

## РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЕКТОВ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО СПРОСА

**Т.И. Хитрова, А.П. Коротенко**

*Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация*

### Информация о статье

Дата поступления  
19 января 2021 г.

Дата принятия к печати  
2 марта 2021 г.

Дата онлайн-размещения  
31 марта 2021 г.

### Ключевые слова

Информационно-аналитические системы транспортного планирования; транспортная инфраструктура; инвестиционные проекты; математическое моделирование; модель выбора транспортной системы; пакеты прикладных программ

### Аннотация

Развитие транспортной инфраструктуры является одним из факторов, обуславливающих состояние экономики Сибирского федерального округа и ее стратегическую перспективу. Значимость вклада Иркутской области в валовой региональный продукт и специфика его структуры определяют необходимость совершенствования организации транспортных потоков путем реализации комплексных инвестиционных проектов на основе совместного — федерального и регионального — финансирования. Представленная модель развития транспортной системы Иркутской области базируется на общем алгоритме работы четырехшаговой транспортной модели. В статье описаны основные этапы реализации алгоритма и их результаты. Рассматривается целесообразность использования таких инструментов разработки транспортной модели, как программные продукты PTV Vision® VISUM и TransNet. По результатам моделирования в качестве конкретного сценария развития транспортной инфраструктуры изучена возможность изменения графа дорожной сети при сохранении модели поведения пользователей транспортных услуг — совместная реализация проектов строительства западного и южного обходов г. Иркутска.

## DEVELOPMENT OF TRANSPORT PROJECTS IN THE IRKUTSK REGION BASED ON TRANSPORT DEMAND MODELS

**Tatyana I. Khitrova, Andrey P. Korotenko**

*Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation*

### Article info

Received  
January 19, 2021

Accepted  
March 2, 2021

Available online  
March 31, 2021

### Keywords

Information and analytical systems of transport planning; transport infrastructure; investment projects; mathematical modeling; transport system selection model; application packages

### Abstract

The development of transport infrastructure is one of the factors determining the state of the economy of the Siberian Federal District and its strategic prospects. The importance of the contribution of the Irkutsk region to the gross regional product and the specifics of its structure determine the need to improve the organization of transport flows through the implementation of complex investment projects based on joint federal and regional funding. The presented development of the model for the development of the transport system of the Irkutsk region is based on the general algorithm of the four-step transport model. The article describes the main stages of the algorithm implementation and their results. The expediency of using the software products PTV Vision® VISUM and TransNet as a tool for developing a transport model is considered. Based on the simulation results, as a specific scenario for the development of transport infrastructure, the possibility of changing the graph of the road network while maintaining the model of behavior of users of transport services was considered, namely the joint implementation of projects for the construction of the western and southern bypasses of the city of Irkutsk.

Реализация стратегии экономического развития России в последние десять лет осуществляется в условиях глобализации, повышения мобильности населения и, как

следствие, значительного роста автомобилизации, что привело к обострению комплекса транспортных проблем. Качество и эффективность транспортных связей в значительной

мере определяют экономическое развитие как страны в целом, так и отдельных регионов. Проблемы развития транспортной инфраструктуры проявляются в ухудшении значений экологических показателей, снижении интенсивности транспортных коммуникаций, росте заторов и аварийности. Корректировка значений ключевых характеристик обеспечит реализацию имеющегося у регионов потенциала экономического роста.

Процесс принятия проектных решений относительно развития транспортной инфраструктуры носит стратегический характер. Улучшение организации транспортных потоков в условиях экономического роста может быть достигнуто путем реструктуризации существующих транспортных связей, оптимизации маршрутных сетей общественного пассажирского транспорта и реализации соответствующих мер градостроительного характера. Актуальной задачей является оценка эффективности комплекса транспортных инвестиционных проектов на основе использования отечественных и зарубежных методик и изучения опыта их применения.

Реализация инвестиционных проектов развития транспортного комплекса требует существенных финансовых вложений и отличается значительной протяженностью во времени. С учетом наличия для большинства регионов России объективных ограничений по объемам возможных инвестиций и по времени, отведенному на реализацию проектов, необходимо обеспечить обоснованное принятие решений, что возможно при выполнении ряда основополагающих условий. Отбор приоритетных проектов должен осуществляться по множеству наиболее значимых критериев, прежде всего по наличию ресурсов и влиянию на транспортную ситуацию и все сферы социально-экономического развития. Каждый проект должен подвергаться анализу с точки зрения его взаимосвязи с реализуемыми проектами и программами развития региона, рассматриваемыми во времени [1, с. 61].

Задача усложняется противоречивостью основных критериев управления транспортными потоками: максимальная бесперебойность и интенсивность движения при требуемом снижении экологического ущерба, что накладывает ряд ограничений на скорость и направления движения [2–4].

Непредсказуемость и непостоянство транспортных потоков усложняют анализ и прогнозирование изменений в их распределении. Решения принимаются в условиях риска и неопределенности, что требует применения

соответствующих методов, специального математического аппарата, информационного и программного обеспечения, компьютерных технологий [5; 6], благодаря чему обеспечивается достаточная точность построения транспортных моделей, варибельность решений и их принятие в приемлемые сроки, возможность рассмотрения различных сценариев развития транспортной инфраструктуры.

Существование хорошо развитой теории моделирования транспортных потоков, базирующейся на достижениях различных областей знания — физики, математики, экономики, организации дорожного движения, позволяет построить формальный алгоритм расчетов для оценки целесообразности реализации конкретного сценария развития транспортной инфраструктуры [7; 8]. Может быть оценена общественно значимая эффективность — стоимостная оценка влияния проекта на количественно измеряемые характеристики транспортной инфраструктуры: сокращение времени нахождения в пути населения и грузов, снижение экологической нагрузки, повышение безопасности дорожного движения. Целевые значения этих показателей должны рассматриваться как критерии оценки транспортного инвестиционного проекта. Проблема заключается в том, что методики, используемые при оценке экономической эффективности инвестиционных проектов, либо вообще не учитывают специфику транспортных проектов, либо оценивают только отдельные составляющие транспортного комплекса<sup>1</sup>. В связи с этим возникает проблема совершенствования моделей и создания специальных инструментальных средств, позволяющих повысить качество оценки и обоснования транспортных инвестиционных проектов. Основой разработки служат зарубежные и российские стандарты и нормативы, современные методики оценки инвестиционных проектов и специальные программные продукты, предназначенные для математического моделирования транспортных потоков. Необходимым дополнением к методикам и технологиям должна стать обеспечивающая достоверность расчетов система формирования потоков исходных данных и обоснованные методики отбора альтернатив, при реализации которых для реструктуризации транспортной инфраструктуры используются информационно-

<sup>1</sup> Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов : утв. М-вом экономики РФ, М-вом финансов РФ, Гос. ком. РФ по строит., архитектур. и жилищ. политике 21 июня 1999 г. № ВК477 // СПС «КонсультантПлюс».

аналитические системы транспортного планирования и моделирования. Пакет прикладных программ PTV Vision® VISUM, в основе которого лежит мощная математическая база теории транспортного моделирования, представляет собой одно из наиболее комплексных решений [9].

В составе Сибирского федерального округа Иркутская область занимает одну из лидирующих позиций по значению валового регионального продукта и продолжит сохранять ее по ряду показателей развития экономики. Представленные в 2020 г. данные Иркутскстата о валовом региональном продукте за 2018 г. и актуализированные расчеты за 2015–2017 гг. (табл.) свидетельствуют об устойчивом росте показателей, характеризующих экономическое развитие Иркутской области.

Основной вклад в формирование валового регионального продукта Иркутской области вносят предприятия по добыче полезных ископаемых (доля в структуре ВРП составила 31,6 %), обрабатывающие производства (10,9 %), предприятия, занимающиеся транспортировкой и хранением (9,8 %), оптовой и розничной торговлей, ремонтом автотранспортных средств и мотоциклов (8,3 %), строительством (6,0 %).

Наблюдаемая динамика ВРП свидетельствует об экономическом росте региона. По размеру вклада в экономику Российской Федерации в 2018 г. субъект находится на 2-м месте среди регионов СФО и на 15-м — по Российской Федерации (рис. 1).

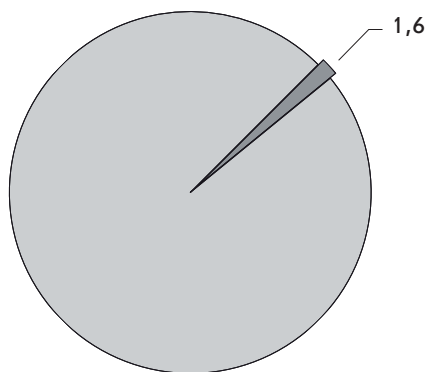


Рис. 1. Вклад Иркутской области в экономику Российской Федерации в 2018 г., %

Это, с точки зрения федеральных органов власти, делает целесообразным создание условий для дальнейшего развития территории [10].

Вклад Иркутской области в экономику Сибирского федерального округа в 2018 г. составил 16,7 % (рис. 2), что определяет целевые установки развития субъекта.

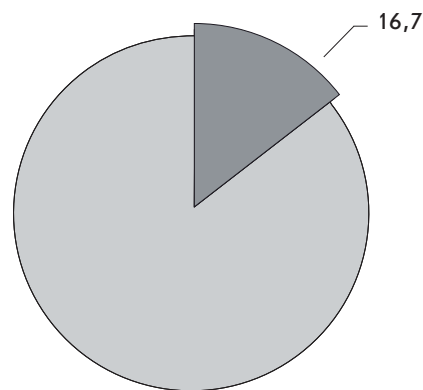


Рис. 2. Вклад Иркутской области в экономику Сибирского федерального округа в 2018 г., %

Предполагается, что ВРП в сопоставимых ценах будет расти поступательными темпами в пределах 1,5–3,3 % при условии успешной реализации крупномасштабных инвестиционных проектов. Объем инвестиций в основной капитал на период до 2030 г. определен с учетом имеющихся планов по реализации проектов создания новых промышленных производств на территории региона, в связи с этим годовые темпы роста в среднем составят около 8,6 % в сопоставимых ценах.

Анализ структуры ВРП Иркутской области показывает, что наиболее значимой его составляющей является добыча полезных ископаемых — 31,6 %, что требует решения проблемы организации транспортировки груза с минимальными затратами, обеспечивающими прирост этой составляющей по сравнению с текущим уровнем 9,8 %.

Проекты модернизации транспортной инфраструктуры территории на прогнозируемый период должны разрабатываться с учетом прогноза развития ее социально-экономической составляющей. Применительно к территории Сибирского федерального округа в приоритетном порядке должны ре-

#### Производство валового регионального продукта Иркутской области

Показатель	2010	2015	2016	2017	2018
Валовой региональный продукт, млрд р.	546,1	1 001,7	1 066,4	1 194,7	1 392,2
Индекс физического объема ВРП, % к предыдущему году	106,8	100,4	102,8	102,9	102,5
ВРП на душу населения, тыс. р.	224,4	415,0	442,3	496,4	580,2

шаться задачи формирования новых транспортных коридоров и повышения пропускной способности существующих, создания современных транспортно-логистических комплексов с учетом обеспечения комплексного освоения природных ресурсов и развития промышленных производств [11]. Решение задачи эффективного транспортного обеспечения Иркутской области предусматривает мероприятия, направленные как на сохранение и модернизацию существующей, так и на создание новой инфраструктуры автомобильного транспорта.

В структуре инвестиций в основной капитал на период до 2030 г. «транспортная» составляющая должна обеспечиваться проектами, финансируемыми за счет федерального и регионального бюджетов, объемы которых должны оцениваться с учетом целей развития. Основным информационным потоком, определяющим размер и структуру инвестиций, являются результаты моделирования транспортного спроса на основе стандартной модели. Использование стандартной модели расчета транспортного спроса обусловлено тем, что она достаточно точно описывает этапы формирования спроса на услуги транспорта исходя из агрегированных данных без потери качества результатов моделирования, что сокращает время расчета и позволяет сформировать оценку большего числа сценариев.

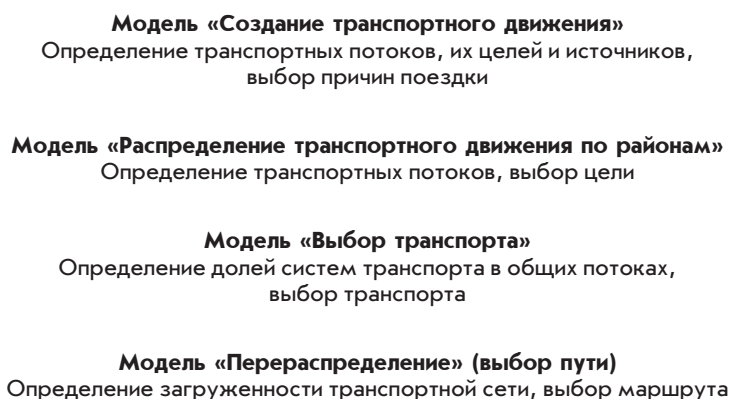
Систему моделей спроса на транспорт можно рассматривать как инструмент, качественно и количественно описывающий перемещения в связи с целями возникновения транспортного потока и его выбором (модель создания транспортного потока), выбором цели транспортного потока (модель распределения транспортного потока), выбором транспортного средства (модель разделения транспортного потока) и вы-

бором пути (модель перераспределения транспортного потока). Реализация модели выбора транспортной системы включает четыре этапа (рис. 3).

Результаты анализа транспортного предложения и транспортного спроса позволили определить их зависимости, выявить их непропорциональности и сформировать решения, обеспечивающие их минимизацию: модернизировать работу общественного транспорта, изменить конфигурацию транспортных потоков. Качество итоговой транспортной модели и модели транспортного спроса напрямую зависит от детализации структуры спроса — количества слоев спроса. Расчет проводится по отдельным слоям. В транспортной модели слои спроса определяются генераторами и потребителями транспортных корреспонденций [12].

Генерация передвижений (trip generation) — объемов прибытия и отправления (ПО) в каждом транспортном районе — позволила оценить относительные емкости районов по прибытию и отправлению с разными целями. Исходя из общего количества и подвижности населения определено общее количество передвижений, совершаемых с той или иной целью. Благодаря распределению общего объема ПО между районами пропорционально их относительным емкостям получены оценки абсолютных объемов прибытия и отправления.

Процесс создания модели привлечения и генерации транспортного спроса заключается в процедуре прогнозирования общего количества перемещений, совершаемых из или в каждый транспортный район сети в разрезе целей совершаемых перемещений. На этапе создания модели (генерации) транспортного движения рассчитывались объемы движения из источника и объемы движения в цель для всех транспортных районов, детализирован-



**Рис. 3. Модель выбора транспортной системы**

ные по слоям спроса. В модели генерации транспортного спроса Иркутской области в качестве слоев спроса рассматривались дом, работа и учебные корреспонденции, развлечения, объекты здравоохранения. Результатом работы вычислительного алгоритма модели являются расчетные (модельные) значения интенсивности движения, представляемые строками и столбцами матриц корреспонденций.

Значительно различающийся уровень автомобилизации в муниципальных районах Иркутской области учитывался при расчете транспортного спроса введением в формулу показателя среднего по области уровня автомобилизации, с которым сравнивается уровень автомобилизации каждого из рассматриваемых транспортных районов. В районах пониженной автомобилизации коэффициент использования личного транспорта ниже, и наоборот в районах повышенной автомобилизации. Для учета этой зависимости в формулу дополнительно введен коэффициент эластичности использования автомобиля  $K_{a_{cr}}$ .

Расчет привлечения (ГП) и генерации (СП) транспортного спроса выполняется в соответствии с выражениями

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ГП}_i = \sum_k f_{ik} \cdot \text{СЭ}_{ik}, \\ \text{СП}_i = \sum_k f_{ik} \cdot \text{СЭ}_{ik} \cdot \left( 1 + K_3 \cdot \left( \frac{K_{a_i} - K_{a_{cr}}}{K_{a_{cr}}} \right) \right), \\ \text{ГП}_i = \text{СП}_i, \end{array} \right.$$

где  $\text{СЭ}_{ik}$  — значение  $k$ -го социально-экономического атрибута  $i$ -го источника;  $i$  — номер источника генерации/цель привлечения;  $k$  — номер социально-экономического атрибута;  $f_{ik}$  — коэффициент генерации/привлечения корреспонденций для  $k$ -го социально-экономического атрибута  $i$ -го источника;  $K_3$  — коэффициент эластичности, принятый равным 0,5;  $K_{a_i}$  — уровень автомобилизации  $i$ -го источника генерации транспортного спроса;  $K_{a_{cr}}$  — уровень автомобилизации.

По результатам предыдущих наблюдений для Иркутской области  $K_{a_{cr}}$  принимается равным 260 автомобилям на тысячу жителей.

Социально-экономическими атрибутами  $\text{СЭ}_{ik}$ , учитываемыми в модели Иркутской области, являются численность постоянного населения, численность населения в трудоспособном возрасте, численность потенциальных студентов, количество рабочих мест на предприятиях непромышленной сферы, количество рабочих мест на предприятиях промышленной сферы, количество учебных мест в

средних специальных учебных заведениях, количество учебных мест в высших учебных заведениях, среднесуточная посещаемость поликлиник, площадь развлекательных учреждений, учреждений культуры и спорта.

В качестве факторов генерации/привлечения транспортного спроса ( $f_{ik}$ ) используются коэффициенты влияния каждого из социально-экономических атрибутов на степень генерации/привлечения поездок. Факторы генерации/привлечения установлены для каждого из типов транспортных районов, транспортных режимов и целей поездок.

По результатам процесса привлечения и генерации транспортного спроса генерируются векторы привлечения и генерации транспортного спроса по целям совершаемых перемещений, агрегированные по всем видам транспорта — индивидуальному, грузовому, общественному.

Модель распределения (trip distribution) транспортного движения обеспечивает расчет объемов потока между всеми транспортными районами, детализированных по слоям спроса, но без детализации по видам транспорта.

Процесс распределения транспортного потока на основании матрицы затрат на перемещение между транспортными районами преобразует полученные на первом этапе моделирования векторы привлечения и генерации транспортного спроса по целям совершаемых перемещений каждого из районов в матрицы спроса и предложения пользователей. Результатами расчета являются элементы матриц корреспонденций.

В качестве метода расчета принята гравитационная модель спроса с экспонентной функцией сдерживания, позволяющая прогнозировать транспортные корреспонденции с учетом возможных будущих значительных изменений транспортной сети. Суть гравитационной модели заключается в установлении отношения прямой зависимости количества совершаемых поездок от объема притяжения объекта, которое обратно пропорционально длине пути до этого объекта. Модель основана на предположении: корреспонденция из одного района в другой будет тем больше, чем больше емкости районов прибытия и отправления и чем ближе друг к другу расположены эти районы.

В общем виде гравитационная модель может быть сформулирована как  $F_{ij} = \langle \alpha_i O_i \beta_j P_j f(c_{ij}) \rangle$ .

Вычисления, проводимые в процессе распределения транспортного потока на основании гравитационной модели, сводятся

к определению множителей  $\alpha_i$  и  $\beta_j$ , удовлетворяющих системе

$$\begin{cases} O_i = \sum_j F_{ij}, \\ P_j = \sum_i F_{ij}, \\ F_{ij} = \alpha_i \cdot O_i \cdot \beta_j \cdot P_j \cdot f(c_{ij}), \end{cases}$$

где  $i$  — номер пункта отправления,  $i = 1n$ ;  $j$  — номер пункта прибытия,  $j = 1m$ ;  $O_i$  — объем поездок из пунктов отправления;  $P_j$  — объем поездок в пункты прибытия;  $F_{ij}$  — корреспонденция из района  $i$  в район  $j$ ;  $c_{ij}$  — стоимость перемещения из  $i$ -го в  $j$ -й район;  $f(c_{ij})$  — функция сдерживания, отражающая стоимость поездки,  $f(c_{ij}) = \exp(-\lambda c_{ij})$ .

Передвижения, совершаемые с разными целями, по-разному чувствительны к фактору стоимости. Для передвижений, совершаемых с разными целями, корреспонденции рассчитывались отдельно с применением более крутых или более пологих функций сдерживания. В случае экспоненциальной функции тяготения крутизна определяется параметром  $\lambda$ . Результатом этого этапа явились матрицы распределения транспортных потоков по районам.

На этапе выбора режима — выбора транспорта (mode choice) матрицы корреспонденций по слоям спроса, разделены по режимам движения — рассчитаны матрицы корреспонденций, каждая из которых соответствует поездкам с использованием определенного вида транспорта. Матрица спроса пользователей преобразована в матрицу типов транспортных средств (способов передвижения) на основании функции модального расщепления (modal split) общего количества передвижений и дискретности выбора режима. Функция модального расщепления позволила определить полезность перемещений для каждого из типов транспортных средств между транспортными районами отправления и прибытия на основании матрицы затрат. Расщепление определяется соотношением обобщенных цен передвижений, совершаемых разными способами. Вероятность совершения перемещения на выбранном типе транспортного средства в зависимости от значения полезности такого перемещения оценивалась функцией дискретности выбора режима. Расчет перераспределения, дифференцированный по видам транспорта, позволил получить модельные значения интенсивности транспортных потоков.

В обоснование инвестиционных транспортных проектов на основе моделей

транспортного спроса необходимо провести перераспределение полученных матриц корреспонденций по транспортному предложению для выбора того или иного пути. Процесс перераспределения транспорта (trip assignment) заключался в назначении транспортной сети потоков транспорта на основании детерминированного алгоритма. При этом были определены объемы транспортных поездок в целом, а не отдельных транспортных средств. Задачей процесса перераспределения транспорта является нахождение взаимозависимости между загрузкой транспортного коридора и принятием решения о перемещении по этому коридору, т.е. нахождение равновесного состояния транспортной системы между уровнями транспортного обслуживания и интенсивностью движения.

Уровень транспортного обслуживания в расчетах представлен временем, затрачиваемым на перемещение (включая время ожидания, время на подход к остановке — для пассажиров транспорта общего пользования), поскольку эмпирические исследования показали, что именно время является основным сдерживающим фактором при выборе пути следования и находится в прямой зависимости от интенсивности использования транспортного коридора (его загрузки). Для решения поставленной транспортной задачи используется функция сопротивления — CR-функция (capacity restraint function), описывающая эту зависимость [13]. Процесс перераспределения транспорта является мультимодальным, т.е. реализует генерацию всех транспортных модальностей — классов пользователей, в связи с чем имеет многоступенчатую структуру расчета.

Расчет процесса перераспределения транспорта произведен по принципу пользовательского равновесия Уордроп, описывающего поведенческие постулаты минимизации общих затрат. Построенные модели равновесия транспортного потока обеспечивают прогнозирование транспортного потока и времени, затрачиваемого на перемещения, в результате принятия пользователями транспорта решений о выборе маршрута следования. Перемещения пользователей, удовлетворяющие этому принципу, оптимизированы, поскольку каждый пользователь выбирает маршрут следования, на который он затрачивает меньше всего ресурсов (времени). Время в пути по всем используемым маршрутам не превышает время в пути по фактически не используемым маршрутам. Неиспользуемые маршруты будут акту-

альны для пользователей, как только время передвижения по ним станет меньше, чем время, затрачиваемое при перемещениях по существующим маршрутам.

В качестве метода расчета использован алгоритм адаптации линейной аппроксимации Франка — Вульфа [14]. Алгоритм адаптации линейной аппроксимации для решения задачи о пользовательском равновесии заключается в последовательном итеративном вычислении кратчайших путей следования с последующей минимизацией выпуклой функции. Критерием остановки итеративного процесса является относительный разрыв ( $R_{GAP}$ ), показывающий, как близко система подошла к состоянию равновесия:

$$R_{GAP} = \frac{\sum_{ij} \sum_p h_{ijp} \cdot (s_{ijp} - s_{ij}^*)}{\sum_{ij} d_{ij} \cdot s_{ij}},$$

где  $h_{ijp}$  — объем перемещений из пункта отправления  $i$  в пункт прибытия  $j$  по маршруту  $p$ ;  $s_{ijp}$  — время в пути при движении по маршруту  $p$ ;  $s_{ij}^*$  — минимальное время в пути при движении по всем возможным маршрутам из пункта отправления  $i$  в пункт прибытия  $j$ ;  $d_{ij}$  — объем спроса для отправок  $i$  и прибытий  $j$ .

Процесс калибровки — это эвристический алгоритм решения двухуровневой процедуры настройки приоритетов расчета итоговой матрицы с применением данных, полученных при натурных обследованиях. При выборе маршрутов движения использованы полученные на этапе сбора исходных данных массивы реальных данных по интенсивностям дорожного движения.

На первом шаге итераций выполняется процесс генерации маршрутов движения и распределения матрицы спроса  $OD$  по транспортным участкам сети. На втором реализуется алгоритм градиентного спуска с целью корректировки матрицы  $OD$  на основании назначенных на первом уровне маршрутов движения транспорта. Количество итераций для первого и второго уровней было задано вручную: 20 для первого и 4 для второго уровня.

В результате проведенных расчетов определяется скорректированная начальная и конечная матрицами  $OD$  спрос и сравнительный анализ длин поездок и производится сравнение назначенных расчетным методом транспортных потоков с результатами натурных наблюдений.

Данные учета интенсивности дорожного движения имеют достаточно высокий уровень погрешности, связанный с зависимостью дорожного трафика от многочисленных условий, таких как погода, дорожно-транс-

портные происшествия, временные ограничения. Значительное влияние на качество полученных данных оказывает отсутствие возможности проведения таких замеров одновременно на всех пунктах учета интенсивности движения. Для учета возможных погрешностей в модель расчета включен показатель надежности натурных обследований. Надежность установлена дифференцированно от классов пользователей равной 0,7, 0,8 и 0,9 для индивидуального, грузового и пассажирского транспорта соответственно как весовой коэффициент для определения разницы между результатами замеров и расчетными данными интенсивности. Дополнительно был установлен уровень надежности матрицы  $OD$  и распределения длин поездок, задана матрица максимальных отклонений спроса и регулирующая функция.

Уровень надежности матрицы  $OD$  и распределения длин поездок определяет, насколько значения в скорректированной матрице могут отличаться от начальных расчетных значений. Значения уровня надежности находятся в интервале от 0 — максимальная степень доверия до 1 — минимальная степень доверия. В связи с низким уровнем доверия к данным исходной матрицы  $OD$  и высоким уровнем доверия к данным о распределении длин поездок уровень надежности для этих показателей определен как 0,5 и 0,1 соответственно.

Матрица максимальных отклонений спроса устанавливает ограничение на процент изменения значений, вносимых алгоритмом расчета в исходную матрицу. Максимальное отклонение установлено на уровне 35 %.

Регулирующая функция применена для дифференциации значений погрешности в зависимости от величины значений натурных замеров интенсивности движения. Функция определяет значение дополнительного множителя к показателю надежности натурных обследований.

В связи с ограниченным количеством проведенных натурных замеров интенсивности дорожного движения большая часть отрезков дорожной сети чрезмерно чувствительна к колебаниям моделируемой интенсивности вследствие отсутствия данных для проверки. Для уменьшения степени такого влияния в модели расчета использован метод агрегирования транспортных районов по типам для начальной калибровки с их последующим разделением и сохранением пропорций отправок и прибытий каждого из районов для финальных расчетов. В результате такой последовательности операций в процессе расчетов уменьшено количество

переменных, что помогло предотвратить поиск решений с нереальными значениями. Данный метод может повлиять на ухудшение показателей сходимости между натурными и расчетными значениями интенсивности в каждой конкретной точке, но позволяет более точно моделировать дорожное движение, создавая более устойчивую к изменениям маршрутов движения транспорта и более надежную с точки зрения организации дорожного движения макроскопическую транспортную модель.

Итоговым результатом работы алгоритма являются рассчитанные интенсивности транспортных потоков, имеющие географическую привязку к графу дорожной сети. Результат может быть использован для модификации транспортной модели субъекта.

Реализованная в программном продукте транспортная модель представляет собой комплекс, состоящий из расчетных блоков и блоков, обеспечивающих информационную поддержку. Информационные блоки — интегрированная база данных, предназначенная для хранения и обработки информации, необходимой для прогноза транспортных потоков [15]. Расчетные блоки реализуют алгоритмы решения задач математического программирования, ориентированных на прогноз потребности в передвижениях и расчет реализующих ее транспортных потоков.

Процесс прогнозирования транспортных корреспонденций — процесс изменения социально-экономических параметров и графа дорожной сети при сохранении модели поведения пользователей транспортных услуг с последующим созданием вариантов развития транспортной инфраструктуры.

На основании результатов моделирования произведены расчеты эффективности движения транспортных потоков для разных вариантов изменения социально-экономи-

ческих параметров. По результатам моделирования был сделан вывод о том, что совместная реализация проектов строительства западного и южного обходов города Иркутска позволит более равномерно распределить транспорт по сети автомобильных дорог города, что в пиковые часы снизит загрузку улично-дорожной сети. Сократятся транзитные потоки через город, благодаря чему снизится грузовой трафик и маятниковая миграция. На начальном этапе прогнозируется загрузка проектируемых обходов на уровне 40–60 %, что является показателем высокого уровня экономической эффективности их использования.

Качество моделирования транспортной системы крупного города или городской агломерации, системы дорог федерального или регионального уровня во многом определяется качеством системы сбора, хранения, обработки, анализа, моделирования и визуализации массивов данных, что предполагает использование цифровых технологий. На российском рынке этим требованиям, наряду с известным программным решением PTV Vision® VISUM, в наибольшей степени соответствует современный пакет прикладных программ TransNet, предназначенных для математического моделирования транспортных потоков и прогноза автомобильных и пассажирских потоков в транспортных сетях<sup>2</sup>. Использование этого программного продукта обеспечит возможность обработки больших данных и аналитичность анализа, что повысит качество инвестиционных решений при создании моделей транспортной инфраструктуры.

<sup>2</sup> О включении сведений о программном обеспечении в единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных : приказ Минкомсвязи России от 18 июня 2019 г. № 335 // СПС «КонсультантПлюс».

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров А.В. Моделирование транспортной инфраструктуры промышленных кластеров с использованием информационно-аналитических систем / А.В. Прохоров, И.В. Ильин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Экономические науки. — 2012. — № 3. — С. 61–65.
2. Семенов В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса / В.В. Семенов ; ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. — М., 2004. — 44 с.
3. Швецов В.И. Математическое моделирование транспортных потоков / В.И. Швецов // Автоматика и механика. — 2003. — № 11. — С. 3–46.
4. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к московской агломерации / А.С. Алиев, А.И. Стрельников, В.И. Швецов, Ю.З. Шершевский // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 11. — С. 113–125
5. Хитрова Е.М. Методы финансирования риска и условия их использования / Е.М. Хитрова // Известия Иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права). — 2013. — № 3.
6. Hallikas J. Risk management processes in supplier networks / J. Hallikas [et al.] // International Journal of Production Economics. — 2004. — Vol. 90. — P. 47–58.



7. Власов А.А. Теория транспортных потоков / А.А. Власов. — Пенза : ПГУАС, 2014. — 124 с.
8. An Autonomic Traffic Model Based on Micro Behavior Information Decision / G. Jiao, Ch. Guo, Y. Qin, X. Hu, X. Ou // 2009 IEEE International Conference on Automation and Logistics ( Ical 2009). — IEEE, 2009. — Vol. 1–3. — P. 970–975.
9. Швецов В.Л. Управление транспортной системой на основе компьютерной модели PTV Vision® VISUM / В.Л. Швецов, Е.А. Андреева // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах : сб. докл. 7-й междунар. науч.-практ. конф. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГАСУ, 2006. — 487 с.
10. Бубнов В.А. Проблемы формирования доходов и расходов регионального бюджета на примере Иркутской области / В.А. Бубнов // Известия Иркутской государственной экономической академии. — 2014. — № 2 (94). — С. 13–21.
11. Самаруха А.В. Актуальные направления оздоровления экономики регионов и муниципальных образований Сибири / А.В. Самаруха // Baikal Research Journal. — 2018. — Т. 9, № 3. — С. 7–14.
12. Сакульева Т.Н. Транспортный спрос как функция состояния транспортной сети / Т.Н. Сакульева // Управление. — 2019. — № 3. — С. 47–53.
13. Якимов М.Р. Общий алгоритм работы четырехшаговой транспортной модели / М.Р. Якимов // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2011. — № 1 (48). — С. 132–137.
14. Лобанов В.С. Метод линеаризации для задач условной оптимизации. Алгоритм Франка-Вульфа / В.С. Лобанов // Молодой ученый. — 2020. — № 3 (293). — С. 8–12. — URL: <https://moluch.ru/archive/293/66414>.
15. Хитрова Т.И. Развитие автоматизированных систем управления на основе интеграции информационных и интеллектуальных компонент / Т.И. Хитрова // Baikal Research Journal. — 2013. — № 1.

#### Информация об авторах

*Хитрова Татьяна Исхаковна* — кандидат экономических наук, доцент, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: [khitrova\\_46@mail.ru](mailto:khitrova_46@mail.ru).

*Коротенко Андрей Павлович* — магистрант, кафедра математических методов и цифровых технологий, Байкальский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: [andred117@yandex.com](mailto:andred117@yandex.com).

#### Для цитирования

Хитрова Т.И. Разработка транспортных проектов Иркутской области на основе моделей транспортного спроса / Т.И. Хитрова, А.П. Коротенко. — DOI 10.17150/2500-2759.2021.31(1).34-42 // Известия Байкальского государственного университета. — 2021. — Т. 31, № 1. — С. 34–42.

#### Authors

*Tatyana I. Khitrova* — Ph.D. in Economics, Associate Professor, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: [khitrova\\_46@mail.ru](mailto:khitrova_46@mail.ru).

*Andrey P. Korotenko* — Master's Student, Department of Mathematical Methods and Digital Technologies, Baikal State University, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: [andred117@yandex.com](mailto:andred117@yandex.com).

#### For Citation

Khitrava T.I., Korotenko A.P. Development of Transport Projects in the Irkutsk Region Based on Transport Demand Models. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2021, vol. 31, no. 1, pp. 34–42. DOI: 10.17150/2500-2759.2021.31(1).34-42. (In Russian).