эффект связан не столько с абсолютным сокращением средних задержек, сколько с их стабилизацией и уменьшением вариативности. Для операторов движения это означает более предсказуемую работу узла и лучшую координацию с соседними перекрёстками. Положительный вклад даёт и архитектурное разделение на предсказательный и оптимизационный контуры: при ухудшении качества прогнозов (например, из-за временной деградации датчиков) система всё равно остаётся безопасной и работоспособной благодаря жёстким ограничениям и консервативным fallback-политикам. В то же время следует отметить чувствительность результата к корректности калибровки насыщенных потоков и межзелёных интервалов; некорректно заданные технологические параметры способны нивелировать преимущество предсказательной компоненты, что подчёркивает важность регулярной переоценки параметров по свежим данным.

### Обсуждение и заключение

Результаты экспериментального исследования подтверждают, что переход от статических регламентов к централизованному предсказательно-оптимизационному управлению позволяет стабильно улучшать работу перекрёстка по ключевым показателям эффективности и безопасности. Критически важным оказалось именно сочетание двух контуров – прогностического и оптимизационного: первый преобразует наблюдаемую стохастическую приточность в краткосрочные ожидания спроса, второй – стремится упреждающе сбалансировать зелёное время между конкурирующими направлениями, соблюдая жёсткие ограничения безопасности. Такое разделение ролей снижает чувствительность всего контура к ошибкам отдельных компонентов и делает поведение системы предсказуемым для оператора.

Во-первых, при пилотировании следует начинать с «теневого режима» (shadow mode): алгоритм формирует решения параллельно действующему регламенту, но не управляет светофором, а его решения логируются для пост-фактум анализа. Это позволяет оценить потенциальный выигрыш и выявить узкие места калибровки без риска для участников движения.

Во-вторых, калибровка технологических параметров (насыщенные потоки, минимальные зелёные, межзелёные интервалы) должна проводиться регулярно, как минимум сезонно, с учётом изменения состава потока и дорожных условий. Некорректные технологические константы способны «перебить» эффект предсказательной части. В-третьих, для обеспечения устойчивости в реальном времени целесообразно задать консервативные резервные политики переключений (fallback), активируемые при деградации качества данных или при возникновении атипичных всплесков нагрузки. Эти политики должны быть формально доказуемо безопасными и прозрачными для оператора. В-четвёртых, интерфейс оператора должен предоставлять объяснимые индикаторы: прогнозы приточности с доверительными интервалами, ожидаемые задержки по подъездам, текущее ограничение безопасности, причину выбора фазы. Объяснимость снижает барьер для эксплуатации и упрощает разбор нештатных ситуаций. Наконец, интеграция с диспетчерской инфраструктурой (центры управления движением, журналы контроллеров, каналы связи) должна предусматривать мониторинг качества данных: долю пропусков, задержку телеметрии, частоту ложных срабатываний детекторов. Поддержание «гигиены данных» прямо связано с устойчивостью предсказаний.

### **Ограничения исследования**

Работа сфокусирована на отдельном регулируемом перекрёстке; межузловая координация (коридорная «зелёная волна», сетевые эффекты) не оптимизировалась, хотя в реальности соседние узлы могут существенно влиять на локальные очереди и задержки. Во-вторых, в экспериментальном контуре использовалась ограниченная номенклатура источников данных: при отсутствии высококачественной видеодетекции и V2X-телеметрии часть неопределённости наверняка «прячется» в прогнозной модели, что ограничивает точность упреждающих решений. В-третьих, функция качества агрегирует безопасность через прокси-показатели (конфликтные конфигурации, частота коротких зелёных, доля межзелёных); полноценная оценка безопасности потребует дополнительного моделирования траекторий и вероятностных оценок событий «почти-столкновения» на траекторном уровне.

### **Перспективы развития**

Первоочередным направлением является расширение постановки на сеть перекрёстков с учётом координации по артериям и адаптивной синхронизации циклов. Это потребует иерархического управления: локальные агенты оптимизируют узлы, надстройка – координирует коридоры в рамках сетевых ограничений. Второе направление – траекторное моделирование безопасности с использованием детекции объектов и предсказаний их движения на горизонтах до 5–10 секунд, что позволит перейти от косвенных показателей к прямым метрикам риска. Третье – интеграция каналов приоритета для общественного транспорта и спецслужб на основе динамических окон проезда и строгих гарантий «неголодания» прочих подъездов. Четвёртое – применение методов устойчивого обучения с подкреплением (robust RL) и распределённых представлений неопределённости, чтобы политика сохраняла качество при сдвигах данных и деградации сенсоров. Наконец, важным является подключение модулей обнаружения аномалий для раннего выявления сбоев детекторов и нештатных дорожных событий.

### **Выводы**

Предложенный подход к централизованному управлению перекрёстком, сочетающий стохастическую модель очередей и упреждающую оптимизацию с использованием методов искусственного интеллекта, обеспечивает снижение средних и перцентильных задержек, стабилизацию очередей и соблюдение жёстких требований безопасности. Архитектура с разделением на предсказательный и оптимизационный контуры демонстрирует устойчивость к неполноте и задержкам данных, а также практическую реализуемость в условиях городской инфраструктуры. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности пилотного внедрения на реальном объекте с последующим масштабированием на сеть узлов, при условии регулярной калибровки технологических параметров и контроля качества данных.

### **Список литературы**

1. Адиева, Г.К. (2025). Математическая модель и RL-алгоритмы управления перекрёстком в г. Ош. В П.С. Станимирович, С. Муртас, & Дж.К. Саху (Ред.), *Гибридные методы моделирования сложных систем* (стр. 127–154). Springer.
2. Власов, С.А., & Петров, А.И. (2023). Искусственный интеллект в управлении светофорными объектами: обзор 2020–2023 гг. *Транспорт Российской Федерации*, 2(105), 38–47.

3. Газизов, Р. К. (2022). Адаптивное управление перекрёстками на базе обучения с подкреплением. *Автоматика на транспорте*, 8(4), 312–325.
4. Калбекова, М. (2022). Моделирование квадратной турбулентной конвекции. *Вестник Ошского государственного университета*, (1), 177–184. [https://doi.org/10.52754/16947452\\_2022\\_1\\_177](https://doi.org/10.52754/16947452_2022_1_177)
5. Карабаев, С. Э., Токторбаев, А. М., Мойдунова, А. С., & Абдыкадыров, С. К. (2025). Multithreaded data processing in SQLite using C#. *Engineering Problems and Innovations*, 3(2).
6. Каримов, Р. К., & Абдыкалыков, А. А. (2024). Численные схемы 4-го порядка для уравнений фильтрации транспортных потоков. *Вестник ОшГУ. Математика и информатика*, 1(57), 14–27.
7. Кременецкая, Е. А. (2024). Предсказательное управление светофорами: от ARIMA до LSTM. *Программные продукты и системы*, 37(2), 214–223.
8. Сидоренко, В. Г. (2021). *Стохастические модели очередей на регулируемых перекрёстках* (2-е изд.). МАДИ.
9. Токторбаев, А. М. (2022). Of singularly perturbed problems of the optimal management. *Вестник Ошского государственного университета. Математика. Физика. Техника*, 1(1), 23–29.
10. Тургунбаев, Э. Т. (2022). Калибровка насыщенных потоков на перекрёстках Оша по видеоданным. *Вестник ОшГУ*, (3), 88–95.
11. Уфилин, П. А., & Аничев, Д. А. (2024). Цифровизация и возможность управления светофорами: обзор существующих методов управления дорожным движением. В *ГЕО-Сибирь: Сборник трудов* (Т. 7, № 3, стр. 183–187).