

*На правах рукописи*



**ГОРБУНОВ РОМАН НИКОЛАЕВИЧ**

**МОНИТОРИНГ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ДАННЫХ**

Специальность 05.22.10 – Эксплуатация автомобильного транспорта

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Научный руководитель

**Михайлов Александр Юрьевич**,  
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Официальные оппоненты

**Зырянов Владимир Васильевич**,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Организация перевозок и дорожного движения» ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет»;

**Полтавская Юлия Олеговна**,  
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Управление на автомобильном транспорте» ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет».

Ведущая организация

**ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)».**

Защита состоится 02 октября 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.04 при ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» и на сайте: <http://www.istu.edu/static/dis/54367>.

Автореферат диссертации разослан: 30 апреля 2020 г.

Отзывы на автореферат (два экземпляра, заверенные организацией) направлять в адрес диссертационного совета: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, Д 212.073.04, e-mail: ds04@istu.edu.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



С.Ю. Красноштанов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность исследования.**

В соответствии с приказом Минтранса России № 406 от 13.11.2018 в состав работ по организации дорожного движения (далее ОДД) включены работы по проведению мониторинга дорожного движения, который, в соответствии с Федеральным законом № 443-ФЗ от 29.12.2017 г. осуществляется в том числе в целях формирования и реализации государственной политики в области ОДД и формирования комплекса мероприятий, направленных на обеспечение эффективности ОДД.

В настоящее время в мировой практике для мониторинга дорожного движения широко применяются данные геоинформационных систем (далее ГИС), содержащие, в том числе, информацию о состоянии движения транспортных потоков – текущее время и координаты транспортных средств (далее ГИС-данные), получаемую с навигационного оборудования. Источником ГИС-данных могут выступать единичные источники ГИС-данных (далее ЕИГД) – автомобили-лаборатории, целенаправленно собирающие такие данные и массовые источники ГИС-данных (далее МИГД) – сервисы, осуществляющие сбор и обработку ГИС-данных, получаемых от участников дорожного движения, с применением технологий Big Data.

В России приказом Минтранса России №1 14 от 18.04.2019 был законодательно закреплён сбор данных о параметрах дорожного движения на основе ГИС-данных.

Рост вычислительных мощностей позволяет в режиме реального времени обрабатывать и сортировать большой объём ГИС-данных, поступающих от десятков и сотен тысяч транспортных средств. Всё это создаёт новые возможности для оценки функционирования улично-дорожной сети (далее УДС) и повышения эффективности мониторинга дорожного движения.

Ряд зарубежных организаций (TomTom, Inrix и пр.) уже многие годы проводит оценку функционирования УДС на основе ГИС-данных, но их охват территории РФ ограничен несколькими крупнейшими городами (Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород и др.), кроме того, отсутствует детальное описание методик проведения такой оценки, применяются показатели оценки, отличные от нормативно утверждённых в РФ, а детализированная информация по городам предоставляется на платной основе.

Постановлением Правительства РФ № 1379 от 16.11.2018 г. установлен порядок определения основных параметров дорожного движения и ведения их учёта. В число рассматриваемых Постановлением показателей включены временной  $TTi$  и буферный  $Ib$  индексы. Временной индекс  $TTi$  представляет собой отношение продолжительности передвижения в пиковый период к продолжительности передвижения в свободных условиях. Буферный индекс  $Ib$  представляет собой отношение буферного времени (времени превышения продолжительности передвижения в пиковое время над средней продолжительностью передвижения) к средней продолжительности передвижения.

Реализация положений Постановления сдерживается фактическим отсутствием методик сбора и обработки ГИС-данных о движении транспортных средств, а также отсутствием знаний о минимально необходимом объёме и периодичности сбора таких ГИС-данных. Также неизвестны закономерности влияния характеристик дорожного движения и параметров УДС на значения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов.

В этой связи научное исследование, направленное на определение влияния периодичности замеров и объёма выборки на точность оценки временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов и выявления закономерностей влияния характеристик дорожного движения и параметров УДС на значения этих индексов, а также разработка методик сбора

и обработки ГИС-данных, является актуальным на государственном уровне и позволит значительно повысить эффективность мониторинга дорожного движения.

**Цель исследования:** повышение эффективности мониторинга дорожного движения и снижение затрат на его проведение за счёт применения МИГД.

**Научной гипотезой** является предположение о том, что эффективность мониторинга дорожного движения можно значительно повысить, если выполнять его на основе данных отечественного МИГД «Яндекс.Пробки», используя взаимосвязи буферного  $Ib$  и временного  $TTi$  индексов и дифференцированные по протяжённости шкалы оценки уровня обслуживания.

**Объектом исследования** является процесс функционирования УДС.

**Предметом исследования** являются зависимости, характеризующие надёжность функционирования УДС.

**Задачи исследования:**

1. Разработать вариативные математические модели оценки влияния периодичности проведения замеров и объёма выборки на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов;

2. На основе разработанных вариативных математических моделей выявить зависимости влияния периодичности проведения замеров и объёма выборки на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов и на их основе оценить возможность применения ЕИГД и МИГД;

3. Выявить зависимость влияния протяжённости обследуемого участка УДС на значения временного индекса  $TTi$  и на основе выявленной зависимости разработать шкалы оценки уровней обслуживания УДС;

4. Научно обосновать и разработать «Методику сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки» для определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов;

5. Выполнить экспериментальную проверку разработанной методики на примере данных о скоростях движения на УДС городов РФ.

**Научной новизной обладают:**

1. Вариативные математические модели, позволяющие выполнить аналитические исследования влияния периодичности проведения замеров и объёма выборки на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов, и выявленные на их основе зависимости.

2. Выявленные зависимости влияния протяжённости участка УДС на значения временного индекса  $TTi$  и построенные на их основе шкалы оценки уровней обслуживания.

3. Разработанная «Методика сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки» для определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов.

4. Выявленная взаимосвязь временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов на участках УДС на основе данных, полученных с применением разработанной методики.

**Теоретическая значимость исследования.**

Теоретически доказана и экспериментально подтверждена возможность оценки надёжности функционирования УДС на основе использования ГИС-данных и необходимость применения дифференцированной оценки надёжности функционирования УДС с учётом протяжённости передвижений. Также установлено наличие взаимосвязи между значениями временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов.

**Практическая значимость исследования.**

Разработанные «Методика сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки»

и шкалы уровней обслуживания позволят:

- муниципальным и государственным органам и учреждениям, ответственным за ОДД, повысить эффективность мониторинга дорожного движения на городских УДС и выполнять сопоставительный анализ надёжности функционирования УДС городов РФ на национальном уровне;
- проектным организациям снизить затраты на проведение оценки надёжности функционирования УДС на стадии выполнения программ комплексного развития транспортной инфраструктуры и комплексных схем ОДД.

#### **Методы исследований.**

При проведении аналитических исследований использовались методы математического моделирования. В процессе выполнения экспериментальных исследований влияния протяжённости обследуемого участка УДС на значения временного индекса  $TTi$  применялось навигационное оборудование системы GPS. Полученные в ходе проводимых экспериментов данные, включая ГИС-данные сервиса «Яндекс.Пробки», обрабатывались с применением статистических методов и методов статистического анализа.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы приняты к внедрению в ООО «Автомобилист», ООО «Хада», ООО «Ресурс», ОАО «НИИАТ», Таджикском техническом университете им. М. Осими г. Душанбе.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Эффективность мониторинга дорожного движения можно значительно повысить, если проводить его с использованием МИГД.
2. Применение дифференцированных шкал оценки уровня обслуживания, учитывающих протяжённость участков УДС, повышает точность и объективность оценки надёжности функционирования УДС.
3. Расчёт буферного индекса  $Ib$  можно осуществлять, используя взаимозависимости буферного  $Ib$  и временного  $TTi$  индексов, установленные для пяти типов участков УДС, что позволит использовать многократно меньший объем ГИС-данных.
4. Оценка надёжности функционирования УДС на основе временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов, охватывающая всю территорию РФ, может проводиться с применением разработанной «Методики сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки», основанной на отечественном МИГД.

**Апробация работы.** Материалы и результаты проведённого исследования доложены и одобрены на: 99-й и 106-й Международных научно-технических конференциях Ассоциации автомобильных инженеров в ИРНИТУ, г. Иркутск (2017 г. и 2019 г.); X-й Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири», г. Иркутск (2018 г.); V Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы и ситуационные центры», г. Казань (2018 г.).

#### **Личный вклад автора:**

1. Разработал вариативные математические модели, с помощью которых установил зависимость влияния интервалов между проведением замеров и объёма выборки на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов.
2. Провёл сбор данных и определил зависимости влияния протяжённости обследуемого участка УДС на временной индекс  $TTi$ , на основе которых разработал шкалы оценки уровня обслуживания УДС в зависимости от протяжённости участков УДС.
3. Разработал «Методику сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки»

для расчёта временного  $Tt_i$  и буферного  $Ib$  индексов и провёл её апробацию на 9 городах РФ, в ходе которой выявил взаимозависимость временного  $Tt_i$  и буферного  $Ib$  индексов.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 10 печатных работы, из них 6 статей в изданиях перечня ВАК, 1 статья в журнале, индексируемом международной системой цитирования Scopus, 3 статьи в сборниках Международных и Всероссийских конференций.

**Структура и её объем.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка, включающего 199 наименований, в том числе 106 на иностранном языке и приложений с материалами результатов. Данная работа изложена на 489 страницах машинописного текста и включает в себя 32 таблицы, 59 рисунков и 7 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель, задачи, научная гипотеза, объект и предмет исследования, научная новизна, практическая значимость исследования основные научные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит обзор современного состояния теории и практики оценки ОДД с применением ГИС-технологий.

Анализ литературы показал, что последние изменения в законодательстве РФ учитывают зарубежный опыт и направлены на внедрение современных технологий мониторинга дорожного движения (МДД) и оценки надёжности функционирования УДС.

Современное развитие ГИС-технологий позволяет использовать навигационное оборудование как источник данных о состоянии транспортного потока и надёжности функционирования УДС. Анализ результатов отечественных (Блинкин М.Я., Богумил В.Н., Зырянов В.В., Румянцев Е.А., Сильянов В.В., и др.) и зарубежных исследований (Chen H., Herman R., Kittelson W.K., Pu W., Ryus P., и др) позволяет предположить, что повышение эффективности МДД и снижение затрат на его проведение возможно за счёт применения МИГД, при этом могут использоваться ГИС-данные отечественного источника – сервиса «Яндекс.Пробки». По результатам обзора была сформулирована итоговая гипотеза проводимых исследований, заключающаяся в том, что эффективность МДД можно значительно повысить, если выполнять его на основе данных отечественного МИГД «Яндекс.Пробки», используя взаимозависимости буферного  $Ib$  и временного  $Tt_i$  индексов и дифференцированные по протяжённости шкалы оценки уровня обслуживания.

**Вторая глава** содержит теоретические предпосылки проводимых исследований.

В соответствии с мировой теорией и практикой ОДД под надёжностью функционирования УДС понимается ее способность обеспечивать возможность передвижения по ней с прогнозируемыми затратами времени, приемлемыми для пользователя.

В руководстве NCHRP Report 825 (США), выделяется три уровня анализа ОДД и УДС. Верхний уровень – анализ УДС в целом, средний уровень – анализ отдельных участков УДС, нижний уровень – детальный анализ отдельных элементов УДС на основе данных, получаемых измерениями на местности или на основе микромоделирования движения транспортных потоков. В настоящей работе рассматривается средний уровень оценки функционирования УДС (рис.1).

Основные параметры, используемые в руководствах Highway capacity manual 2010 и 2016 годов издания (далее HCM) и дополнений к ним (SHRP 2 L08 и др.) для оценки надёжности функционирования УДС представлены на рис. 2 и табл. 1.

В проводимом исследовании в соответствии с Постановлением Правительства

РФ № 1379 от 16.11.2018 показателями оценки надёжности функционирования УДС выбраны временной  $TTi$  и буферный  $I_b$  индексы. Для их расчёта требуются данные о продолжительности (скорости) передвижения на оцениваемом участке УДС. Получение такой информации возможно на основе аналитического расчёта, предложенного в НСМ и дополнений к нему и требующего большого объёма вычислительных процедур (3-7), начинающихся с расчёта средней скорости на перегоне  $S_s$  (миль/час).

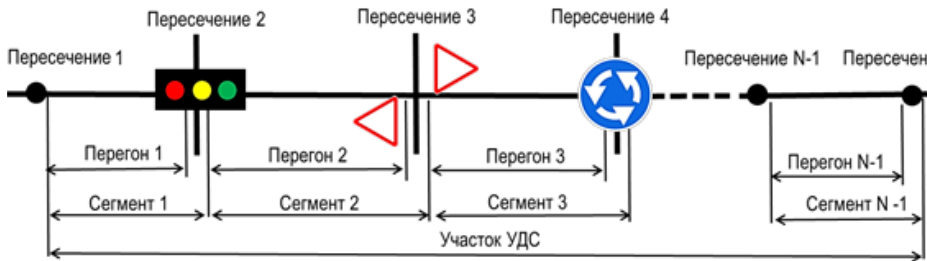


Рисунок 1. Схематическое представление участка УДС при среднем уровне анализа



Рисунок 2. Показатели вариации продолжительности передвижений и оценки надёжности функционирования УДС

Таблица 1 Показатели надёжности функционирования УДС (НСМ)

Показатель	Формула	Переменные
Временной индекс	$TTi = T_p / T_{ff}$	$T_p$ – продолжительность передвижения в час пик, с; $T_{ff}$ – продолжительность передвижения в свободных условиях, с; $\bar{T}$ – средняя продолжительность передвижения, с. $FFS$ – скорость в свободных условиях, миль/ч $p_s$ – вероятность поездки с заданными параметрами.
Буферный индекс	$I_b = (T_p - \bar{T}) / \bar{T}$	
Буферное время	$T_b = I_b \cdot \bar{T}$	
Задержка	$D = 3600 \cdot (TTi - 1) / FFS$	
Индекс неудачи (Misery index)	$Mi = \frac{\sum_{s \in T_s} p_s TTi_s}{\sum_{s \in T_s} p_s}$	
Стандартное отклонение	$SD = \sqrt{\sum_s p_s (TTi_s - \bar{TTi})^2}$	

$$S_s = \begin{cases} (FFS - 0,00776 \cdot \frac{(v_d + v_o) \cdot (1 + PHV \cdot (E_{HV} - 1))}{PHF}) - f_{NP} ; N_{pl} = 0 \\ \frac{[FFS - 0,00776 \cdot \frac{(v_d + v_o) \cdot (1 + PHV \cdot (E_{HV} - 1))}{PHF}) - f_{NP}] \cdot [(f_{pl} L_{pl}) + (0,5 f_{pl} L_{de}) + L_{npl}]}{L_{section}} ; N_{pl} > 0 \end{cases}, \quad (3)$$

где  $FFS$  – скорость в свободных условиях, миль/ч;  $v_d$  – интенсивность в попутном направлении, авт./ч;  $v_o$  – интенсивность во встречном направлении, авт./ч;  $PHV$  – доля

грузового транспорта;  $EHV$  – коэффициент приведения к легковому автомобилю;  $PHF$  – коэффициент пиковой нагрузки;  $f_{NP}$  – корректирующий показатель на невозможность обгона (опережения), миль/ч;  $N_{pl}$  – число полос для обгона (опережения) в заданном направлении;  $f_{pl}$  – корректирующий коэффициент на наличие полос для обгона (опережения);  $L_{pl}$  – общая протяжённость проезжей части на сегменте с наличием полосы для обгона (опережения), миль;  $L_{de}$  – протяжённость проезжей части, на которой оказывается влияние изменения скорости после полосы обгона (опережения), миль;  $L_{npl}$  – общая протяжённость проезжей части на перегоне, где обгон (опережение) запрещён, миль;  $L_{section}$  – общая протяжённость проезжей части на перегоне, миль.

Для учёта влияния погодных условий на скорость в свободных условиях ( $FFS_w$ ) применяется зависимость (4):

$$FFS_w = (FFS \cdot SAF) + \left[ 1 - e^{\ln\left((FFS \cdot SAF) + 1 - \frac{C \cdot CAF}{45}\right) \cdot \frac{v_p}{C \cdot CAF}} \right], \quad (4)$$

где  $SAF$  – коэффициент влияния скорости на сегменте;  $C$  – плотность автомобилей на сегменте, авт./ч·полосу;  $CAF$  – коэффициент влияния интенсивности на сегменте;  $v_p$  – интенсивность на сегменте, авт./ч·полосу.

На основе расчёта средней скорости для перегона, протяжённостью  $L_s$ , определяется средняя продолжительность передвижения по нему  $T_s$ , согласно:

$$T_s = \frac{L_s}{S_s} \cdot 3600 \quad (5)$$

Полные затраты времени с учётом задержек, вызванных регулированием на перекрёстах  $d$  (рис. 3), рассчитываются по формуле (6).

$$T_{facility} = \sum_i T_i + \sum_i d_i \quad (6)$$

где  $T_{facility}$  – время передвижения по участку УДС, с;  $T_i$  – время передвижения по  $i$ -ому перегону УДС, с;  $d_i$  – задержка, вызванная регулированием на  $i$ -ом перекрёстке, с (7).

$$d = \frac{0,5 \cdot (1 - \frac{g}{C})^2}{1 - \left[ \min\left(1, \frac{v_m}{c}\right) \cdot (g/C) \right]} \cdot PF + 225 \cdot \left[ \left( \frac{v_m}{c} - 1 \right) + \sqrt{\left( \frac{v_m}{c} - 1 \right)^2 + \frac{16 \cdot \frac{v_m}{c}}{c \cdot N_{TH}}} \right], \quad (7)$$

где  $C$  – продолжительность цикла регулирования, с;  $g$  – продолжительность работы разрешающего сигнала светофора, с;  $v_m$  – интенсивность автомобилей на сегменте, авт./ч;  $c$  – интенсивность на следующем сегменте, авт./час;  $N_{TH}$  – число полос для движения в выбранном направлении;  $PF$  – коэффициент координации работы светофоров.

Альтернативный подход позволяет получать непосредственно от участников дорожного движения исходные данные для оценки надёжности функционирования УДС, отражающие изменение скорости во всем цикле движения, что, по сравнению с расчётными данными, даёт возможность изучения влияния различных характеристик УДС на продолжительность передвижения и оценивать иные параметры движения, рис. 3.

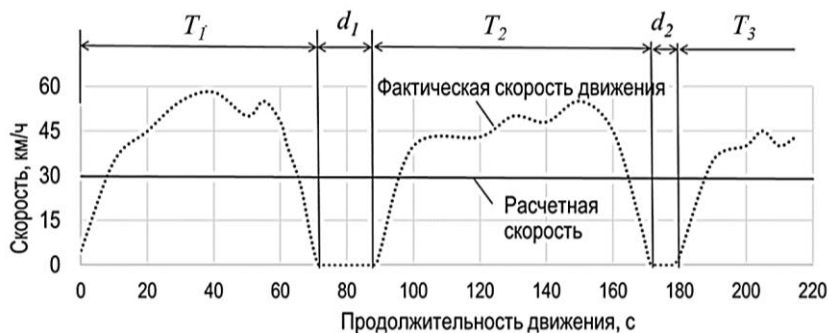


Рисунок 3. Графики расчётной и фактической скорости:  $T_i$  – затраты времени на движение на перегонах сегментов;  $d_i$  – задержки на перекрёстках в конце сегментов

На основании этого было принято решение, что в рамках проводимых исследований расчёт показателей надёжности будет осуществляться на основе данных, поступающих с навигационного оборудования, расположенного в транспортных средствах.

Полученные данные, а также значения временного  $Ti$  и буферного  $Ib$  индексов используются для расчёта временных задержек  $D$  на участках УДС (табл. 1) и буферного времени  $T_b$ , планируемого пользователем для своевременного прибытия (табл. 1), которые могут выступать показателями экономических потерь, вызванных заторами.

Для установления зависимостей влияния интервалов между проведением замеров и объёма выборки на точность определения временного  $Ti$  и буферного  $Ib$  индексов были разработаны вариативные математические модели, алгоритмы которых представлены на рис. 4, 5. Учёт влияния случайных событий в моделях достигается применением генератора случайных чисел программы Microsoft Excel.

Проведение экспериментального исследования влияния протяжённости исследуемого пути на значения временного индекса  $Ti$  было спланировано и выполнено согласно алгоритму, рис. 6. Шкалы оценки уровня обслуживания построены с учетом предположения о равновероятном попадании значений в выбранный диапазон.

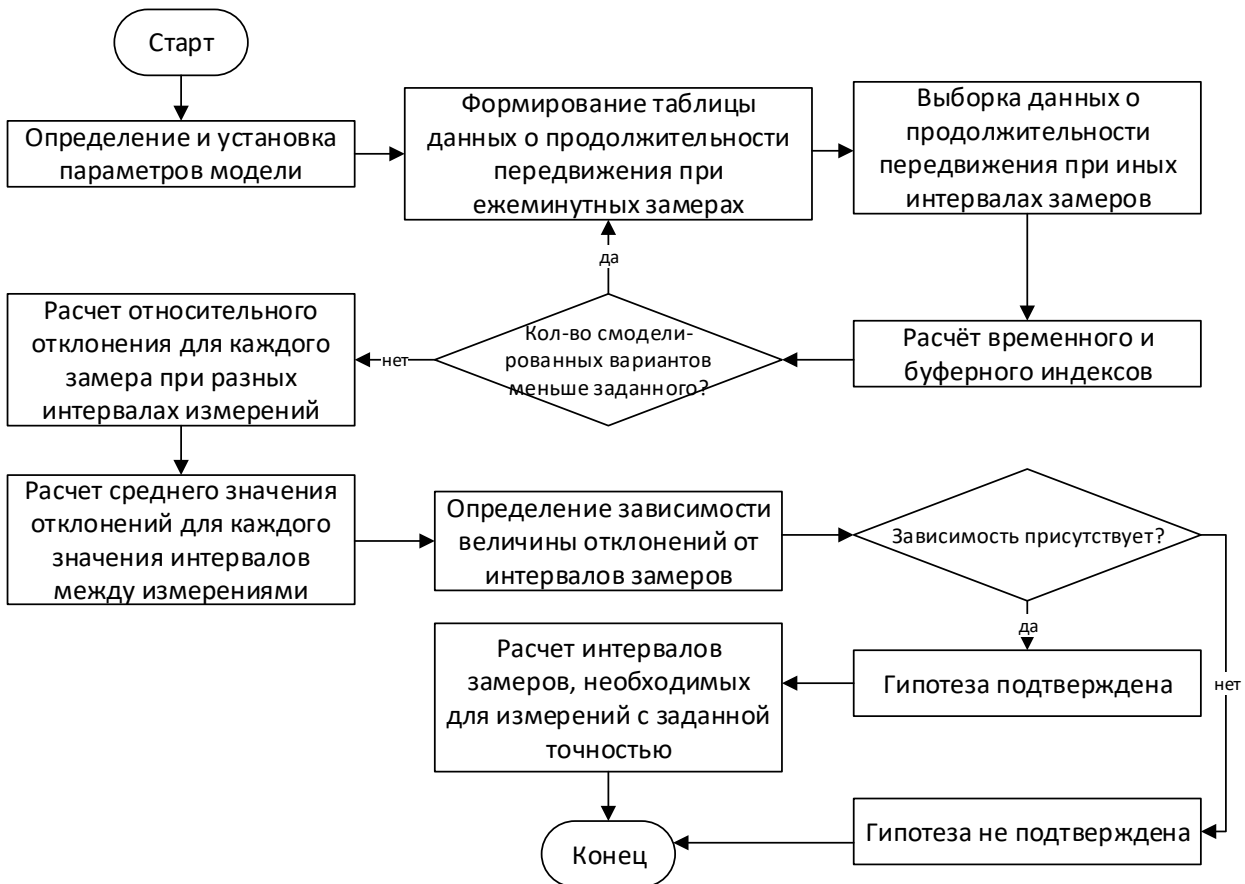


Рисунок 4. Алгоритм проведения исследований по получению зависимости влияния интервалов между началом проведения замеров на точность определения временного  $Ti$  и буферного  $Ib$  индексов

При сравнении объёмов данных, требуемых для расчётов временного  $Ti$  и буферного  $Ib$  индексов, установлено, что для расчёта буферного индекса  $Ib$  требуется многократно больший объём данных, табл. 2, и было сделано предположение о возможности снижения затрат на проведение сбора и обработки данных в случае выявления взаимозависимости значений временного  $Ti$  и буферного  $Ib$  индексов. Для сбора данных и подтверждения данного предположения была разработана, в соответствии с алгоритмом «Методика сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки», рис. 7.

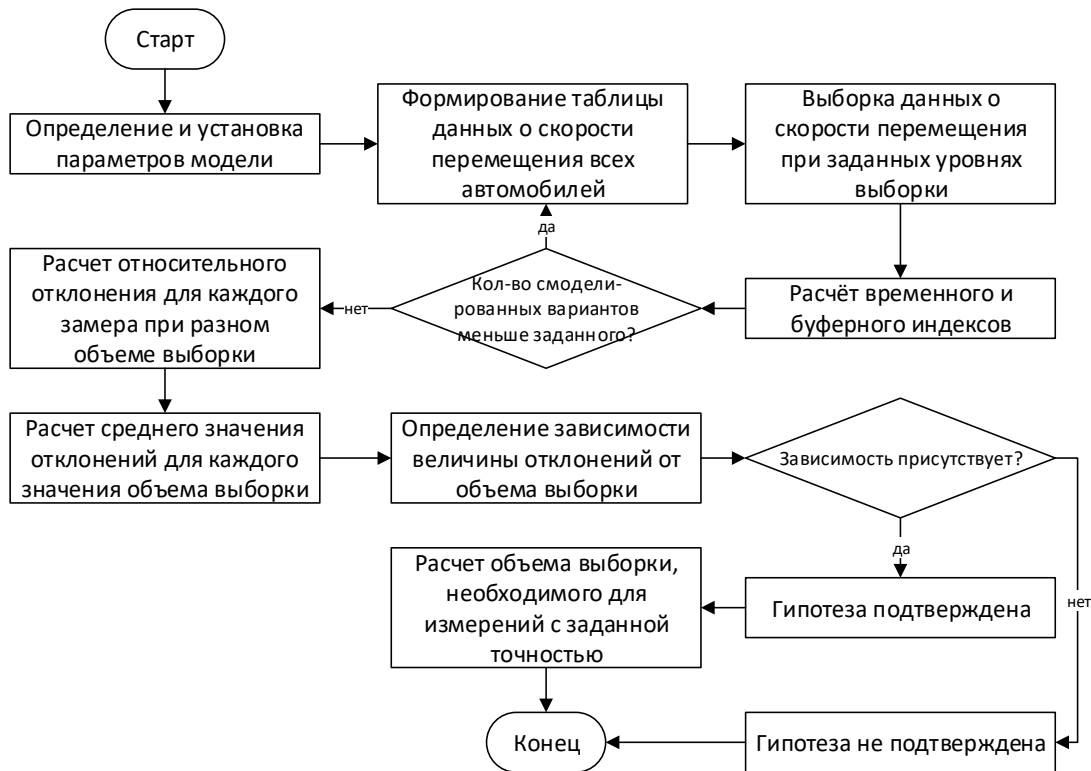


Рисунок 5. Алгоритм проведения исследований по выявлению зависимости влияния объёма выборки на точность определения временного  $Tt_i$  и буферного  $Ib$  индексов

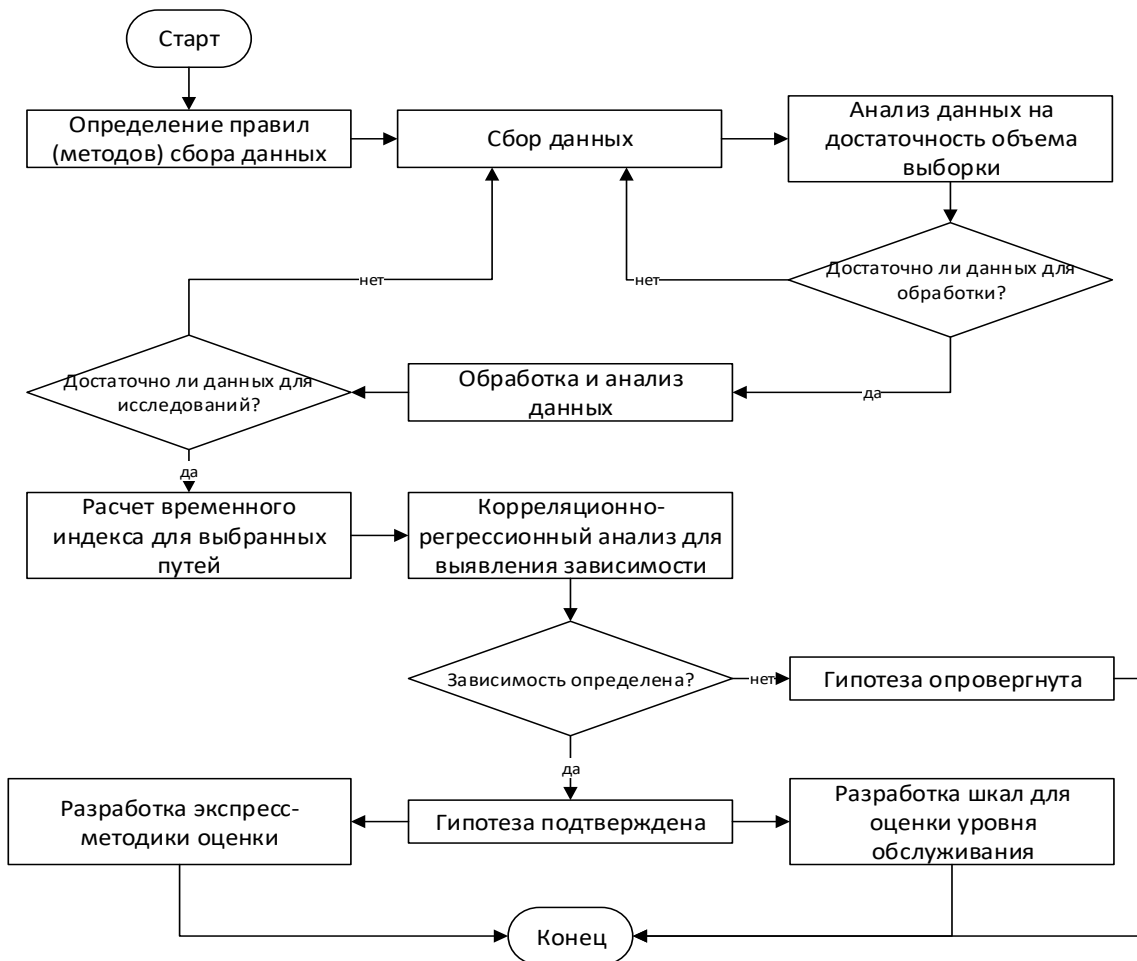


Рисунок 6. Алгоритм выполнения эксперимента по установлению зависимости значений временного индекса  $Tt_i$  от протяжённости исследуемого пути

Таблица 2. Сравнение необходимого объема данных для расчёта индексов

Индекс	Объем данных
Временной индекс $TTi = \frac{T_p}{T_{ff}}$	Данные о продолжительности (скорости) передвижения автомобилей в пиковый период $T_p$ (утренний или вечерний) и в свободных условиях $T_{ff}$ (как правило, ночью). Для измерения $T_p$ требуется сбор данных в пиковые периоды (1-2 часа), для $T_{ff}$ сбор данных в свободных условиях (15-30 минут).
Буферный индекс $I_b = \frac{T_p - \bar{T}}{\bar{T}}$	Данные о продолжительности (скорости) передвижения автомобилей в пиковый период $T_p$ (утренний или вечерний) и средней скорости $\bar{T}$ в течение суток. Для измерения $T_p$ требуется сбор данных в пиковые периоды (1-2 часа), для расчёта $\bar{T}$ требуется сбор данных непрерывно в течение суток.

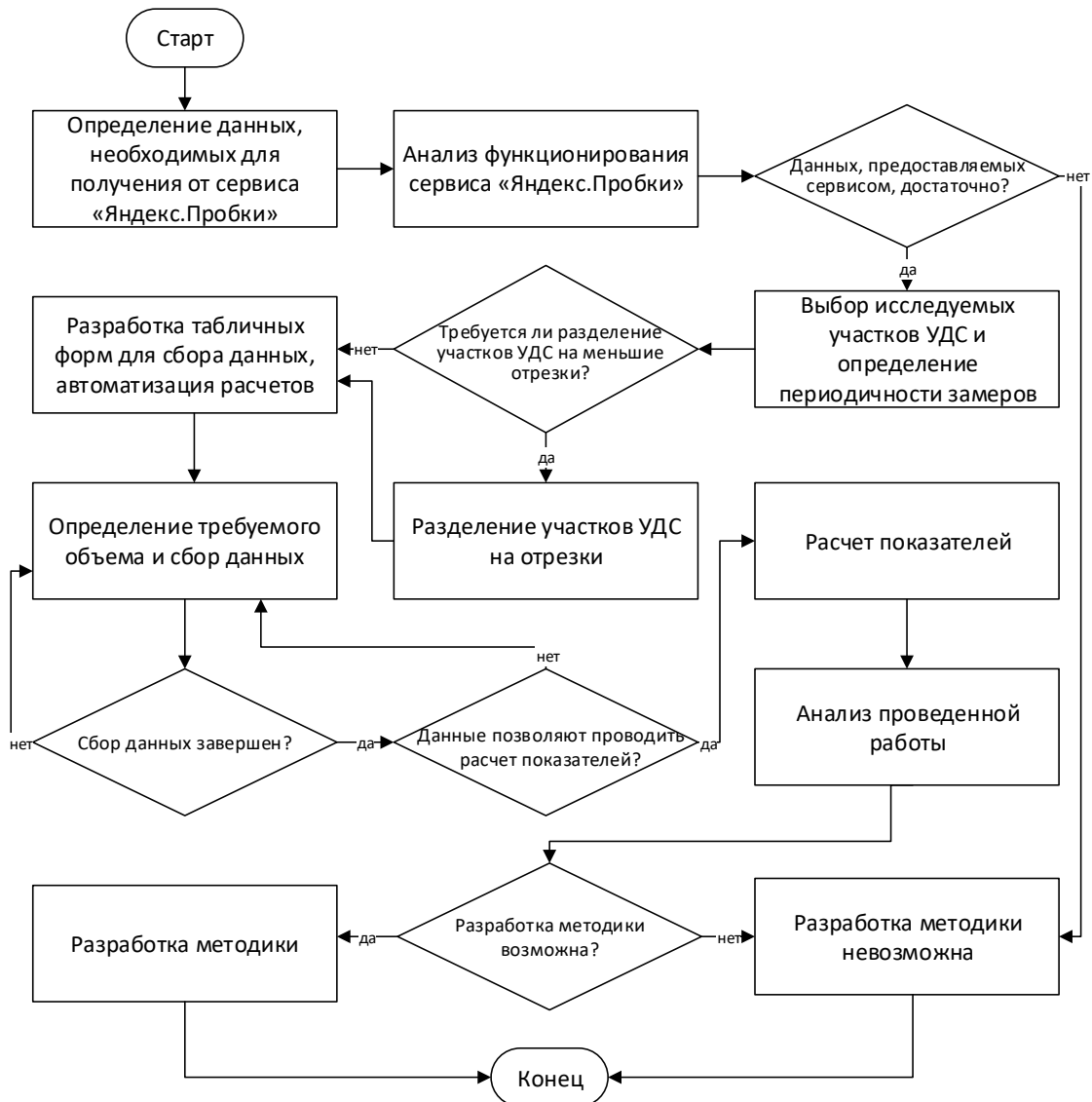


Рисунок 7. Алгоритм разработки «Методики сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки»»

Успешная разработка методики позволила составить алгоритм эксперимента по определению взаимозависимости временного  $TTi$  и буферного  $I_b$  индексов на основе данных сервиса «Яндекс.Пробки» (рис. 8), в ходе проведения которого была проведена её проверка.

Оценка эффективности полученных результатов исследования предполагается на основе сравнения результативности и затрат на МДД с применением ЕИГД и МИГД.

Проведение исследований в соответствии с выбранными алгоритмами (рис. 4-8)

позволит решить поставленные задачи и подтвердить или опровергнуть выдвинутую гипотезу.



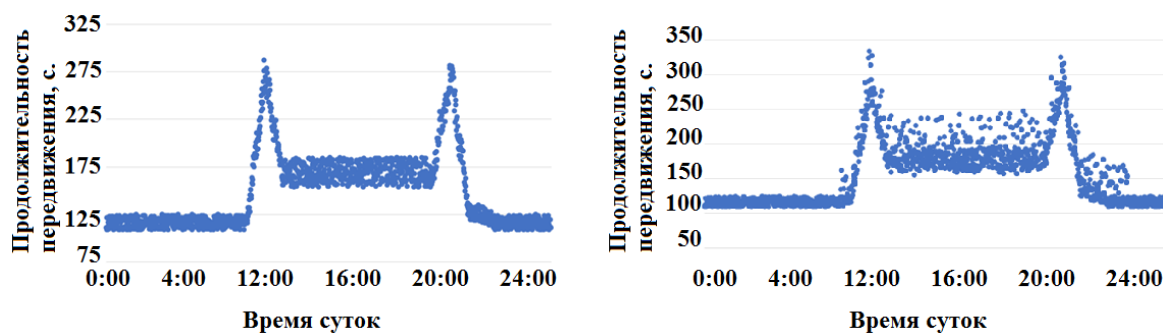
Рисунок 8. Алгоритм проверки «Методики сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки» и проведения исследования по определению взаимозависимости временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов

**В третьей главе** приведены методики проведения четырёх экспериментальных исследований и расчёта эффекта от внедрения полученных результатов исследования:

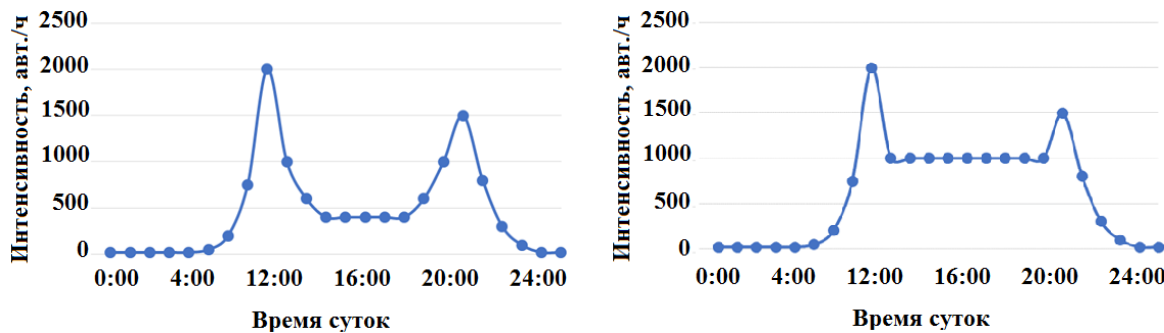
1. Для выполнения эксперимента по проведению анализа влияния интервалов между замерами на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов была подготовлена вариативная модель суточной динамики продолжительности передвижения по исследуемому пути, позволяющая учитывать возможное наличие светофорного объекта и нерегулируемого пешеходного перехода (НПП). Модель разработана на базе табличного редактора Microsoft Excel с подключённым пакетом Visual Basic for Application. Примеры генерации суточной динамики представлены на рис. 9.

Для оценки влияния объёма выборки данных о скоростях движения на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов разработана вариативная модель суточной динамики изменения интенсивности (средней скорости) движения автомобилей по исследуемому пути. Модель разработана на базе табличного редактора Microsoft Excel с подключённым пакетом Visual Basic for Application.

Вариативные модели предполагают использование генератора случайных чисел для отражения влияния случайных параметров на скорость движения автомобилей. Варианты суточной динамики интенсивности представлены на рис. 10.



а) Без учёта светофорного объекта и НПП    б) С учётом светофорного объекта и НПП  
Рисунок 9. Суточная динамика продолжительности передвижения



а) Вариант 1    б) Вариант 2  
Рисунок 10. Суточная динамика интенсивности движения

2. Для проведения экспериментального исследования влияния протяжённости исследуемого пути на значения временного индекса  $Tt_i$  был использован автомобиль Toyota Ipsum и GPS навигатор Prestigio Geovision 5058. В период с 2016 г. по 2019 г. на УДС города Иркутска было записано более 1300 треков, сохранённых в формате \*.gpx и обработанных в программе GPS Track Editor, v.1.15.

3. Для проведения эксперимента определения взаимозависимости временного  $Tt_i$  и буферного  $Ib$  индексов была разработана «Методика сбора данных сервиса «Яндекс.Пробки», рис. 11. В ходе эксперимента была собрана информация о суточной динамике скоростей движения автомобилей на ряде участков УДС городов: Москва, Санкт-Петербург, Ростов-на-Дону, Нижний Новгород, Набережные Челны, Сочи, Иркутск, Ангарск, Владивосток. Исследовались пути, протяжённостью более 10 км, проходящие от окраины города до центральных районов или через них, включающие различные типы улиц и проходящие через различные части города (спальные районы, промзоны, и т.п.).

4. Для оценки эффективности полученных результатов проводился расчёт затрат на исследование УДС протяжённостью 1500 км (протяжённость дорог г. Иркутска при движении в обоих направлениях), проводимых еженедельно в течение года.

5. При расчёте затрат на использование ЕИГД учитывались прямые затраты, связанные с их эксплуатацией, а также затраты на оплату труда водителей. В затратах на сбор данных с применением МИГД были учтены прямые затраты, связанные с эксплуатацией компьютеров, а также затраты на оплату труда специалистов, проводящих сбор данных. Периодичность сбора данных и число компьютеров для сбора данных из МИГД определялись на основе результатов работы вариативной модели и опыта, полученного при апробации «Методики сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки».

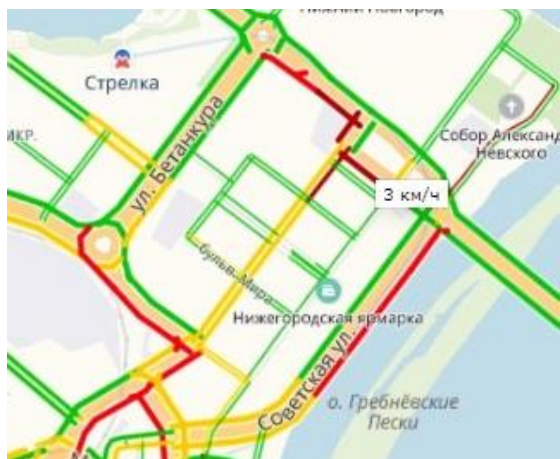


Рисунок 11. Интерфейс МИГД сервиса «Яндекс.Пробки» предоставляет информацию о скорости движения в режиме реального времени (участок УДС г. Нижний Новгород)

Для каждого из проводимых экспериментальных исследований дано описание методики его проведения и выявления зависимостей.

В четвертой главе диссертации приведены результаты проведённых исследований и оценка затрат и эффективности МДД:

1. В ходе экспериментального исследования влияния интервалов между началом проведения замеров на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов на основе вариативной математической модели суточной динамики продолжительности передвижения по исследуемому пути были установлены зависимости (10-13):

Для случая отсутствия светофорного объекта и НПП:

$$F_{tti}(t) = -0,00005t^2 - 0,0013t - 0,011; R^2 = 95,51\%, \quad (10)$$

$$F_{ib}(t) = -0,00009t^2 - 0,0019t - 0,0217; R^2 = 94,47\%, \quad (11)$$

Для случая наличия светофорного объекта и НПП:

$$F_{tti}(t) = -0,00001t^2 - 0,0028t - 0,0252; R^2 = 81,15\%, \quad (12)$$

$$F_{ib}(t) = 0,000003t^2 - 0,0072t - 0,0644; R^2 = 86,54\%, \quad (13)$$

где  $F_{TTi}(t)$ ,  $F_{Ib}(t)$  – относительное отклонение получаемого результата;  $t$  – временной интервал между проведением замеров, мин.

На основании выявленных зависимостей были определены интервалы между измерениями и требуемое суточное количество замеров, табл. 3.

Таблица 3. Интервалы между началом измерений и их количество в течение суток

Индекс	Условия движения			
	Помехи отсутствуют		Помехи светофорного объекта и НПП	
	Интервал измерений, мин.	Количество замеров в сутки	Интервал измерений, мин.	Количество замеров в сутки
Временной	18	80	9	160
Буферный	10	144	2	720

2. В ходе экспериментального исследования влияния объёма выборки данных о скоростях движения на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов на основании вариативной математической модели суточной динамики изменения интенсивности движения автомобилей были выявлены зависимости (14,15).

$$F_{tti}(x) = 0,0149 \ln(x) + 0,0106; R^2 = 91,89\%, \quad (14)$$

$$F_{ib}(x) = 0,0218 \ln(x) + 0,0151; R^2 = 92,45\%, \quad (15)$$

где  $F_{TTi}(x)$ ,  $F_{Ib}(x)$  – относительное отклонение получаемого результата;  $x$  – % выборки.

По результатам эксперимента можно отметить, что для определения временного индекса  $TTi$  с 95% точностью на основе полученных зависимостей необходима выборка не менее 1,72% из данных о суточной динамике средней скорости за каждый час.

Для определения показателя буферного индекса  $Ib$  с 95% точностью необходима выборка не менее 4,87% из данных о суточной динамике средней скорости за каждый час.

3. На основании собранной в г. Иркутске базы данных, объем которой превысил 1300 треков, основные характеристики которых приведены в табл.4 было проведено экспериментальное исследование влияния протяжённости исследуемого пути на значения временного индекса  $TTi$ . В связи с недостаточностью данных, получаемых от автомобиля-лаборатории, расчёт буферного индекса  $Ib$  в данном исследовании не проводился.

Таблица 4. Описание собранной базы данных треков и исследуемых путей

Характеристика	Показатель
Общее количество треков	более 1300
Количество исследуемых путей	32
Диапазон значений протяжённости исследуемых путей	0,6-30,2 км
Количество полос движения в попутном направлении	1-4
Плотность размещения перекрёстков, ед./км	0,7-11,4

В ходе экспериментального исследования получена зависимость значений временного индекса  $TTi$  от протяжённости пути ( $l$ ):

$$TTi = 92,897 \cdot l^{-0,413}; R^2 = 90,06\% \quad (16)$$

Полученное уравнение применимо для экспресс-оценки надёжности функционирования УДС, все получаемые значения, расположенные выше графика кривой, являются неудовлетворительными, расположенные ниже – удовлетворительными, рис.12.

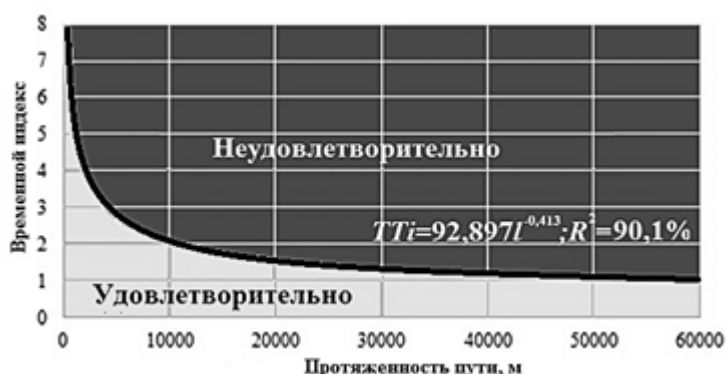


Рисунок 12. Экспресс-оценка надёжности функционирования УДС

Дальнейшая работа позволила разработать 6 шкал для оценки уровня обслуживания в г. Иркутске на основе временного индекса  $TTi$ . Диапазоны шкал были выбраны на основании равной вероятности нахождения данных в указанных диапазонах (границы 20, 40, 60, 80 перцентилья), табл. 5. Полученный результат подтверждает возможность получения таких зависимостей в других городах РФ.

4. В ходе эксперимента определения взаимозависимости временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов на основе данных сервиса «Яндекс.Пробки» было установлено, что изменения этих индексов по мере прохождения исследуемого пути схожи и может быть описано полиномами одного порядка, а также прослеживается линейная зависимость между их значениями для каждого из исследуемых путей, табл.6

В дальнейшем исследуемые пути были разделены на отдельные участки, на которых изменения значений временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов могли быть описаны с высокой степенью точности однотипными уравнениями.

Таблица 5. Шкалы оценки участков УДС на основе временного индекса  $TTi$ 

Протяжённость, км	Описание	Уровень обслуживания				
		A	B	C	D	E
0 – 0,75	Участки УДС с очень высоким уровнем загрузки в часы пик, участки концентрации заторов, центральные улицы города или транспортные развязки.	1-6,57	6,57-7,32	7,32-8,48	8,48-10,7	10,7-∞
0,75 – 1,2	Более протяжённые участки УДС с очень высоким уровнем загрузки в часы пик, участки УДС на подходе к местам концентрации заторов	1-5,16	5,16-5,39	5,39-5,65	5,65-6	6-∞
1,2 – 2	Участки УДС с высоким уровнем загрузки в часы пик. Включают участки меньшей протяжённости с более высоким значением временного индекса $TTi$ и участки УДС, их соединяющие. Пути следования в пределах одного района или границ двух соседствующих районов.	1-4,19	4,19-4,38	4,38-4,61	4,56-5	5-∞
2 – 4	Участки УДС с довольно высоким уровнем загрузки в часы пик. Включают участки меньшей протяжённости с более высоким значением временного индекса $TTi$ . Пути следования по трудовым и иным целям в пределах одного района или двух соседствующих районов.	1-3,19	3,19-3,39	3,39-3,65	3,65-4	4-∞
4 – 11	Участки УДС со средним уровнем загрузки в часы пик. Включают участки меньшей протяжённости с более высоким значением временного индекса $TTi$ . Пути следования между соседними и отдалёнными районами, например, путь следования с окраины в центр по трудовым и пр. целям.	1-2,13	2,13-2,32	2,32-2,57	2,57-3	3-∞
11 – 58	Участки УДС с низким уровнем загрузки в часы пик. Включают участки меньшей протяжённости с более высоким значением временного индекса $TTi$ . Пути следования между отдалёнными районами, проходящие через несколько районов, например, путь, соединяющий выезды из города на федеральные и/или региональные трассы, путь следования транспортно-логистических компаний по городу и т.п.	1-1,1	1,1-1,24	1,24-1,47	1,47-2	2-∞

В результате было установлено наличие пяти типов уравнений описания динамики временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов в зависимости от протяжённости исследуемых путей. Проведя сравнение уравнений каждого типа было установлено, что коэффициенты при переменных в этих уравнениях для временного индекса  $TTi$  имеют линейную зависимость от коэффициентов в уравнениях для буферного индекса  $Ib$  (табл. 7), что даёт возможность расчёта буферного индекса  $Ib$ , требующего больший объем данных на основании временного индекса  $TTi$ .

Первые три типа уравнений таблицы 6, как правило, описывают участки УДС завершающиеся сегментами, на которых образуются заторы (т.е. коэффициент  $a > 0$ ) или начинающиеся с таких сегментов (т.е. коэффициент  $a < 0$ ). Полиномиальные регрессионные уравнения 2-го и 3-его порядков, как правило, описывают участки УДС с чередованием сегментов, на которых движение может быть затруднено, с сегментами, на которых затруднение движения практически отсутствует.

5. Сравнение затрат на проведение исследований показало существенное снижение затрат при использовании МИГД, таблица 8.

Таблица 6. Результаты расчётов временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов по 9 городам РФ

Город	Исследуемый путь	Протя- жён- ность, км	Вре- менной индекс	Буфер- ный индекс	Уравнение зависимости временного $TTi$ буферного $Ib$ индексов	$R^2$
Иркутск	мкр. Солнечный – ул. Байкальская – ул. Тимирязева – ул. Ленина – Сквер им. Кирова – ул. Чкалова – ул. Дзямбула – ул. Тракторная – ул. Мира – ул. Новаторов	18,20	2,429	0,625	$Ib = 0,3625 \cdot TTi - 0,1878$	89,5%
	мкр. Синюшина гора – ул. Маяковского – ул. Ст. Разина – ул. Марата – ул. Ленина – ул. Дзержинского – ул. КЛибкнехта – ул. Советская – ул. Урожайная	14,21	3,548	1,029	$Ib = 0,3111 \cdot TTi + 0,1195$	78,0%
Сочи	ул. Донская – ул. Транспортная – просп. Курортный – ул. Горького	13,10	2,654	0,905	$Ib = 0,3543 \cdot TTi + 0,0576$	65,8%
	ул. Виноградная – ул. Егорова – ул. Несебская – ул. Орджоникидзе – ул. Черноморская – пр. Курортный	15,75	1,728	0,416	$Ib = 0,3527 \cdot TTi + 0,0085$	92,6%
	Московский тракт – ул. К.Маркса – ул. О.Кошевого – ул. Иркутская – ул. Октябрьская – ул. Ленина – ул. Ворошилова – ул. Чайковского	11,67	1,481	0,243	$Ib = 0,6362 \cdot TTi - 0,6425$	95,3%
Ангарск	Московский тракт – ул. Чайковского – Ленинградский пр. – ул. Социалистическая – ул. Энгельса – ул. Алёшина – ул. Горького – ул. К.Маркса – ул. Коминтерна – ул. Социалистическая – ул. Декабристов	24,84	1,333	0,174	$Ib = 0,629 \cdot TTi - 0,6078$	95,4%
Набережные Челны	просп. М.Джамила – просп. Набережночелнинский – просп. Мира – просп. Яшьлек – ул. Моторная – ул. Промышленная – ул. Техническая	26,39	1,619	0,342	$Ib = 0,5199 \cdot TTi - 0,5101$	79,4%
Челны	Пр. Казанский – Мензелинский тр. – ул. Металлургическая – ул. Моторная – ул. Машиностроительная	30,77	1,366	0,257	$Ib = 0,7544 \cdot TTi - 0,7737$	95,5%
Влади- восток	ул. Маковского – просп. 100 лет Владивостока – просп. Красного Знамени – просп. Партизанский – ул. Октябрьская – ул. Алеутская – ул. Светланская – ул. Ладо – Золотой мост	20,33	3,762	1,141	$Ib = 0,157 \cdot TTi + 0,8681$	65,0%
Ростов - на - Дону	ул. Русская – ул. Бородинская – ул. Луговая – ул. Светланская – ул. Ладо – Золотой мост	11,10	4,015	1,618	$Ib = 0,4711 \cdot TTi - 0,3645$	95,5%
	ш. Восточное – просп. Ворошиловский – просп. М.Нагибина – пер. Ольховский – просп. Космонавтов – ул. Орбитальная – ул. Обсерваторная	18,34	2,182	0,589	$Ib = 0,3029 \cdot TTi + 0,2781$	75,0%
Ново- город	просп. Стачки – просп. Сиверса – ул. Красноармейская – просп. Театральный – просп. Шолохова	21,08	2,945	1,281	$Ib = 0,4141 \cdot TTi - 0,0094$	88,4%
Нижний Новго- род	Ольгино – просп. Гагарина – пл. М. Горького	11,79	3,480	1,500	$Ib = 0,5518 \cdot TTi - 0,5416$	93,8%
	просп. КИМа – ул. Свободы – ул. Коминтерна – ш. Сормовское – ш. Московское – ул. Советская – Канавинский мост – ул. Черниговская – ул. Нижне-Волжская – Зеленый съезд – ул. Варварская – ул. Горького – пл. Максима Горького	20,75	2,554	0,688	$Ib = 0,4088 \cdot TTi - 0,3066$	90,2%
Санкт- Петер- бург	ш. Пулковское – пр. Московский – ул. Садовая – пр. Невский – наб. Адмиралтейская	18,78	2,852	0,687	$Ib = 0,3438 \cdot TTi + 0,0227$	67,0%
	ул. Софийская – ул. Салова – ул. Самойловой – ул. Нефтяная – наб. Обводного канала – наб. Синоп- ская – наб. Смольная – наб. Воскресенская – наб. Кутузова – наб. Дворцовая – наб. Адмиралтейская	23,06	2,601	0,631	$Ib = 0,2929 \cdot TTi + 0,2822$	56,6%
	ул. В. Сыромятническая – Садовое кольцо (против час. стрелки) – ул. В. Сыромятническая	15,56	4,913	1,617	$Ib = 0,2545 \cdot TTi + 0,4282$	84,9%
Москва	МКАД – ш. Варшавское – ул. Большая тульская – ул. Павловская – ул. Пятницкая – наб. Москворец- кая – наб. Кремлевская – ул. Моховая – ул. Охотный ряд – бульв. Театральный – ул. Большая Лу- бянка – ул. Сретенка – просп. Мира – ш. Ярославское – МКАД	38,88	3,294	0,929	$Ib = 0,3076 \cdot TTi + 0,0747$	87,9%
	МКАД – ш. Энтузиастов – ул. С. Радонежского – ул. Николоямская – ул. Яузская – ул. Солянка – пер. Солянский – Старая Площадь, проезд Китайгородский – наб. Москворецкая – наб. Кремлевская – ул. Моховая – ул. Воздвиженка – ул. Н. Арбат – просп. Кутузовский – ш. Можайское – МКАД	32,67	3,429	0,941	$Ib = 0,2317 \cdot TTi + 0,5328$	81,9%

Таблица 7. Зависимость уравнений динамики буферного индекса  $Ib$  от уравнений динамики временного индекса  $TTi$

Тип описывающего уравнения	Уравнения регрессии оценки динамики буферного индекса $Ib$ на основе временного индекса $TTi$			
Линейный $y = ax + b$	$a_{Ib}=0,3543a_{TTi}-0,0001$ $R^2=92,17\%$	$b_{Ib}=0,4225b_{TTi}-0,0528$ $R^2=88,15\%$		
Логарифмический $y = a \cdot \ln(x) + b$	$a_{Ib}=0,2933a_{TTi}-0,2969$ $R^2=86,05\%$	$b_{Ib}=0,3022b_{TTi}+2,2596$ $R^2=86,25\%$		
Экспоненциальный $y = b \cdot e^{ax}$	$a_{Ib}=1,0942a_{TTi}+6 \cdot 10^{-5}$ $R^2=91,18\%$	$b_{Ib}=0,2244b_{TTi}+0,3482$ $R^2=89,07\%$		
Полином 2 порядка $y = ax^2 + bx + c$	$a_{Ib}=0,3605a_{TTi}+2 \cdot 10^{-10}$ $R^2=89,83\%$	$b_{Ib}=0,4623b_{TTi}+4 \cdot 10^{-5}$ $R^2=92,97\%$	$c_{Ib}=0,5015c_{TTi}-0,4115$ $R^2=90,93\%$	
Полином 3 порядка $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$	$a_{Ib}=0,2653a_{TTi}+10^{-10}$ $R^2=96,7\%$	$b_{Ib}=0,3294b_{TTi}-5 \cdot 10^{-7}$ $R^2=95,81\%$	$c_{Ib}=0,3408c_{TTi}+2 \cdot 10^{-4}$ $R^2=93,39\%$	$d_{Ib}=0,431d_{TTi}-0,3262$ $R^2=87,81\%$

Таблица 8. Затраты при использовании ЕИГД и МИГД

Индекс	При использовании ЕИГД, руб.	При использовании МИГД, руб.	Абсолютное отклонение, руб.	Относительное отклонение
Временной индекс $TTi$	265 365 284	26 152 651	-239 212 633	$9,86 \cdot 10^{-2}$
Буферный индекс $Ib$	1 194 143 779	117 686 929	-1 076 456 850	$9,86 \cdot 10^{-2}$

Дополнительное снижение затрат возможно за счёт использования взаимозависимостей временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов, указанных в таблице 6, тем самым снизив затраты до 26 млн. рублей. Для получения данных для расчёта временного индекса  $TTi$ , согласно табл. 1, достаточно проводить сбор данных в течение нескольких часов в сутки, что даёт возможность дополнительного снижения затрат на сбор данных в 9,6 раза до 2,7 млн. рублей. Снижение затрат и применение полученных в ходе исследований результатов позволяет повысить точность и объективность оценки надёжности функционирования УДС и повысить эффективность МДД более чем в 400 раз.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические и технологические решения, имеющие существенное значение для повышения эффективности мониторинга дорожного движения. На основании проведённых исследований получены следующие результаты и сделаны основные выводы:

1. Разработанные вариативные математические модели позволяют устанавливать зависимости влияния периодичности проведения замеров и объёма выборки на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов;

2. Полученные на основе разработанных вариативных математических моделей зависимости позволяют выполнять оценку влияния периодичности проведения замеров и объёма выборки на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов, которая сформулирована в следующих рекомендациях по проведению обследований:

- для определения значений временного индекса  $TTi$  с 95% точностью интервалы замеров должны составлять не более 18 мин. при отсутствии светофорного объекта и НПП и не более 9 мин. при их наличии;

- для определения значений буферного индекса  $Ib$  с 95% точностью интервалы замеров должны составлять не более 10 мин. при отсутствии светофорного объекта и НПП и не более 2 мин. при их наличии;

- для определения значений временного индекса  $TTi$  с 95% точностью необходима выборка из массива данных о скоростях движения в объёме не менее 1,72%, для буферного индекса  $Ib$  не менее 4,87% от общего числа движущихся автомобилей.

На основе полученных результатов сделан вывод о том, что оценку надёжности функционирования УДС следует проводить на основе МИГД.

Также установлено, что на точность определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов может оказывать влияние возможное совпадение периодов измерений с периодичностью работы светофорных объектов и периодичностью других факторов, влияющих на изменения продолжительности передвижения автомобилей в течение суток;

3. Выявленная зависимость значений временного индекса  $TTi$  от протяжённости исследуемого пути показывает необходимость применения шкал оценки надёжности функционирования городских УДС, дифференцированных в соответствии со значениями протяжённости передвижения, что даёт повышение объективности и точности оценки надёжности функционирования УДС.

На основе проведённого эксперимента для г. Иркутска разработаны дифференцированные по протяженности шкалы для экспресс-оценки и 6 шкал оценки уровней обслуживания для диапазонов протяжённости передвижений от 0 до 58 км;

4. Научно обоснованная и разработанная «Методика сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки» для определения временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов позволяет осуществлять сбор, обработку и систематизацию этих данных из единого ГИС-источника, что даёт возможность проводить унифицированную оценку надёжности функционирования УДС городов РФ, повышает точность и объективность мониторинга дорожного движения и снижает затраты на его проведение;

5. Выполненная экспериментальная проверка разработанной «Методики сбора и обработки данных сервиса «Яндекс.Пробки» на примере данных о скоростных режимах 9 разных по размеру территории и численности населения городов РФ, находящихся в разных регионах и различающихся по параметрам своих УДС подтверждает возможность её применения для получения ГИС-данных на территории РФ и включения в нормативные и методические документы.

В ходе экспериментальной проверки выявлены зависимости между значениями временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов. Получены пять типов уравнений описания динамики временного  $TTi$  и буферного  $Ib$  индексов в зависимости от протяжённости исследуемых путей и выявлены зависимости между значениями коэффициентов этих уравнений. Выявленные зависимости позволяют многократно минимизировать затраты на проведение обследований за счёт оценки буферного индекса  $Ib$  на основе значений временного индекса  $TTi$ , расчёт которых требует многократно меньший объём данных;

Повышение эффективности мониторинга дорожного движения достигается за счёт использования дифференцированных шкал оценки уровня обслуживания, повышающих точность и объективность оценки надёжности функционирования УДС, а также снижения затрат на проведение мониторинга дорожного движения на основе МИГД более, чем в 400 раз, по сравнению с использованием ЕИГД.

**Материалы диссертации опубликованы в следующих печатных работах:  
- в журналах, индексируемых международной системой Scopus:**

1. **Gorbunov R. N., Gorbunova Z. V., Kolchin V. S., Mikhailov A. Yu., Pirov Zh. T.** Analysis of the impact of the sample size on the accuracy of determining the travel time and buffer indices IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – vol. 632.

**- в изданиях из перечня ВАК РФ:**

2. **Горбунов Р.Н.**, Михайлов А.Ю., Пиров Ж.Т. Оценка уровня обслуживания на основе критериев надёжности // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 10 (129). – с. 188-194.

3. **Горбунов Р.Н.**, Горбунова З.В., Михайлов А.Ю. Уровень обслуживания как показатель надёжности улично-дорожной сети // Мир транспорта. – 2018. – № 4 (77). – Т. 16. – с. 194-203.

4. **Горбунов Р.Н.** Оценка уровня обслуживания на основе временного индекса // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 5 (76). – с. 189–196.

5. **Горбунов Р.Н.** Расчёт буферного индекса на основе данных сервиса «Яндекс.Пробки» // Вестник гражданских инженеров. – 2019. – № 6 (77). – с. 284–289.

6. **Горбунов Р.Н.**, Горбунова З.В., Михайлов А.Ю. Анализ влияния периодичности проведения измерений на точность определения временного и буферного индексов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 7. – с. 103-111.

7. **Горбунов Р.Н.**, Горбунова З.В., Колчин В.С. Методика оценки качества обслуживания в рамках улично-дорожной сети на базе временного и буферного индексов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 8. – с. 80-86.

**- в научных рецензируемых изданиях и сборниках трудов:**

8. **Горбунов Р.Н.** Оценка уровня обслуживания в городских условиях: мат. 99-й международной науч.-техн. конф. «Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации», Иркутск, 2017. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, с. 529-532.

9. **Горбунов Р.Н.**, Михайлов А.Ю., Пиров Ж.Т. Оценка качества функционирования улично-дорожных сетей на основе данных систем ГЛОНАСС/GPS: материалы V Международной научно-практической конференции «Современные проблемы безопасности жизнедеятельности: интеллектуальные транспортные системы и ситуационные центры», 2018. – Казань: Центр инновационных технологий, 2018. – с. 104-108.

10. **Горбунов Р.Н.**, Горбунова З.В., Колчин В.С., Михайлов А.Ю., Пиров Ж.Т. Анализ влияния периодичности замеров на точность определения временного и буферного индексов: мат. 106-й международной науч.-техн. конф. «Безопасность колёсных транспортных средств в условиях эксплуатации», Иркутск, 23-26 апреля 2019 г. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – с. 667-676.

11. **Горбунов Р.Н.** Применение геоинформационных систем для анализа условий функционирования улично-дорожной сети // Сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума «Наука и инновации- современные концепции», г. Москва, 12 марта 2020 г. – М.: Издательство Инфинити, 2020. – с. 110 – 116.

12. **Горбунов Р. Н.** Критерии оценки надёжности функционирования улично-дорожной сети // Научно-практические исследования. – 2020. – № 3-2 (26). – с. 16 – 20