



Сравнение методик прогнозирования междугородних пассажиропотоков на различных видах транспорта



Никита МАКУЦКИЙ



Максим ФАДЕЕВ



Павел ЧИСТЯКОВ

Макуцкий Никита Александрович – ООО «Центр Экономики Инфраструктуры», Москва, Россия.
Фадеев Максим Сергеевич – ООО «Центр Экономики Инфраструктуры», Москва, Россия.
Чистяков Павел Александрович – ООО «Центр Экономики Инфраструктуры», Москва, Россия*.

Статья посвящена методическим особенностям прогнозирования междугородних пассажиропотоков в условиях трансформации транспортной системы России, а именно, появления нового вида транспорта – скоростного железнодорожного сообщения. Цель статьи – изложить авторскую методику прогнозирования пассажиропотоков и доказать её более высокую эффективность относительно методик, применяемых в России сегодня. В статье рассмотрен исторический аспект прогнозирования пассажиропотоков, проанализированы сильные и слабые стороны существующих подходов к их моделированию. Авторы отмечают невозможность моделирования количества поездок при изменении параметров транспортного сообщения только на основании закономерностей, выявленных по ретроспективным рядам данных (наиболее распространённый подход к прогнозированию пассажиропотоков в России).

В статье предлагается альтернативная методика, основанная на расчёте совокупных затрат пассажира при совершении поездки, которые зависят от стоимости проезда, потеря времени, частоты отправления транспортных

средств и их комфортности, а также учитывающая динамику ключевых социально-экономических показателей. Методика позволяет минимизировать погрешности измерений, возникающие из-за недостатка первичной информации о некоторых видах пассажирского транспорта, а также рассчитать индуцированный спрос на поездки, возникающий вследствие улучшения характеристик сообщения. Авторами определены и выражены в количественных показателях основные факторы перераспределения пассажиропотока на нововведённые виды транспорта.

В статье рассмотрен опыт прогнозирования пассажиропотока по предлагаемой методике на примере четырёх корреспонденций, где было начато движение скоростных поездов типа «Ласточка». Результаты прогнозирования сопоставлены с фактическими объёмами перевозок, на основании чего сделаны выводы об эффективности методики прогнозирования и её применимости в современных реалиях российской транспортной системы. Выявлены преимущества и недостатки предложенного подхода к прогнозированию пассажиропотоков, а также определены возможности его распространения и дальнейшего развития в России.

Ключевые слова: транспорт, методы прогнозирования, пассажиропоток, транспортный спрос, транспортная подвижность населения, скоростной поезд.

*Информация об авторах:

Макуцкий Никита Александрович – ведущий эксперт ООО «Центр Экономики Инфраструктуры», Москва, Россия, namakutskiy@infraeconomy.com.

Фадеев Максим Сергеевич – директор по экспертной работе ООО «Центр Экономики Инфраструктуры», Москва, Россия, msfadeev@infraeconomy.com.

Чистяков Павел Александрович – вице-президент ООО «Центр Экономики Инфраструктуры», Москва, Россия, pachistyakov@infraeconomy.com.

Статья поступила в редакцию 14.01.2020, принята к публикации 03.03.2020.

For the English text of the article please see p. 84.

ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЗАДАЧИ

Современные подходы к прогнозированию междугородних пассажиропотоков основываются преимущественно на математических моделях с многофакторными регрессионными зависимостями.

Математические модели прогнозирования пассажиропотоков в большинстве своём основываются на классической четырёхступенчатой модели [1]. Данный подход, впервые использованный в 1950-х годах, позволяет получить картину распределения пассажиропотока по сети на основании вводных предпосылок генерации спроса на поездки и параметров транспортной системы. Моделирование осуществляется в четыре этапа:

- 1) определение точек генерации и притяжения поездок и их потенциала;
- 2) распределение поездок по сети;
- 3) выбор вида транспорта;
- 4) составление матрицы корреспонденций «Пункт₁—Пункт₂» с абсолютным значением пассажиропотока по каждому из имеющихся на корреспонденции видов транспорта.

Распределение количества поездок между точками генерации и притяжения по маршрутам и видам транспорта в классической четырёхступенчатой модели осуществляется по принципу минимизации транспортных издержек и ограничениям пропускной способности инфраструктуры. То есть, пассажир, совершающий поездку из Пункта 1 в Пункт 2, будет выбирать кратчайший маршрут и наиболее дешёвый по совокупным транспортным издержкам вид транспорта до тех пор, пока не будет достигнут лимит провозной способности по данному маршруту и виду транспорта.

Дальнейшее развитие данной концепции прогнозирования пассажиропотока было направлено в сторону ухода от формализованного рационального обоснования выбора пассажиром маршрута или вида транспорта. Тезис об иррациональности потребительского поведения оказал влияние на трансформацию алгоритмов моделирования. Так, на этапе распределения поездок по видам транспорта и маршрутам стала учитываться не дифференциация совокупной стоимости поездки, а дифференциация субъективной значимо-

сти параметров сообщения, определяемая на основе регрессионной зависимости пассажиропотоков и параметров сообщения по видам транспорта и маршрутам по ретроспективным временным рядам.

Для решения задач по моделированию пассажиропотока на корреспонденции «Пункт 1—Пункт 2» высокую популярность приобрели модели анализа временных рядов ARMA (autoregressive moving average) и ARIMA (autoregressive integrated moving average, модель Бокса—Дженкинса), математически представляющие собой обобщение модели авторегрессии и модели скользящего среднего [3].

В рамках подхода, основанного на регрессионном анализе временных рядов, прогноз пассажиропотока по корреспонденции «Пункт 1—Пункт 2» в случае ввода нового вида транспорта (или изменения параметров существующего) осуществляется следующим образом.

На первом этапе прогнозируется общий спрос на поездки, определяющийся характеристиками мобильности населения. Прогноз суммарного спроса на поездки по корреспонденции «Пункт 1—Пункт 2» осуществляется на основании регрессионной зависимости ретроспективных данных пассажиропотока от социально-экономических и демографических параметров пунктов сообщения.

На втором этапе осуществляется прогноз переключения пассажиропотока на новый вид транспорта. Классическим инструментом расчёта переключения в настоящее время является модель дискретного выбора вида транспорта. Принцип её работы заключается в использовании выявленной зависимости изменения пассажиропотока от изменения параметров сообщения. Иными словами, модель «обучается» реакции спроса на поездки различными видами транспорта на ретроспективные изменения времени в пути, стоимости проезда, частоты сообщения и комфортности. Так выявляется эластичность пассажиропотока по вышеупомянутым параметрам, которая и определяет долю переключаемых пассажиров в случае их изменения.

Альтернативный подход с использованием метода баланса обобщённых транспортных издержек в настоящее время ис-



пользуется преимущественно как корректирующее дополнение к методам регрессионного анализа. Однако, в некоторых случаях, особенно при прогнозировании пассажиропотока для принципиально нового вида сообщения, данному методу отводится ведущая роль. Например, национальная компания французских железных дорог SNCF использует метод баланса обобщённых издержек при прогнозировании переключений на вводимые в эксплуатацию высокоскоростные магистрали [4]. Для каждого конкретного пассажира на конкретной корреспонденции определяется оптимальный вид транспорта для совершения поездки. Критерием оптимальности является минимальное значение обобщённых издержек, которое рассчитывается по формуле:

$$C_g = (P_{\text{journey}} + P_{\text{access}}) + h \cdot (T_{\text{journey}} + T_{\text{access}}), \quad (1)$$

где C_g — обобщённые издержки;

P_{journey} — стоимость основной поездки, руб.;

P_{access} — стоимость вспомогательных поездок (чтобы добраться до основного транспорта), руб.;

T_{journey} — время основной поездки, мин;

T_{access} — время вспомогательных поездок, мин;

h — стоимость времени, руб.

Следовательно, нововведённая высокоскоростная железнодорожная магистраль переключит на себя то количество пассажиров, для которого она окажется наиболее выгодным видом транспорта с точки зрения обобщённых издержек.

Отдельным этапом моделирования изменения пассажиропотока является прогноз индуцированного (или деиндуцированного) спроса на поездки, вызванного изменением транспортной доступности Пункта 1 и Пункта 2 относительно друг друга. Изменение общего спроса на поездки в таком случае рассчитывается по закону гравитации, где в качестве массы Пунктов 1 и 2 выступает объём платёжеспособного спроса, концентрирующийся в них, а в качестве расстояния между ними — средневзвешенные обобщённые (денежные и временные) затраты на поездку до и после моделируемого изменения [5].

Говоря об основных проблемах использования общепринятых мировых подходов

к моделированию и прогнозированию междугородних пассажиропотоков [например, 6–9] в России, необходимо отметить крайне высокую неоднородность развития инфраструктуры, платёжеспособности населения и, как следствие, транспортного поведения жителей. Поэтому применение единых коэффициентов чувствительности к изменению параметров видов транспорта (в первую очередь времени в пути, стоимости проезда, частоты сообщения, уровня комфорта) для всей территории России некорректно. Необходимо, как минимум, проводить кластеризацию корреспонденций и рассчитывать чувствительность пассажиропотока к данным показателям индивидуально, причём кластеров должно быть достаточно много для того, чтобы минимизировать погрешность. Однако чем больше выделяется кластеров, тем меньше становится обучающая выборка корреспонденций в каждом из них. В связи с этим методики оценки переключения пассажиропотоков между видами транспорта, основанные на модели дискретного выбора, могут давать некорректные результаты в случае, если задаваемые прогнозируемые параметры видов транспорта не находятся в диапазоне, наблюдаемом в ретроспективных данных.

Большинство моделей, используемых в зарубежных странах для прогнозирования пассажиропотоков, крайне требовательны к качеству исходных статистических данных, которые в них закладываются, и к величине динамического ряда, по которому определяются регрессионные зависимости. К сожалению, в России преимущество использования методически более сложных алгоритмов нивелируется тем, что объём и качество исходных данных значительно уступает статистическим данным большинства Европейских стран, США или Японии.

В России достоверная статистическая информация в разрезе конкретных корреспонденций (пары населённых пунктов) имеется по воздушному и железнодорожному транспорту, что, к сожалению, недостаточно для построения корректного прогноза совокупного транспортного спроса. По автобусному транспорту сведения имеются лишь для ограниченного набора корреспонденций, к тому же,

несмотря на борьбу с нелегальными перевозчиками, в большинстве регионов по-прежнему высока доля теневых перевозок в структуре пассажиропотока.

Оценка пассажиропотоков на личном автомобильном транспорте — отдельная методически сложная задача, и официальной статистики о перемещениях пассажиров даже на межрегиональном уровне не существует. Таким образом, для дооценки существующего пассажиропотока приходится прибегать к использованию социологических методов исследования и масштабным полевым наблюдениям. Некорректные данные всего лишь по одной корреспонденции в обучающей выборке могут существенно исказить результаты прогнозирования.

В данных условиях применение более простых и прозрачных алгоритмов, где на каждом этапе расчётов возможно оценить промежуточный результат (имеющий физический смысл), даёт даже более точный результат прогнозирования по сравнению с более совершенными и математически сложными методиками, представляющими собой «чёрный ящик» при проведении исследования.

Целью данной статьи является формирование набора необходимых исходных данных и алгоритмов, минимизирующих, с точки зрения авторов данной статьи, риск получения значительной ошибки при прогнозировании междугородних пассажиропотоков и их апробация на примере недавно введённых маршрутов скоростного железнодорожного сообщения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных данных для моделирования и прогнозирования пассажиропотоков по корреспонденциям предлагается использовать следующие наборы данных:

1. Информация о существующих пассажиропотоках и параметрах деятельности видов транспорта.

1.1. Ретроспективные данные о пассажиропотоках в разрезе по видам транспорта. В предлагаемой методике используются ряды данных за 2005–2018 годы, т.к. только в пределах этого периода авторы располагают достоверной статистикой.

Среди видов транспорта выделяются¹ воздушный, автобусный, личный автомобильный и железнодорожный транспорт. Последний из-за сильной неоднородности рассматривается отдельно по подвидам: плацкарт (к данной категории также относятся общие и сидячие вагоны, за исключением вагонов в составе скоростных и ускоренных поездов), купе (также относится пассажиропоток в вагонах категорий СВ, люкс и мягкий) и скоростные поезда.

1.2. Усреднённые за годовой период параметры деятельности видов транспорта по прогнозируемым корреспонденциям за период с 2005 по 2018 годы: время в пути, стоимость проезда, частота сообщения, уровень комфорта транспортных средств для пассажиров².

2. Социально-экономические показатели.

2.1. Информация о валовом региональном продукте (по субъектам РФ).

2.2. Информация о структуре населения по доходным группам по субъектам РФ в соответствии с классификацией Росстата (численность жителей региона с доходами менее 7 тыс. руб., от 7 до 10 тыс. руб., от 10 до 14 тыс. руб., от 14 до 19 тыс. руб., от 19 до 27 тыс. руб., от 27 до 45 тыс. руб., от 45 до 60 тыс. руб., более 60 тыс. руб.).

2.3. Информация о численности населения пунктов генерации пассажиропотока (населённых пунктов или городских агломераций).

Источником данных по социально-экономическим показателям является Федеральная служба государственной статистики (Росстат).

Блок прогнозирования пассажиропотоков по матрице корреспонденций в разрезе видов транспорта, состоит из трёх основных компонент:

- прогнозирование суммарного спроса на пассажирские перевозки всеми видами транспорта по корреспонденции;
- распределение суммарного пассажиропотока по видам транспорта;
- прогнозирование индуцированного спроса.

¹ При необходимости в модель может быть добавлен любой другой вид/подвид транспорта со своими параметрами.

² Расчёт интегрального индекса комфорта будет приведён ниже.



Суммарный спрос на пассажирские перевозки зависит от ряда социально-экономических показателей. По результатам проведённого факторного анализа, среди всех социально-экономических показателей наибольшую корреляцию с транспортной подвижностью населения региона³ продемонстрировал показатель валового регионального продукта ($r = 0,88$). На основании ретроспективных данных была выявлена регрессионная зависимость между транспортной подвижностью населения и ВРП.

При росте ВРП увеличивается и транспортная подвижность населения, следовательно, при прочих равных условиях, и суммарный пассажиропоток на корреспонденции. Таким образом, суммарный пассажиропоток на прогнозируемый год можно определить по следующей формуле:

$$F_{\text{forecast}} = F_{\text{current}} \cdot \text{GDP}_{\Delta} \cdot k_{\text{gdp-flow}} \cdot \text{Pop}_{\Delta}, \quad (2)$$

где F_{forecast} и F_{current} — прогнозируемый и существующий суммарный пассажиропоток на корреспонденции, чел.;

GDP_{Δ} — прирост ВРП регионов, соединяемых корреспонденцией;

$k_{\text{gdp-flow}}$ — коэффициент чувствительности изменения транспортной подвижности населения к ВРП⁴;

Pop_{Δ} — прирост численности населения территорий, соединяемых корреспонденцией.

Прирост ВРП регионов, соединяемых корреспонденцией, рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{GDP}_{\Delta} = X \cdot \frac{\text{GRP}_{\text{future } 1}}{\text{GRP}_{\text{current } 1}} + Y \cdot \frac{\text{GRP}_{\text{future } 2}}{\text{GRP}_{\text{current } 2}}, \quad (3)$$

где GDP_{Δ} — прирост ВРП регионов на соответствующий год;

$\text{GRP}_{\text{future } 1}$, $\text{GRP}_{\text{future } 2}$ — прогнозируемый ВРП в регионе 1 и регионе 2;

$\text{GRP}_{\text{current } 1}$, $\text{GRP}_{\text{current } 2}$ — текущий ВРП в регионе 1 и регионе 2;

X и Y — доли пассажиропотока, генерируемые регионом 1 и регионом 2.

В случае, если населённые пункты маршрута расположены в пределах одного региона, в расчётах используются данные только по этому региону.

³ Количество поездок за пределы населённого пункта, совершаемое всеми видами транспорта на душу населения.

⁴ Определяется по результатам обучения модели на ретроспективных данных.

Аналогично рассчитывается прирост численности населения территорий, соединяемых корреспонденцией:

$$\text{Pop}_{\Delta} = X \cdot \frac{\text{Pop}_{\text{future } 1}}{\text{Pop}_{\text{current } 1}} + Y \cdot \frac{\text{Pop}_{\text{future } 2}}{\text{Pop}_{\text{current } 2}}, \quad (4)$$

где Pop_{Δ} — прирост численности населения ячеек, соединяемых корреспонденцией на соответствующий год;

$\text{Pop}_{\text{future } 1}$, $\text{Pop}_{\text{future } 2}$ — прогнозируемая численность населения ячеек 1 и 2, чел.;

$\text{Pop}_{\text{current } 1}$, $\text{Pop}_{\text{current } 2}$ — текущая численность населения ячеек 1 и 2, чел.;

X и Y — доли пассажиропотока, генерируемые регионом 1 и регионом 2.

Распределение суммарного прогнозируемого пассажиропотока по видам транспорта производится на основании совокупности влияющих на выбор пассажира четырёх факторов: времени в пути, стоимости проезда, частоты сообщения, уровня комфорта.

Каждый из показателей конвертируется в стоимостное выражение и влияет на показатель совокупных транспортных затрат на поездку по данной корреспонденции для пассажира. Совокупные транспортные затраты рассчитываются для каждого вида (подвида) транспорта отдельно.

Показатель совокупных транспортных затрат рассчитывается как сумма стоимости проезда и стоимости потраченного времени:

$$\text{TTC} = C_{\text{travel}} + C_{\text{time}}, \quad (5)$$

где TTC — совокупные транспортные затраты, руб.;

C_{travel} — стоимость проезда⁵, руб.;

C_{time} — стоимость потраченного времени (с поправкой на уровень комфорта поездки), руб.;

$$C_{\text{travel}} = C_{t1} + \text{NCT} + C_{t2}, \quad (6)$$

где C_{t1} — средневзвешенная стоимость проезда от пункта отправления до вокзала/автовокзала/аэропорта, на котором начинается основной сегмент поездки данной корреспонденции, руб.;

⁵ Полная стоимость проезда для общественного транспорта (с учётом стоимости проезда между вокзалами/автовокзалами/аэропортами и пунктами отправления/назначения), либо расчётная стоимость поездки для личного автомобильного транспорта, включающая в себя: 1) стоимость затраченного топлива, 2) стоимость техобслуживания на 1 км пробега, умноженную на протяжённость корреспонденции, 3) стоимость использования инфраструктуры, в случае, если за него взимается плата.

НСТ — средняя стоимость проезда на основном сегменте поездки, руб.;

C_{12} — средняя стоимость проезда от вокзала/автостанции/аэропорта, на котором заканчивается основной сегмент поездки данной корреспонденции до пункта назначения.

Стоимость потраченного времени зависит от времени в пути, частоты сообщения (и, как следствие, среднего времени ожидания отправления транспортного средства), а также уровня дохода пассажира (рассчитывается для каждой группы пассажиров по уровню доходов). Также стоимость потраченного времени корректируется на уровень дискомфорта, который испытывает пассажир во время поездки при использовании определённого вида (подвида) транспорта и при определённой продолжительности поездки.

Рассчитывается стоимость потраченного времени по следующей формуле:

$C_{\text{time}} = (T_{\text{travel}} \cdot K_{\text{conf}} + (1/Gr) \cdot (1 - K_{fr})) \cdot I_h$, (7)
где C_{time} — стоимость потраченного времени (с поправкой на уровень комфорта поездки), руб.;

T_{travel} — среднее время в пути пассажира от пункта отправления до пункта прибытия, мин.;

K_{conf} — коэффициент дискомфорта поездки;

Gr — частота сообщения (число рейсов в сутки), ед.;

K_{fr} — коэффициент эластичности к частоте сообщения⁶;

I_h — средняя стоимость часа рабочего времени для пассажира с определённой категорией доходов.

Время в пути на корреспонденции складывается из нескольких сегментов поездки:

$$T_{\text{travel}} = T_{t1} + T_{\text{waiting}} + NTT + T_{12}, \quad (8)$$

где T_{travel} — время в пути пассажира от пункта отправления до пункта прибытия, мин.;

T_{t1} — среднее время в пути от пункта отправления до вокзала/автостанции/аэропорта, на котором начинается основной сегмент поездки данной корреспонденции, мин.;

T_{waiting} — среднее время, закладываемое пассажиром на пересадки при смене видов транспорта в ходе поездки, мин.;

NTT — чистое время поездки на основном сегменте, мин.;

T_{12} — среднее время в пути от вокзала/автостанции/аэропорта прибытия до пункта назначения, мин.

Пунктом отправления и пунктом назначения для территориальной ячейки является геометрический центр системы расселения ячейки.

Коэффициент комфорта поездки зависит от уровня комфорта самого транспортного средства и коэффициента эластичности к уровню комфорта⁷. Коэффициент комфорта определяется для каждого вида транспорта и приобретает значения от 0 до 1. Его значение рассчитывается на основании результатов социологических исследований пассажиров на предмет комфортности поездки при использовании различных видов транспорта.

Средняя стоимость часа рабочего времени зависит от среднемесячного уровня дохода пассажира данной группы населения и среднего количества рабочих часов в году:

$$I_h = \frac{I_m}{\frac{247}{12} \cdot 8}, \quad (9)$$

где I_m — среднемесячный доход пассажира определённой группы населения по уровню дохода, руб.;

247 — среднее число рабочих дней в году;

12 — число месяцев в году;

8 — среднее число рабочих часов в рабочем дне.

На следующем этапе рассчитывается отношение показателя совокупных транспортных затрат на данном виде транспорта к минимальному показателю среди всех видов транспорта:

$$K_{\text{TTC}} = \text{TTC}_i / \text{TTC}_{\text{min}}, \quad (10)$$

где K_{TTC} — коэффициент отношения совокупных транспортных затрат для данного вида транспорта к минимальному значению среди всех видов транспорта;

TTC_i — совокупные транспортные затраты для данного вида транспорта, руб.;

TTC_{min} — минимальное значение совокупных транспортных затрат среди всех видов транспорта для данной корреспонденции, руб.

⁶ Определяется по результатам обучения модели на ретроспективных данных.

⁷ Определяется по результатам обучения модели на ретроспективных данных для каждого вида транспорта и корреспонденции.



Коэффициент вероятности выбора вида транспорта рассчитывается следующим образом:

$$K_p = \frac{1}{K_{\text{ettc}}}, \quad (11)$$

где K_p — коэффициент вероятности выбора вида транспорта;

K_{ettc} — коэффициент эластичности пассажиропотока к изменению совокупных транспортных затрат⁸.

В соответствии с коэффициентом вероятности выбора вида транспорта распределяется суммарный прогнозируемый пассажиропоток:

$$F_i = \frac{K_p}{\sum_{i=1}^n K_p} \cdot F_{\text{forecast}}, \quad (12)$$

где F_i — прогнозируемый пассажиропоток на данном виде транспорта, чел.;

K_p — коэффициент вероятности выбора вида транспорта;

F_{forecast} — прогнозируемый суммарный пассажиропоток на корреспонденции, чел.

Таким образом, для каждого вида (подвида) транспорта находится прогнозируемое значение пассажиропотока на корреспонденции.

Если какие-либо параметры видов транспорта изменяются с течением времени, средневзвешенные совокупные транспортные затраты также изменятся. В случае, если совокупные транспортные затраты в результате изменений параметров времени в пути, стоимости проезда, частоты сообщения и уровня комфорта снижаются, возникает индуцированный спрос (пассажиры начинают совершать поездки чаще, либо начинают совершать поездки те люди, кто раньше вовсе не совершал поездок на данной корреспонденции). В случае если совокупные транспортные затраты возрастают, возникает обратная ситуация (спрос снижается). В общем виде формула расчёта индуцированного спроса выглядит следующим образом:

$$F_{\text{ind}} = F_{\text{forecast}} \cdot \left(\left(\frac{TTC_{\text{base}}}{TTC_{\text{model}}} \right)^{K_{\text{nc}}} - 1 \right), \quad (13)$$

где F_{ind} — прогнозируемый индуцированный спрос, чел.;

TTC_{base} — средневзвешенные совокупные транспортные затраты при существующих параметрах видов транспорта, руб.;

TTC_{model} — средневзвешенные совокупные транспортные затраты при моделируемых параметрах видов транспорта, руб.;

K_{nc} — коэффициент эластичности к совокупным транспортным затратам.

Объём прогнозируемого индуцированного спроса суммируется с базовым прогнозируемым пассажиропотоком на том виде транспорта, за счёт которого произошло снижение совокупных транспортных затрат для данной корреспонденции. Данная величина и будет являться итоговым объёмом прогнозируемого пассажиропотока на данном виде транспорта и корреспонденции.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вышеописанная методика прогнозирования пассажиропотока применялась в научно-исследовательских работах, связанных с разработкой крупных инфраструктурных проектов, в частности, высокоскоростных железнодорожных магистралей Москва—Нижегород и Москва—Санкт-Петербург, перспективной сети скоростных автомобильных дорог ГК «Автодор». Среди частично реализованных к настоящему моменту транспортных проектов, в процессе проработки опиравшихся на осуществлённый по данной методике прогноз, следует упомянуть маршрутную сеть скоростных электропоездов «Ласточка». Скоростные электропоезда «Ласточка» назначаются на междугородние маршруты на сети ОАО «РЖД» с 2012 года. В 2014 году ООО «ЦЭИ»⁹ выполнило научно-исследовательскую работу по разработке плана по развитию маршрутной сети поездов «Ласточка», в рамках которой был сделан прогноз пассажиропотока по перспективным маршрутам скоростных поездов на период до 2035 года в разрезе корреспонденций «станция—станция».

Рассмотрим прогнозные и фактические значения пассажиропотока на 2018 год по главным корреспонденциям четырёх маршрутов скоростного сообщения, которые были введены в эксплуатацию с максимально близкими к использованным при прогнозировании параметрам сообщения. Для осуществления прогноза пассажиро-

⁸ Определяется по результатам обучения модели на ретроспективных данных.

⁹ Общество с ограниченной ответственностью «Центр Экономики Инфраструктуры».

Таблица 1

Предполагаемые параметры сообщения на 2018 год, использованные в качестве вводных данных для моделирования пассажиропотока

Корреспонденция	Вид сообщения	Стоимость проезда, руб.	Время в пути, часов	Частота сообщения, рейсов в сутки
Москва—Курск	Плацкарт	1324	7,2	10,3
	Купе	2444	7,2	9,3
	Ласточка	982	5,7	2,0
	Автобус	850	9,0	3,3
	Личный автомобиль	1208	6,7	Неограниченная
Москва—Орёл	Плацкарт	1179	5,3	11,3
	Купе	1861	5,3	9,3
	Ласточка	697	4,1	4,0
	Автобус	650	6,5	10,0
	Личный автомобиль	936	4,5	Неограниченная
Москва—Смоленск	Плацкарт	950	5,8	7,0
	Купе	1 652	5,8	7,0
	Ласточка	900	4,1	3,0
	Автобус	900	6,5	34,0
	Личный автомобиль	1082	4,8	Неограниченная
Москва—Тверь	Плацкарт	722	2,2	8,0
	Купе	1018	2,2	8,0
	Ласточка	510	1,7	12,0
	Пригородный поезд	390	3,0	7,0
	Личный автомобиль	447	2,6	Неограниченная

Источник: составлено авторами.

потока для исследуемых корреспонденций была собрана база данных параметров существующих видов транспорта и заданы перспективные параметры скоростного железнодорожного сообщения.

Таблица 2 содержит прогнозные и фактические значения пассажиропотока, обслуживаемого скоростными поездами «Ласточка» по главным корреспонденциям вышеуказанных маршрутов. Фактический пассажиропоток отклоняется от сделанного в рамках НИР прогноза не более чем на 5 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из результатов прогнозирования следует, что скоростные поезда «Ласточка» на исследуемых корреспонденциях к 2018 году должны были занять от 25 до 50 % рынка пассажирских перевозок, что фактически и произошло. Помимо значительных переключений пассажиров с альтернативных видов транспорта, важным источником пассажиропотока стал существенный индуцированный спрос на поездки: от 10 до 15 % пассажиров поездов «Ласточка» вообще не совершили бы свою поездку

Таблица 2

Прогнозные и фактические значения пассажиропотока за 2018 год

Корреспонденция	2018 (прогноз)	2018 (факт)
Москва—Смоленск	342 359	356 426
Москва—Курск	311 173	327 171
Москва—Орел	417 989	434 179
Москва—Тверь	2 292 005	2 407 746

Источник: составлено авторами.

в случае отсутствия скоростного железнодорожного сообщения.

В силу интенсивности деловых и культурно-бытовых связей и высоких столичных доходов населения на корреспонденциях между Москвой и соседними регионами существует высокий спрос на «утренние» или «вечерние» поездки, проходящие без потери ночи или дня на дорогу. Пассажиры, совершающие такие поездки, крайне чувствительны ко времени в пути. Запуск поездов «Ласточка» в сочетании с их удобным временем отправления и прибытия позволил сделать возможны-



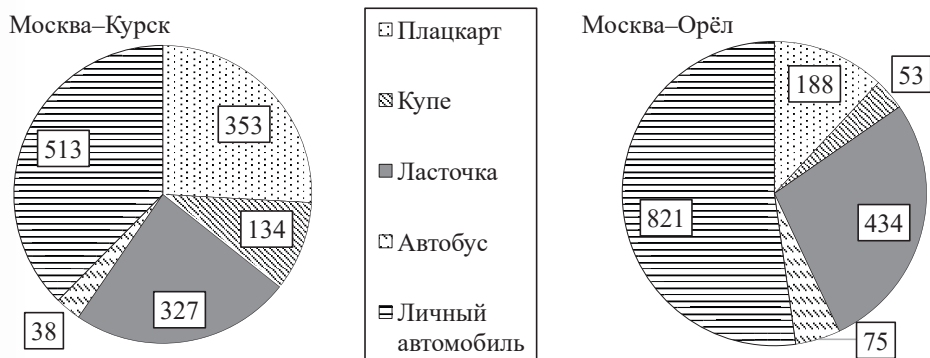


Рис. 1. Фактическая структура пассажиропотока на корреспонденции Москва–Курск и Москва–Орёл, 2018 г., тыс. пассажиров. Источник: составлено авторами.



Рис. 2. Фактическая структура пассажиропотока на корреспонденции Москва–Смоленск и Москва–Тверь, 2018 г., тыс. пассажиров. Источник: составлено авторами.

ми такие поездки в Москву из Смоленска, Орла и Курска и существенно упростил возможность совершения таких поездок из Твери.

Переключения пассажиров на скоростные поезда осуществлялись со всех альтернативных видов транспорта, включая личный автомобильный. На первых трёх корреспонденциях наибольший отток пассажиров ощутили автобусный и традиционный железнодорожный (плацкарт) транспорт. На корреспонденции Москва–Тверь основной базой для переключения пассажиров на поезда «Ласточка» послужили классические пригородные электропоезда – в результате запуска скоростного сообщения они потеряли около 90 % годового пассажиропотока.

Данный прогноз не мог быть корректно осуществлён с помощью модели дис-

кретного выбора вида транспорта, основанной на регрессионной ретроспективной зависимости изменения пассажиропотока от изменения параметров сообщения, потому что в данном случае моделируется спрос на принципиально новую транспортную услугу. Поезда «Ласточка» следуют по вышеперечисленным маршрутам значительно быстрее альтернативных видов транспорта, при этом обеспечивается конкурентоспособная стоимость проезда (табл. 1). Кроме того, поезда «Ласточка» характеризуются более высоким уровнем комфорта относительно конкурирующих с ними автобусов и традиционного железнодорожного сообщения. Базы данных для корректного обучения регрессионной модели, с помощью которой можно было бы спрогнозировать спрос на поезда «Ласточка» на момент осуществления прогноза не было,

поскольку в ретроспективе подобных нововведений было очень мало. Более того, в зависимости от типа корреспонденции и степени развития конкуренции с другими видами сообщения, одинаковые изменения параметров могут привести к различным изменениям структуры и суммарного объёма пассажиропотока. Например, сокращение времени следования ночного поезда с 10 до 7,5 часов (на 25 %) вызовет меньший прирост пассажиропотока, нежели сокращение времени следования дневного экспресса с 4 до 3 часов (на те же 25 %), потому что стоимость времени у пассажира ночного поезда ниже, чем у пассажира дневного экспресса. Это невозможно спрогнозировать без учёта такого параметра, как стоимость единицы времени пассажира.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная выше методика прогнозирования пассажиропотоков совпадает с наиболее распространёнными математическими подходами, основанными на регрессионном анализе динамических рядов, в области прогнозирования суммарного спроса на поездки. Однако рассматриваемый подход отличается большей прозрачностью в части расчёта распределения пассажиров между видами транспорта. Преимуществом предложенного метода является количественное выражение параметров сообщения через итоговые затраты на поездку для дифференцированных групп пассажиров. Модель распределяет пассажиропоток не по результатам обучения на ретроспективных данных, а на основании совокупных транспортных затрат пассажиров на поездку. Это позволяет с более высокой точностью моделировать изменения параметров сообщения, не имеющие аналогов в ретроспективе. Прогноз пассажиропотока для новых маршрутов скоростных поездов «Ласточка» показал, что чувствительность пассажиропотока к изменению времени в пути и комфортности поездки могут быть различными, в зависимости от масштаба изменений данных параметров, поскольку транспортное поведение разных групп пассажиров определяют разные параметры сообщения. В частности, грамотный учёт

стоимости времени пассажиров позволил выявить на этапе прогнозирования пассажиропотока «скрытый потенциал» скоростного сообщения, не учитываемый при использовании регрессионно-аналитического подхода. Главным недостатком предлагаемой методики является недоучёт иррациональности поведения потребителей. Те или иные виды транспорта на определённых корреспонденциях могут быть экономически необоснованно популярны или, наоборот, не популярны, в силу ментальных особенностей пассажиров (например, привычки пользоваться определённым видом транспорта).

ЛИТЕРАТУРА

1. Cervero, R. Induced Travel Demand: Research Design, Empirical Evidence, and Normative Policies. *Journal of Planning Literature*, 2002, Vol. 17 (3), pp. 3–20. [Электронный ресурс]: <http://jpl.sagepub.com/cgi/content/abstract/17/1/3>. Доступ 27.02.2020. DOI: 10.1177/088122017001001.
2. Осетров Е. С. Математические модели, методы и алгоритмы для прогнозирования пассажирских перевозок / Дис... канд. физ.-мат. наук. — Дубна. — 2018. [Электронный ресурс]: https://wwwinfo.jinr.ru/dissertation/Osetrov_disser.pdf. Доступ 27.02.2020.
3. McNally, M. G. The Four-Step Model. In: *Handbook of Transport Modelling*. Ed. D. A. Hensher, K. J. Button, 2000, pp. 35–52. [Электронный ресурс]: <https://pdfs.semanticscholar.org/c91e/e47992495bd9c9fe36ed4dbe85dc3c21aecf.pdf>. Доступ 27.02.2020. DOI: <https://doi.org/10.1108/9780857245670-003>.
4. Бонсалл П. У., Чемперноун А. Ф., Мейсон А. К., Уилсон А. Г. Моделирование пассажиропотоков в транспортной системе / Пер. с англ. Е. М. Шлафштейна. — М.: Транспорт, 1982. — 207 с.
5. Box, G. E. P., Jenkins, G. M. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden-Day, San Francisco, 1970. [Электронный ресурс]: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=2106713>. Доступ 27.02.2020.
6. Sartono. Models for Train Passenger Forecasting of Java and Sumatra. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 824:012032, 3rd International Conference on Mathematics, Science and Education 2016, 3–4 September 2016, Semarang, Indonesia. DOI: 10.1088/1742-6596/824/1/012032.
7. Nagel, K., Wagner, R., Woesler, R. Still flowing: Approaches to traffic flow and traffic jam modeling. *Operations Research*, January 2, 2003, Vol. 51, pp. 681–710. Corpus ID: 3616360. DOI: 10.1287/opre.51.5.681.16755.
8. Guo, Xin. Passenger capacity prediction model based on LOGIT and system dynamics for passenger dedicated line. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, Iss. 1, pp. 31–34.
9. Yan, Xi; Li, Jing. Analysis on predict model of railway passenger travel factors judgment with soft-computing methods. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, OmniaScience, Barcelona, 2014, Vol. 7, Iss. 1, pp. 100–114. [Электронный ресурс]: https://www.econstor.eu/bitstream/10419/188593/1/v07-i01-p0100_940-6029-2-PB.pdf. Доступ 26.02.2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3926/jiem.940>. ●

