

На правах рукописи



**ПОЛЯКОВ Александр Сергеевич**

**Разработка методики оценки эффективности  
комплекса мероприятий по увеличению связности  
улично-дорожной сети**

(05.22.10 – «Эксплуатация автомобильного транспорта»)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орёл 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» в Проблемной лаборатории безопасности и организации дорожного движения (ПЛОБД).

**Научный  
руководитель:**

**Жанказиев Султан Владимирович,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные  
оппоненты:**

**Курганов Валерий Максимович,**  
доктор технических наук, профессор  
кафедры «Математика, статистика и  
информатика в экономике», ФГБОУ ВО  
«Тверской государственный университет»,  
г. Тверь

**Ведущая организация:**

**Шевцова Анастасия Геннадьевна,**  
кандидат технических наук, старший  
преподаватель Белгородского  
государственного технологического  
университета им. В.Г. Шухова, г. Белгород  
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный  
исследовательский технический  
университет», г. Иркутск

Защита состоится **«05» июля 2017 г. в 11:30 часов** на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.111.03 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: **302030, г. Орел, ул. Московская, д. 77.**

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

Автореферат разослан **«30» мая 2017 г.** Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» ([www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru)) и на официальном сайте Министерства образования и науки Российской Федерации ([vak.ed.gov.ru](http://vak.ed.gov.ru)).

*Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации в двух экземплярах направлять в диссертационный совет по адресу: 302026, г. Орел, ул. Комсомольская, д. 95.*

*Телефон для справок +79155080508. E-mail: [katunin57@gmail.com](mailto:katunin57@gmail.com).*

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 999.111.03



А.А. Катунин

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

Улично-дорожные сети (УДС) относятся к самым дорогим и трудноизменяемым элементом городской транспортной инфраструктуры, поскольку связи на УДС представляют собой реальные физические соединения в 2-х или 3-х мерном пространстве. Любые, связанные с изменением структуры УДС - зонирование городских территорий, реконструкция УДС, разработка комплексных схем организации движения (КСОД) и проектов организации дорожного движения (ПОД) требуют обоснования ожидаемых результатов, в том числе с позиций количественной оценки их эффективности.

Различные аспекты оценки эффективности проектных решений по структуре УДС исследовались в работах Клинковштейна Г.И., Жанказиева С.В., Сильянова В.В., Кондратьева В.Д., Кременца Ю.А., Лобанова Е.М., Капитанова В.Т., Зырянова В.В., Кочерги В.Г., Афанасьева М.Б., Коноплянко В.И., Макаровой И. В., Михайлова А.Ю., Михеева С.В., Печерского М.П., Пугачёва И.Н., Хилажева Е.Б., Верейкина В.Е., Дивочкина О.А., Печерского М.П., Ткаченко Б.А., Хилажева Е.Б., Хоровича Б.Г., Шелкова Ю.Д. и др.

Детализированы и обоснованы методики для оценки многих показателей эффективности функционирования транспортного комплекса в зависимости от условий движения: пропускная способность УДС, скорости движения, экологическое загрязнение, безопасность. Значительное число исследований проводится по проблеме управления движением в условиях, когда исчерпана пропускная способность (дорожные «пробки»), по транспортному моделированию и созданию построению систем управления в этой сфере.

На этом фоне относительно мало изученной остается задача количественной оценки связности УДС. Руководством по проектированию городских улиц и дорог (Москва, Стройиздат, 1980), предусмотрено применение т.н. «коэффициента непрямолинейности». Однако практического применения этот коэффициент фактически не находит. В частности, в Своде правил СП 42.13330.2011 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» (актуализированная редакция СНиП 2.07.0189) не только не имеется методического обеспечения в части обеспечения требований по значению этого коэффициента непрямолинейности, но не содержится и самого требования по необходимости его использования.

Ситуация усугубляется тем, что проблема заключается не только в транспортной планировке городов. Развитие ИТС и АСУ ДД в условиях интенсивной автомобилизации неизбежно во главу угла ставит критерии увеличения пропускной способности, что обеспечивается, в том числе, закрытием левый и правых поворотов, разворотов, введением

односторонних движений и т.д. Насколько при этом ухудшается связность УДС, как это влияет на перепробеги транспортных средств, на формирование заторовых ситуаций на смежных участках УДС как правило не учитывается.

Достаточных исследований и методических рекомендаций нет не только на уровне практических расчетов. Не имеется научного обоснования принципов транспортного районирования территории города для оценки связности, нет алгоритмов расчета коэффициента непрямолинейности с учетом транспортных характеристик, расчет коэффициента не предусматривается компьютерными программами для транспортного моделирования.

**Направления исследований.** В соответствии с паспортом специальности исследования включали следующие направления: оптимизация планирования, организации и управления перевозками пассажиров и грузов, совершенствование организации дорожного движения, повышение эффективности транспортного обслуживания при минимизации затрат ресурсов и потерь, развитие инфраструктуры для обеспечения перевозочного процесса.

**Целью работы.** является повышение эффективности мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры города за счет использования пространственных и семантических свойств транспортной модели путем разработки и применения методики оценки эффективности мероприятий по увеличению связности улично-дорожной сети.

Достижение указанной цели потребовало решить следующие задачи:

1) разработать количественный критерий, позволяющий оценивать связность улично-дорожной сети как свойство транспортной инфраструктуры города, обеспечивающее повышение эффективности транспортного обслуживания и минимизацию затрат ресурсов и потерь, связанных с перемещением пассажиров и грузов.

2) сформулировать и обосновать модели транспортного районирования территории города и возможности применения существующих методов оценки матриц корреспонденции между этими районами для количественной оценки связности УДС, отвечающей целям разработки схем организации движения и безопасности перевозок, оптимизации планирования и управления перевозками пассажиров и грузов;

3) разработать и реализовать методику расчета количественного критерия для оценки связности УДС города с использованием возможностей транспортных моделей, обосновать возможность использования транспортной модели и данных в составе Интеллектуальной транспортной системы для выработки решений по обеспечению экологической и дорожной безопасности автотранспортного

комплекса, по изменениям в организации дорожного движения и по реконструкции улично-дорожной сети;

4) разработать критерии и методику по оценке социально-экономической эффективности инвестиционных проектов в области эффективного развития автомобильного транспорта, обеспечения его работоспособности, дорожной, экологической безопасности, ресурсосбережения и развития транспортной инфраструктуры;

5) на основе разработанных моделей и методов выполнить расчеты по оценке ожидаемой эффективности предлагаемых мероприятий адресно-инвестиционной программы города Москвы с учетом увеличения связности УДС и выработать рекомендации по практическому использованию выполненных разработок.

**Предмет исследования** – процесс поддержки принятия решений по модернизации и развитию транспортной инфраструктуры города на основе транспортной модели города в составе:

специальное и прикладное программное обеспечение информационной системы транспортного моделирования города Москвы;

база данных с представлением улично - дорожной сети в формате «узел-отрезок-узел» и разрешенных вариантов движения, с привязкой к объектам улично-дорожной сети, к расположению технических средств регулирования движения, детекторам транспорта и другим атрибутам описания дорожно-транспортной инфраструктуры;

**Объект исследования** – система управления транспортной инфраструктурой, включающей в себя: структуру улично-дорожной сети, проекты и схемы организации движения, технические средства организации дорожного движения, транспортные потоки и параметры прогнозных значений транспортных потоков в зависимости от объемов и качества исходных данных по транспортным районам города, полученные с использованием транспортной модели Московского транспортного узла; пропускная способность УДС и существующие распределения потоков транспортных средств по УДС, методы их оценки с использованием матриц корреспонденции.

**Методы исследования.** Теоретической основой исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых и специалистов в области транспортного моделирования и математической статистики.

Использованы общенаучные методы (сопоставительный анализ, элементы теории сложных систем, транспортное моделирование, алгоритмизация, программирование, построение баз данных коллективного пользования и др.), а также специальные методы обработки данных с использованием программных средств транспортной модели.

### **Научная новизна.**

Предложен и обоснован новый количественный критерий для оценки связности УДС, основанный на известном коэффициенте непрямолинейности и названный коэффициентом несвязности, который позволяет оценивать связность улично-дорожной сети с учетом фактической интенсивности транспортного сообщения между районами города.

Разработана и обоснована модель транспортного районирования территории города и возможность применения существующих методов оценки матриц корреспонденции с использованием транспортной модели на основе данных от средств фотовидеофиксации и детекторов транспорта в составе Интеллектуальной транспортной системы (или АСУ ДД), позволяющая проводить расчет коэффициента несвязности с учетом как структуры улично-дорожной сети, так и схем организации движения;

Разработан методический инструментарий и предложен алгоритм обоснования приоритетного комплекса мероприятий по развитию транспортной инфраструктуры на основе оценки их эффективности с использованием коэффициента несвязности УДС

**Практическая ценность** работы заключается в экспериментальной проверке методики расчета коэффициентов связности УДС города в целом и его отдельных территорий для возможных проектных решений по изменениям в организации дорожного движения и по реконструкции улично-дорожной сети.

Разработана методика оценки связности УДС на основе коэффициента несвязности с учетом транспортного районирования территории города, отвечающей целям и содержанию работ по модернизации и развитию транспортной инфраструктуры, включающей структуру улично-дорожной сети, проекты и схемы организации движения.

Разработана методика по оценке социально-экономической эффективности для формирования инвестиционных проектов в области организации дорожного движения и развития транспортной инфраструктуры на предпроектной и проектной стадиях.

Основные положения и результаты могут быть использованы эксплуатационными и проектными организациями, работающими с транспортными системами

**Достоверность** теоретических положений работы, ее практических результатов, рекомендаций и выводов подтверждается результатами верификации собранных данных по экспериментальным участкам, экспериментальной проверкой точности результатов тестовых натурных замеров с результатами расчёта на основе данных транспортной модели.

**Область исследования** соответствует паспорту специальности 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта» п.6 «Организация

безопасности перевозок и движения» и п. 14 «Развитие инфраструктуры перевозочного процесса».

**Реализация работы.** Предложенные в диссертации методы оценки УДС применены в рамках разработки и реализации Государственной программы города Москвы «Развитие транспортной системы на 2012-2016 гг.», а также создания и эксплуатации транспортной модели в составе ИТС города Москвы.

На основе разработанных моделей выполнены расчеты по оценке ожидаемой эффективности предлагаемых мероприятий адресно-инвестиционной программы города Москвы с учетом увеличения связности УДС.

**На защиту выносятся:**

Новый количественный критерий для оценки связности УДС, основанный на известном коэффициенте непрямолинейности и названный коэффициентом несвязности.

Методика расчета коэффициента несвязности УДС с использованием транспортной модели города, отвечающей целям и содержанию проектных работ по модернизации и развитию транспортной инфраструктуры.

Модернизация и экспериментальная проверка транспортной модели города Москвы для расчета коэффициента несвязности УДС города в целом и его отдельных территорий, обеспечивающих выработку проектных решений по изменениям в организации дорожного движения и по реконструкции улично-дорожной сети

Методика оценки социально-экономической эффективности инвестиционных проектов и обоснования приоритетных направлений развития транспортной инфраструктуры на предпроектной и проектной стадиях в области организации дорожного движения, капитального строительства, реконструкции, технического оснащения объектов транспорта и транспортной инфраструктуры.

Результаты расчетов по оценке ожидаемой эффективности предлагаемых мероприятий адресно-инвестиционной программы города Москвы с учетом увеличения связности УДС.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 печатных работы, в том числе 4 – в журналах, рецензируемых ВАК.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследований были доложены и получили одобрение на XI Международном навигационном форуме (Москва 25-26 апреля 2017 года, Экспоцентр), V международном форуме «Умный город будущего», (Москва, 29-30 ноября 2016 года), международном форуме «Транспортная неделя» (Москва, 26 ноября - 2 декабря 2016 года), международной конференции по безопасности дорожного движения "Безопасные дороги/Safety Roads" (31 марта 2016 г., Москва, ВДНХ), международной конференции Fujitsu World Tour: Reshaping ICT,

Reshaping Business and Society. (Москва, 17 сентября 2014 г), VI Международном конгрессе ROAD TRAFFIC RUSSIA «Дорожное движение в Российской Федерации» (Москва, 1 декабря 2015 года), 6-м Российском международном конгрессе по интеллектуальным транспортным системам "ИТС: Стратегия. Технологии. Образование" (21-23 апреля 2014 г., Москва, Комплекс Гостинный Двор)

**Объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка литературы. Она изложена на 130 стр. текста, содержит 8 таблиц, 42 рисунка и библиографический список из 130 наименований.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность выбранной темы, обозначается цель работы и содержание поставленных задач, формулируется предмет исследования, указываются методы исследования.

**В первой главе** проанализированы особенности методов повышения эффективности функционирования транспортного комплекса города в условиях интенсивной автомобилизации.

Подчеркивается, что в условиях интенсивной автомобилизации автомобилизации населения перегрузка улично-дорожных сетей, в значительной мере обуславливается недооценкой проблем организации дорожного движения (отсутствием, в частности, закона об организации дорожного движения) и сложившимся приоритетом градостроительного и земельного законодательства над транспортным. Проблемы транспортного планирования усугубляются правоприменительной практикой, когда свершившиеся де-факто события не сохраняются, даже если были совершены с нарушениями требований законов и нормативов.

Ситуация усугубляется тем, что развитие автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУ ДД) в условиях интенсивной автомобилизации неизбежно во главу угла ставит критерии увеличения пропускной способности УДС, что обеспечивается, в том числе, закрытием левых и правых поворотов, разворотов, введением односторонних движений и т.д. Но при этом, как правило, не учитывается - насколько ухудшается связность УДС, как это влияет на перепробеги транспортных средств, на формирование заторовых ситуаций на смежных участках УДС и другие показатели.

В определенной мере такая ситуация обуславливается используемыми количественными критериями эффективности функционирования транспортного комплекса.

В частности, относительно мало изученной остается задача обеспечения связности УДС, которая в действующих нормативно - методических документах характеризуется т.н. «коэффициентом

непрямолинейности» (КН). Достаточных исследований и методических рекомендаций нет не только на уровне практических расчетов. Проведение этих работ в значительной мере основывается на практическом опыте и знаниях специалистов, что существенно увеличивает влияние субъективных факторов на точность конечных результатов.

Новые требования и возможности по оценке связности возникают при создании интеллектуальных транспортных систем - прежде всего в связи с использованием транспортных моделей. С одной стороны в составе транспортной модели имеется много исходных данных, необходимых для расчета коэффициента связности. В то же время фактический расчет коэффициента связности не предусматривается компьютерными программами для транспортного моделирования.

Применительно к задаче разработки методики для оценки эффективности комплекса мероприятий по увеличению связности улично-дорожной сети нами предлагается следующий состав критериев и соответствующих показателей (таблица 1).

Таблица 1 – Состав критериев и показателей для оценки эффективности проектных решений по УДС.

<b>Критерий</b>	<b>Количественные показатели</b>
Задержка и длина очереди	Средняя задержка
	Суммарная задержка
	Максимальная задержка
	Длина очереди
Пропускная способность	Плотность УДС
	Емкость УДС
Транспортная работа УДС	Суммарные затраты времени с учетом маршрутов движения и интенсивностей транспортных потоков на этих маршрутах
Экологическая безопасность	суммарный выброс окиси углерода за единицу времени
	суммарный выброс окиси азота единицу времени
	уровень транспортного шума
Безопасность дорожного движения	снижение числа пострадавших в ДТП
	риски ДТП - суммарная конфликтная загрузка УДС
Экономический эффект	интегральный экономический эффект - сумма эффектов за весь период сравнения;
	индекс доходности - отношение суммы эффектов к общей величине единовременных затрат;
	срок окупаемости - минимальный интервал времени от начала расчетного периода, за пределами которого интегральный эффект становится и в дальнейшем остается неотрицательным;
Устойчивость функционирования УДС	коэффициент устойчивости

Уровень обслуживания на УДС	коэффициент интенсивности способности	обслуживания движения	- к	отношение пропускной
-----------------------------	---------------------------------------	-----------------------	-----	----------------------

Для каждого из этих показателей проанализированы существующие методы расчета и выделены те из них, которые могут быть реализованы в рамках использования транспортных моделей города. В частности сделан вывод о том, что создание интеллектуальных транспортных систем, переход от управления транспортными потоками к управлению каждой единицей транспортного средства индивидуально требуют применения более широкого класса транспортных моделей, в которых учитываются нелинейные и синергетические особенности транспортных систем, стохастический характер и нечеткая логика исходных данных, динамическое изменение целей и условий функционирования транспортного комплекса.

Использование транспортной модели для расчета количественных показателей, характеризующих связность УДС, предъявляет специфические требования к методологии применения программного обеспечения и информационного обеспечения транспортных моделей на всех этапах:

- выбор типа транспортной модели и программного обеспечения для ее реализации;

- сбор и ввод исходных данных, оценка возможностей использования модели путем верификации, калибровки и валидации;

- выполнение экспериментов, интерпретация и анализ результатов.

**Во второй главе** изложены результаты разработки модели для оценки связности УДС и ее влияния на эффективность функционирования транспортного комплекса

В качестве количественного показателя для оценки уровня связности улично-дорожной сети предлагается ввести понятие «коэффициента несвязности» (КНС) и называть ею величину, при расчете которой учитывается интенсивность корреспонденций между пунктами  $i$  и  $j$  (значения матрицы корреспонденций):

$$КНС_{гор} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij} КН_{ij}}{n^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_{ij}}$$

где:  $I_{ij}$  – элемент матрицы корреспонденций, отражающий интенсивность движения из пункта  $i$  в пункт  $j$  (авт/сут).

$КН_{ij}$  - коэффициент непрямолинейности, рассчитываемый по известной формуле:

$$КН_{ij} = \frac{l_{ij}^{\phi}}{l_{ij}^{\beta}}$$

где:  $l_{ij}^{\phi}$  - фактическое расстояние между двумя точками  $i$  и  $j$  с учетом структуры улично-дорожной сети (наличие дорог и улиц, естественные и искусственные препятствия, разрешенные направления движения и т.д.);

$l_{ij}^B$  – прямое расстояние между точками  $i$  и  $j$  «по воздуху».

Такое определение коэффициента несвязности позволяет заметно расширить сферу его использования. Например, умножив на среднюю длину маршрута между точками  $i$  и  $j$  и анализируемый период времени получаем суммарный перепробег:

$$\Delta L_{\Sigma} = \Delta t * l_{cp} * KHC_{гор}$$

Используя среднюю скорость движения можно рассчитать потери времени:

$$\Delta T = \Delta L_{\Sigma} / v_{cp}$$

Эти значения в свою очередь позволяют по известным соотношениям оценить экологические показатели и показатели социально-экономической эффективности функционирования транспортного комплекса города.

Например, в «Методических указаниях по расчету выброса вредных веществ автомобильным транспортом» масса выброшенного за расчетный период вредного вещества напрямую связывается с суммарным пробегом групп автомобилей с различными типами ДВС (бензиновыми, дизельными, газовыми и др.):

$$M_j^t = \sum_I \sum_j m_{jik} Z_{ik} \prod_n R_{jik}$$

где:  $I$  - количество групп автомобилей с различными типами ДВС;

$m_{jik}$  - удельный выброс  $j$ -го вредного вещества автомобилем  $i$ -й группы с двигателем  $k$ -го типа на расчетный период  $t$  (включает в себя пробеговый выброс с учетом картерных выбросов и испарений топлива), г/км;

$Z_{ik}$  - пробег автомобилей  $i$ -й группы с двигателем  $k$ -го типа за расчетный период, млн. км;

$\prod R_{jik}$  - произведение коэффициентов влияния  $n$  разных факторов на выброс  $j$ -го вредного вещества автомобилями  $i$ -й группы с двигателем  $k$ -го типа в рассматриваемом регионе.

Реализация указанного подхода в рамках функционирующих транспортных моделей города требует решения ряда специфических задач, содержание и последовательность которых представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 - последовательность действий по повышению эффективности функционирования транспортного комплекса города на основе увеличения связности улично-дорожной сети

Начальным этапом и основой методики расчета связности является **транспортное районирование города**. На практике даже незначительное изменение границ районов приводит к существенному изменению расчетной величины коэффициента несвязности. Естественно, что число и размеры транспортных зон выбирают в зависимости от особенностей структуры улично-дорожной сети города. Поэтому надо исходить из того, что чем больше назначено зон, тем

точнее будет определен транспортный и пассажиропоток и тем меньше расчетная величина будет зависеть от принципов проведенного районирования.

В диссертационном исследовании проанализированы различные принципы территориального зонирования (административно-территориальное районирование, функциональное, транспортное).

С учетом положительных и отрицательных сторон этих принципов предлагается в качестве варианта для расчета коэффициента несвязности (непрямолинейности) с использованием транспортной модели не проводить транспортное районирование, а в качестве центров транспортных районов использовать координаты остановок общественного транспорта (наземного и внеуличного). В настоящее время на маршрутной сети общественного транспорта Москвы имеется 9916 остановок, что позволяет с достаточной полнотой закрыть всю территорию города и описать маршруты движения пассажиров.

Для **оценки матрицы корреспонденций** существующие ручные методы (подсчет интенсивности движения наблюдателями или анкетирование) малопригодны прежде всего из-за необходимости использования транспортного районирования с небольшим размером транспортных зон, что, соответственно, требует привлечения большого количества работников. Хорошей альтернативой методам подсчета интенсивностей движения наблюдателями или посредством анкетирования является методика формирования т.н. «качественной матрицы корреспонденции» (КМК), предложенной С.В. Жанказиевым, А.И. Воробьёвым и Д.Ю. Морозовым. Методика основана на технических средствах идентификации транспортных средств, передвигающихся по улично-дорожной сети. Решена задача оптимального сочетания технических характеристик идентификационных блоков и способа их размещения на участках улично-дорожной сети при проектировании систем косвенного управления транспортными потоками. Для целей расчета коэффициента несвязности предлагается также два подхода: (гравитационный и энтропийный), преимущественно основанные на данных об интенсивности движения, фиксируемых детекторами транспорта в составе интеллектуальной транспортной системы.

При использовании гравитационной модели предполагается, что интенсивность движения  $I_{i,j}$  между транспортными районами  $i$  и  $j$  пропорциональна исходящему потоку  $U_i$  из района  $i$ , входящему потоку  $V_j$  в район  $j$  и некоторой функции  $f(r_{i,j})$ , где  $r_{i,j}$  – расстояние между районами  $i$  и  $j$ :

$$I_{i,j} = k * f(r_{i,j}) * U_i * V_j \quad i=1....N: j=1.....N$$

Здесь  $k$  постоянный коэффициент, а  $I_{i,j}$  элемент матрицы корреспонденций  $[[I]]$ .

В качестве функции  $f(r_{i,j})$  обычно применяют экспоненциальную функцию, что приводит к следующему математическому выражению:

$$I_{i,j} = k * \frac{V_i U_j}{e^{\alpha r_{i,j}}} \quad i=1 \dots N: j=1 \dots N$$

Расстояние  $r_{i,j}$  складывается как сумма длин ребер графа улично-дорожной сети на пути из района  $i$  в район  $j$ :

$$r_{i,j} = \sum_{l_{i,j} \in L_{i,j}} l_{i,j}$$

где:  $L_{i,j}$  – множество элементов (дуг) графа улично-дорожной сети на пути из района  $i$  в район  $j$ :

$l_{i,j}$  - длина конкретного ребра графа УДС на пути  $L_{i,j}$ .

Значение коэффициента  $k$  на расчет коэффициента несвязности не влияет.

На значения  $I_{i,j}$  накладываются совершенно естественные ограничения:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N I_{i,j} &= V_j \\ \sum_{j=1}^N I_{i,j} &= U_i \end{aligned}$$

В литературе имеются различные варианты решения этой системы уравнений для конкретных условий предложены, что позволяет реализовать итерационную процедуру расчета искомых величин матрицы корреспонденций. Достаточно подробная классификация и методы оптимизации рассмотрены в работах А.Дж. Вильсона, А.С. Михайлова, И.М. Головных, А.В. Гасникова.

**В третьей главе** рассмотрена общая методология построения и использования транспортной модели, предназначенной для оценки эффективности комплекса мероприятий по увеличению связности УДС, включая требования к программному и информационному обеспечению.

Методология в целом включает в себя следующие шаги, представленные в виде блок-схемы на рисунке 2.

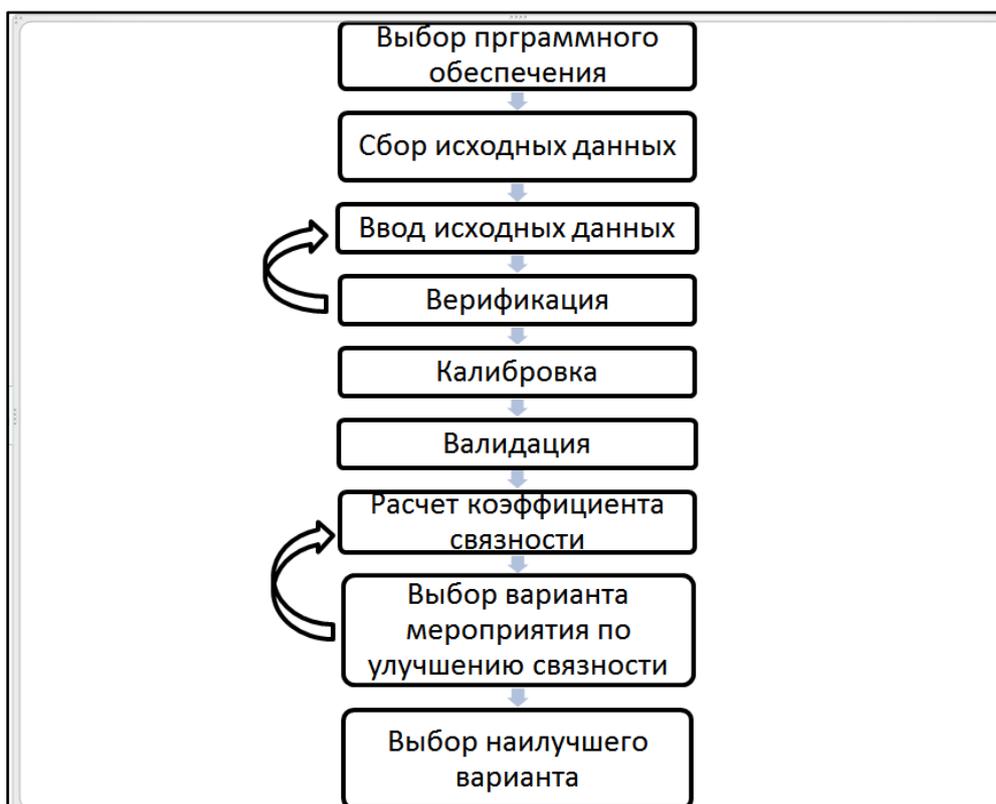


Рисунок 2 – Состав и последовательность действий при использовании транспортной модели, предназначенной для оценки эффективности комплекса мероприятий по увеличению связности УДС

При большом числе районов значения коэффициента межрайонной связности города можно производить расчетом среднего значения по статистической выборке. Необходимый объем выборки зависит от объема генеральной совокупности, от допустимого отклонения и доверительной вероятности. Обычно для практических случаев нормированное отклонение принимают равным 2 ( $t = 2$ ), а допустимую ошибку - 5%.

Также следует исходить из того, что количественная оценка связности играет заметную роль для крупных городов и территорий, в которых число транспортных районов превышает сотни единиц, т. е. генеральная совокупность превышает 10000. В этом случае максимально необходимый объем статистической выборки не превышает 400 единиц, а число транспортных районов, между которыми рассчитывается матрица корреспонденций – 20.

Если есть основания предполагать, что выбранные для статистической оценки транспортные районы имеют какие-то специфические особенности, то расчет следует повторить для другой выборки из 20 транспортных районов и применить критерий Пирсона (Хи-квадрат) для проверки гипотезы о равенстве двух средних значений произвольно распределённых генеральных совокупностей.

После первоначального ввода исходных данных необходимо осуществить **верификацию** - проверку введенной информации. Целью

данного этапа является подтверждение корректности ввода данных по следующим аспектам:

- отсутствие ошибок непосредственно при вводе численных параметров;
- корректность базовых настроек и соотношений элементов модели;
- учет специфических факторов.

Целью этапа **калибровки** является настройка модели таким образом, чтобы выходные параметры модели максимально соответствовали реально наблюдаемым значениям. Задача этапа калибровки – определить такое сочетание значений параметров, при котором достигается выбранная степень соответствия по ключевым выходным параметрам.

Целью этапа **валидации** модели является определение того факта, что модель пригодна для проведения экспериментального анализа объекта исследования. Входными данными для этапа валидации является откалиброванная модели и набор независимых данных той же номенклатуры, что и для проведения калибровки.

Требования к **программному обеспечению** для оценки эффективности комплекса мероприятий по увеличению связности улично-дорожной сети для транспортного планирования и анализа сформулированы и реализованы как подсистема программного обеспечения PTV Vision® VISUM.

Укрупненный перечень проведенных доработок программного обеспечения, позволяющих реализовать методику оценки эффективности комплекса мероприятий по увеличению связности улично-дорожной сети представлен на рисунке 3.



Рисунок 3 - Доработки программного обеспечения PTV Vision® VISUM.

Одним из ключевых факторов успешности применения транспортной модели является **информационное обеспечение**, которое определяется наличием и возможностью сбора необходимых исходных данных. Если по каким-либо причинам отсутствует возможность получить необходимые данные для детального моделирования, следует рассмотреть возможность использования более простых моделей или пересмотреть условия выполнения данного проекта.

**Структура УДС** в транспортной модели задается в виде графа, предоставляющий возможность прокладывать фактический межрайонный маршрут для различных видов транспорта. Программный модуль графа сети обеспечивает хранение, обработку и отображение информации об улично-дорожной сети города, сети железных дорог, трамвайной сети, сети метрополитена в виде направленного графа. Граф УДС создается согласно требованиям к навигационным картам, включающим описание классификаторов, правил цифрового описания, форматов данных, редакционно-технические указания и другие документы.

В таблице 2 приведен перечень основных загружаемых данных с количественными характеристиками для УДС города Москвы.

Таблица 2 - Перечень основных загружаемых данных

Содержание данных	Характеристика	Объем данных, объектов
<b>1. Территориальное планирование</b>		
Картографическая подоснова	масштабов 1:25000 и 1:10000.	
Административное деление	Административные районы	125
Здания, включая объекты городской и внешней логистики	Адрес, тип по классам БТИ, координаты	> 80000
Центроиды всех строений	с информацией по количеству проживающего трудоспособного населения и количеством рабочих мест.	> 80000
Транспортные районы	С детализацией на 3-х уровнях	от 300 до 7000
<b>Граф УДС</b>		
Узлы/остановки	Обеспечивает представление перекрестков, развязок и т.п.	50000
Отрезки УДС	Обеспечивают представление участков автомобильных дорог, улиц, железных дорог	100000
<b>2. Общественные и социальные объекты</b>		
ВУЗы	Учебные места, студенты	> 120

<b>Содержание данных</b>	<b>Характеристика</b>	<b>Объем данных, объектов</b>
Общежития	Тип, общая/жилая площадь, число комнат	> 300
Среднеобразовательные учреждения	Учебные места, студенты по формам обучения	> 120
Школы, детские сады	Количество детей/учащихся и учителей, мест	> 200
Торговые центры Москвы	Общая / эффективная площадь, этажность	> 100
Оптовые продовольственные комплексы	Площадь земельных участков, строений, грузооборот, количество грузового транспорта	> 250
Грузообразующие объекты	Адреса, тоннаж, количество машин	>100
Логистические центры	Логистические центры	>100
Учреждения здравоохранения	Численность мест (коек), врачей по специальностям	>100
Спортивные учреждения	Стадионы, физкультурно-оздоровительные комплексы и прочие объекты	>300
Культурно-развлекательные объекты	Театры, кинозалы, клубы, музеи, парки, аквапарки, зоопарки и пр.	>500
Промышленные объекты	Тип, адрес	>500
<b>3. Данные общественного транспорта</b>		
Маршруты ОТ	Прохождение маршрута с остановками	> 2000
Остановки ОТ	Название, местоположение, пассажиропоток	> 4600
Зоны остановок ОТ	Название, местоположение	> 7500
Автовокзалы	Автовокзалы междугородние	> 3
Ж/д вокзалы	Название, координаты, пассажиропоток (в год)	9
Аэропорты	Название, координаты, пассажиропоток (в год)	3
<b>4. Элементы улично-дорожной сети и организация дорожного движения</b>		
Граф дорог	содержит два основных типа объектов – дуги и узлы	
Узлы	Перекрестки, развязки и т.д.	> 190 000
Отрезки	Участки автомобильных дорог, улицы, железные дороги, линии метрополитена, мосты, переправы, водные пути	> 450 000
Повороты	Повороты	> 1 200 000

Содержание данных	Характеристика	Объем данных, объектов
Примыкания	Места выхода/выхода участников транспортного движения из/в районы	> 15 000
Матрицы корреспонденций		не менее 256
Выделенные полосы для ОТ	Место прохождения, протяженность в км.	>30
Характеристика транспортных потоков		

**Данные об организации дорожного движения** должны обеспечивать хранение, обработку и отображение информации характеристиках УДС, дорожной инфраструктуры и средств организации дорожного движения: тип дороги, количество полос движения, ограничение скорости на дорожном сегменте, проходящие виды транспорта, ограничение движения грузового транспорта и др.

Формирование **предложений о строительстве участка улично-дорожной сети, а также предложений об изменении организации дорожного движения** производится на основе расчета коэффициента связности с использованием транспортной модели. Алгоритм определения приоритетных транспортных мероприятий для повышения показателя межрайонной связности в городе включает несколько повторяющихся и относительно самостоятельных этапов (рисунок 4).

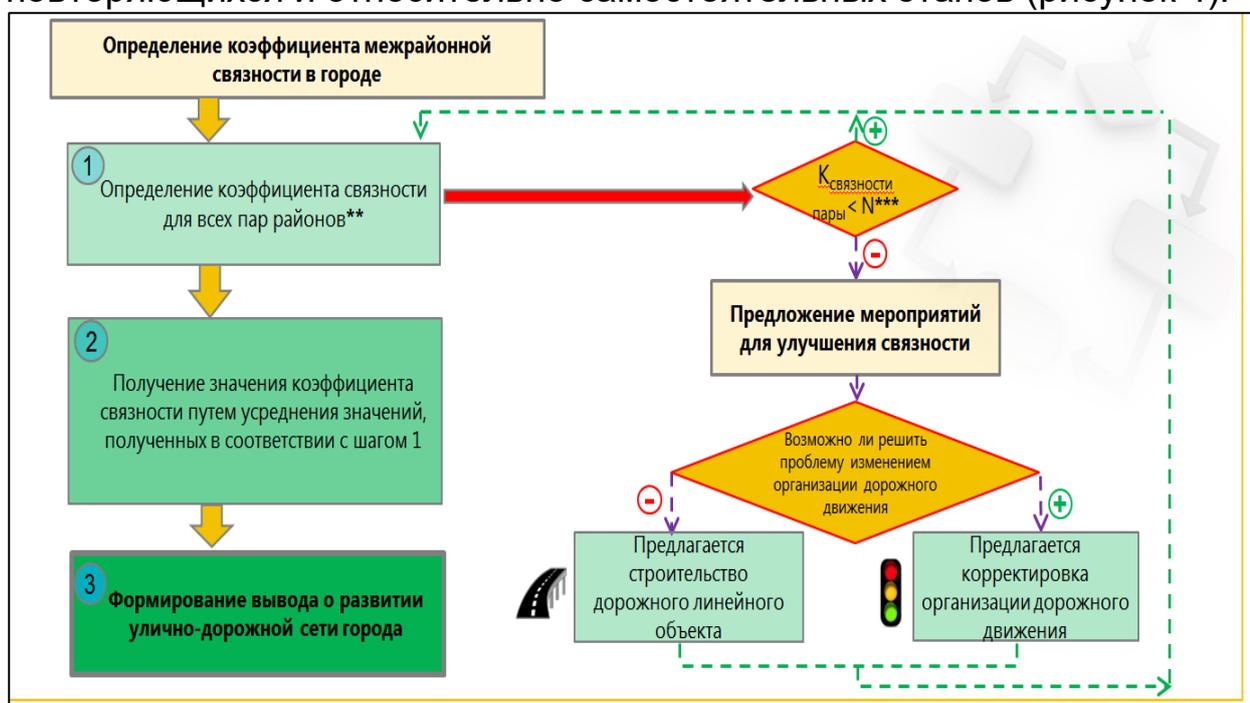


Рисунок 4 – Алгоритм выбора приоритетных мероприятий для повышения показателя межрайонной связности в городе

- Первоначально формируется список рекомендуемых мероприятий по развитию дорожно-транспортной инфраструктуры.

- На основе полученных данных о коэффициентах связности пар районов делается вывод о необходимости осуществления мероприятий для повышения связности между ними. Вывод о целесообразности мероприятий делается поэтапно с ранжированием по критерию связности. Мероприятия группируются в соответствии со значением связности, которое устанавливается от большего к меньшему (то есть поэтапно определяются группы мероприятий для коэффициентов связности 5,4,3 и далее). Данный подход позволяет выделить наиболее проблемные места;

- Определяется необходимость строительства нового участка улично-дорожной сети, либо корректировки организации дорожного движения. Данный вывод формируется в соответствии с анализом объектов, разделяющих районы;

- Сформированный список мероприятий ранжируется в соответствии с методическими указаниями по оценке социально-экономической эффективности инвестиционных проектов в области развития транспортной инфраструктуры /7,8,9/. Данная процедура позволит учесть наиболее значимые корреспонденции, осуществляемые как между районами, так и транзит через них. Наибольший приоритет имеют мероприятия с высокими значениями инвестиционных показателей.

Заключительным этапом работы по определению необходимых мероприятий для её повышения является подготовка заключения, содержащего значение коэффициента межрайонной связности города, а также списка мероприятий, ранжированных и скорректированных в соответствии с приносимым социально-экономическим эффектом, а также нормативными документами, регламентирующими правила застройки городских территорий.

**В четвертой главе** приведены результаты расчетов межрайонной связности для городов Москва и Тула городе и решения по повышению связности с использованием коэффициента межрайонной связности.

**Расчет коэффициентов несвязности для всех пар транспортных районов и вычисление среднего значения показывает, что коэффициент несвязности для УДС города Москвы равен 1,5.** По существующим критериям связность улично-дорожной сети следует оценивать как исключительно неблагоприятную. В пределах МКАД имеется 96 пар районов, для которых коэффициент связности  $\geq 5$ .

В соответствии с изложенной методикой и с использованием доработанной транспортной модели проведено технико-экономическое обоснование возможных мероприятий по увеличению связности.

В таблице 3 приведены приоритетные мероприятия, предлагаемые к включению в адресно-инвестиционную программу города Москвы.

Таблица 3 - Мероприятия, предлагаемые к сохранению и включению в АИП города Москвы

№	Наименование объекта	Снижение перепробега	ИД**	ЧДД**	Сроки окончания ПИР/ СМР	Стоимость ПИР+СМР, млн.руб.
1	Организация эстакады Варшавское шоссе – Кантемировская улица (в рамках строительства Южной рокады)	в 6,2 раз	4,6	23 339	2015/2018	6736
2	Строительство эстакады на Аминьевском шоссе (в рамках строительства Северо-Западной Хорды)	в 3,5 раз	3,4	2 446	2014/2016	4378
3	Дорога: 2-ой Вязовский проезд – ул. Окская	в 17,5 раз	26,9	4 023	2016/2018	163
4	Проезд Шокальского	в 8,5 раз	10,7	584	2016/2018	655
5	Дорога-переезд: ул. Пруд Ключики – 1-ая Фрезерная ул.	в 8,9 раз	7,2	6 214	2017/2018	1050
6	Дорога: ул. Донецкая – ул. Шоссейная	в 7,3 раз	18,0	5 886	2016/2018	600
7	Путепровод (ж/д): ул. 800-летия Москвы – ул. Инженерная	в 40,6 раз	4,9	9 740	2017/2018	2625
8	Дорога: ул. Авиаторов – ул. Родниковая	в 8,3 раз	4,2	969	2016/2018	1500
9	Путепровод (ж/д): проект. пр. 2236 - ул. Хачатуряна	в 9,2 раз	4,1	6 672	2017 (ПИР)	100 (ПИР)
10	Путепровод (ж/д): ул. Менжинского – ул. Дудинка	в 27,3 раз	4,2	3 573	2017 (ПИР)	100 (ПИР)
11	Путепровод (ж/д): ул. Элеваторная - ул. Подольских Курсантов	В 17 раз	7,1	13360		2200

Некоторые мероприятия по дорожно -мостовому строительству, несмотря на их высокую стоимость, имеют исключительно высокие показатели экономической эффективности. Например, строительства дороги от 2-го Вязовского проезда к ул. Окская в городе Москве имеет индекс доходности, равный 26,9 (рисунок 5).

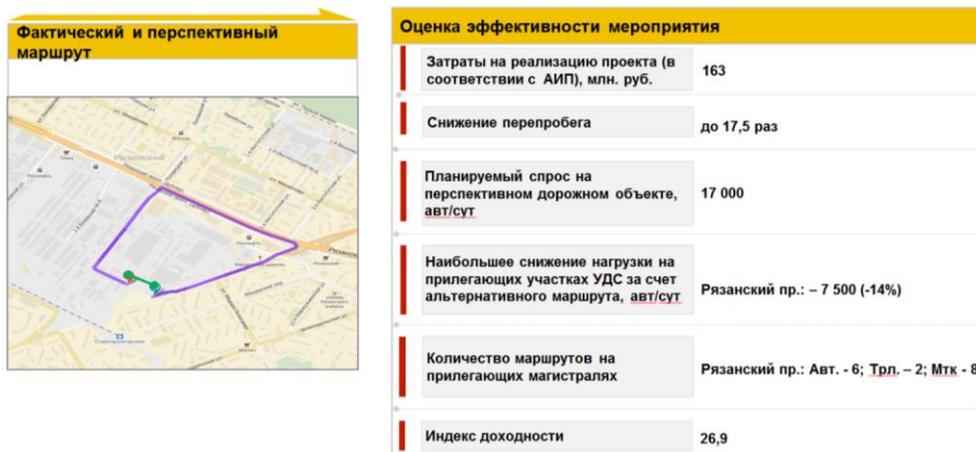


Рисунок 5 - строительство дороги от 2-го Вязовского проезда к ул. Окская

Во многих случаях оказывается, что связность УДС может быть существенно улучшена без проведения таких дорогостоящих мероприятий, как строительство мостов. На рисунке 6 представлен пример обустройства проезда от ул. Донецкой к ул. Шоссейной в городе Москве. Расчет элемента матрицы корреспонденций по методике, изложенной в разделе 2.3, показал, что спрос составляет 15000 авт/сут. Обустройство проезда длиной менее 1 км по относительно свободной территории приведет к снижению перепробега – в 7 раз.



Рисунок 6 - Обустройство проезда от ул. Донецкой к ул. Шоссейной в городе Москве.

На рисунке 7 приведен пример расчета изменения коэффициента связности и перепробега при изменении организации дорожного движения в городе Тула. В настоящее время отсутствует проезд с проспекта Ленина на ул. Академика Павлова. Предлагается соединить данные улицы с организацией одностороннего движения в сторону ул.



в количественном виде оценивать такие транспортные характеристики, как суммарный перепробег транспортных средств, потери времени при поездках, увеличение экологического загрязнения, рост аварийности и др.

5. Для расчета коэффициента несвязности предложены алгоритмы транспортного районирования, основанные на функциональных характеристиках территории города, а также с применением маршрутной сети всех видов общественного транспорта.

6. Разработаны требования к транспортной модели, предназначенной для расчета коэффициента несвязности, включающей алгоритм формирования матрицы корреспонденций и подготовку исходных данных. Обоснована возможность применения существующих методов оценки матриц корреспонденции с использованием транспортной модели на основе данных от детекторов транспорта в составе Интеллектуальной транспортной системы (или АСУ ДД).

7. Выработана и сформулирована общая методология построения и использования транспортной модели, предназначенной для оценки эффективности комплекса мероприятий по увеличению связности УДС. Сформулирован перечень требований к доработке программного обеспечения и реализованы на базе аппаратно-программного комплекса PTV Vision® VISUM.

8. В форматах, пригодных для программного обеспечения PTV Vision® VISUM, проведена подготовка информационного обеспечения транспортной модели города Москвы, которое включает сведения о более чем 2000 светофорных объектов и видеокамер телеобзора, около 7000 остановок общественного транспорта и детекторов мониторинга условий дорожного движения, 80 тыс. зданий и сооружений, более 45 тыс. торговых объектов, 190 тыс. узлов (развязок и перекрестков), 1,2 млн поворотов по направлениям и т.д.

9. Разработан методический инструментарий для оценки влияния коэффициента связности на эффективность работы транспортного комплекса. Выработан алгоритм выбора приоритетных мероприятий для повышения показателя межрайонной связности в городе, включающий изменения в организации дорожного движения, а также строительство участков улично-дорожной сети.

10. Выполненные расчеты подтверждают, что разработанные методики и состав транспортной модели позволяют определить уровни межрайонной связности между любыми парами транспортных районов города и для города в целом с представлением результата в виде количественного показателя. Предусмотренные в составе транспортной модели исходные данные с описанием структуры улично-дорожной сети позволяют выработать состав возможных мероприятий по повышению связности с учетом имеющихся особенностей УДС.

11. Представленный подход является комплексным решением, позволяющим оценивать межрайонную связность в городе, определять

наиболее проблемные с точки зрения связности места, обеспечивать формирование и приоритизацию перечня мероприятий по развитию дорожно-транспортной инфраструктуры.

12. На основе предложенных методов оценки связности УДС выполнены расчеты по оценке ожидаемой эффективности предлагаемых мероприятий, которые применены при разработке и реализации Государственной программы города Москвы «Развитие транспортной системы на 2012-2016 гг.», а также при создании и эксплуатации ИТС города Москвы.

13. Дальнейшее развитие работ в этом направлении предполагает введение предложенного коэффициента несвязности в нормативно-методические и распорядительные документы, а также применения более широкого класса транспортных моделей, в которых учитываются нелинейные и синергетические особенности транспортных систем, стохастический характер и нечеткая логика исходных данных, динамическое изменение целей и условий функционирования транспортного комплекса.

### **III. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Публикации в рецензируемых научных журналах из «Перечня ...» ВАК:**

1. Поляков, А.С., Качественные и количественные характеристики транспортного обслуживания городов. - Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – № 3. – С. 8–11.

2. Поляков, А.С., Способы увеличения связности улично- дорожной сети с использованием транспортной модели. / А.С. Поляков, В.П. Мартынов /- Наука и техника в дорожной отрасли. – 2016. – № 1. – С. 6–9.

3. Поляков, А.С., Повышение эффективности функционирования транспортного комплекса города. /А.С. Поляков, С.В. Жанказиев /- Наука и техника в дорожной отрасли. – 2016. – № 4. С.3-6

4. Поляков, А.С., Транспортная модель как инструмент оценки связности улично-дорожной сети и выработки решений по ее увеличению. - Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 2. – С.–.

#### **Научные статьи, опубликованные в других изданиях**

Поляков, А.С.,. Пропускную способность можно увеличить / А.С. Поляков, В.П. Мартынов /- Автомобильные дороги. – 2017. – № 2. – С. 80–83.

Поляков, А.С.,. Инженер транспортного планирования.  
<http://www.the-village.ru/village/business/newprof/147179-inzhener-traffika>