УДК 510.6:656
DOI: 10.52170/2712-9195_2026_21_20

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАССАЖИРОПОТОКА ПРИ СКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ

Ю. А. Бердышева

Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Дуси Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

Аннотация: в статье предлагается подход к количественной оценке изменения пассажиропотока при введении скоростного движения с использованием математического моделирования. Оценка транспортных потоков и экономическая эффективность скоростного движения выполнена с использованием гравитационной модели и авторского подхода, при котором оценка стоимости времени осуществляется в виде стоимости рабочего времени пассажира. Авторский подход демонстрирует ориентировочный эффект от введения скоростного движения на участке Омск-Новосибирск, который дает основание считать проекты развития скоростных дорог в Сибирском регионе экономически обоснованными.

Ключевые слова: скоростное движение, пассажиропоток, гравитационная модель, оценка транспортных потоков.

MODELING PASSENGER FLOW CHANGES DURING HIGH-SPEED TRAFFIC

Yu. A. Berdysheva

Siberian Transport University, Dusi Kovalchuk St., 191, Novosibirsk, 630049, Russia

Abstract: This article proposes an approach to quantitatively assessing passenger flow changes following the introduction of high-speed rail using mathematical modeling. Traffic flows and the economic efficiency of high-speed rail are assessed using a gravity model and the author's approach, which quantifies the cost of time as the value of passenger working time. The author's approach demonstrates the estimated effect of introducing high-speed rail on the Omsk-Novosibirsk section, which provides grounds for considering high-speed rail development projects in the Siberian region economically viable.

Keywords: high-speed rail, passenger flow, gravity model, traffic flow assessment.

Оценка транспортных потоков и экономическая эффективность скоростного движения в условиях развития железнодорожного транспорта на основе современных технологий осуществляется всевозможными способами [1]. Модели и методы теории массового обслуживания представляются приоритетными в данном направлении исследования [2].

Время, которое тратит пассажир на перемещение от места нахождения до конечного пункта, является преимущественным фактором в процессе скоростного железнодорожного движения [3].

Базовыми характеристиками при решении использования предпочтительного пассажиру вида транспорта выступают минимальные временные значения пути и денежных затрат на него [4].

Базовый метод расчета пассажиропотока между железнодорожными посадочными станциями представлен использованием гравитационной модели, функционирование которой выражается зависимостью силы тяготения станций

друг к другу в зависимости от их размеров и расстояния между ними (формула 1) [5]:

$$\lambda_{i,j} = G_t \frac{m_i m_j}{t_{i,j}^2}, \quad (1)$$

где $\lambda_{i,j}$ – интенсивность пассажиропотока;

m_i, m_j – население, проживающее в i-м и j-м пунктах соответственно;

$t_{i,j}$ – время передвижения между i-м и j-м пунктами;

G_t - некоторая константа (аналог гравитационной постоянной в механике).

Принимая во внимание численность жителей и суммарного пассажиропотока (Λ) между станциями железной дороги, оценку пассажиропотока между станциями можно рассчитать по формуле (1), где константа G_t определяется выражением (формула 2) [6]:

$$G_t = \Lambda \left(\sum_i \sum_{j \neq i} \frac{m_i m_j}{t_{i,j}^2} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Важно помнить, что изменение времени пути оказывает существенное влияние на изменение пассажиропотока между станциями.

Чтобы выбрать вид транспорта, пассажир, в первую очередь, смотрит на время пути и стоимость билета. Очевидно, что время передвижения на стандартном поезде $t_П$ больше, чем на скоростном (экспрессе) $t_Э$, а на самолете скорость еще выше, поэтому время передвижения самое маленькое t_C. С другой стороны, затраты на тарифы, наоборот, возрастают: $C_П < C_Э < C_C$.

Таким образом, чем выше стоимость времени у пассажира, тем чаще он будет использовать скоростные виды сообщения.

Скоростные поезда выберут люди, у которых стоимость времени в пути (пассажиро-часа) $C_{вр}$ лежит в следующих пределах (формула 3) [7]:

$$\frac{C_Э - C_П}{t_Э - t_П} < C_{вр} < \frac{C_C - C_Э}{t_Э - t_C}. \quad (3)$$

Тогда доля пассажиров, выбирающих скоростные поезда ($\delta_Э$), составит (формула 4):

$$\delta_Э = F\left(\frac{C_C - C_Э}{t_Э - t_C} \right) - F\left(\frac{C_Э - C_П}{t_П - t_Э} \right), \quad (4)$$

где $F(x)$ – функция распределения стоимости времени в пути населения.

При этом пассажиры с низким уровнем дохода попадают в премедитатное исключение (формула 5):

$$P_d = F\left(\frac{C_C - C_Э}{t_Э - t_C}\right)\cdot 100\% \quad (5)$$

.

Таким образом, оценка социально-экономических эффектов от введения скоростного движения представлена одним из подходов, при котором оценка стоимости времени осуществляется в виде стоимости рабочего времени пассажира [8].

Понятие «премедитатное исключение», введенное автором, представляет собой численный критерий оценки качества услуги или сервиса и его влияния на их объем, заключающееся в ограничении доступа некоторых пассажиров к услуге, в частности, скоростному пассажирскому сообщению, сокращающему время передвижения [9].

Пример использования этого подхода представлен расчетом прогноза изменения пассажиропотока между станциями на линии Омск-Новосибирск при введении скоростного железнодорожного сообщения. На сегодняшний день самыми крупными по населению городами на трассе Омск-Новосибирск являются Татарск, Барабинск и Чулым [6].

На рис. 1 условные площади городов (станций) изображены пропорционально их населению. При этом со станции Барабинск удобно передвигаться еще и жителям соседнего города Куйбышев [4].

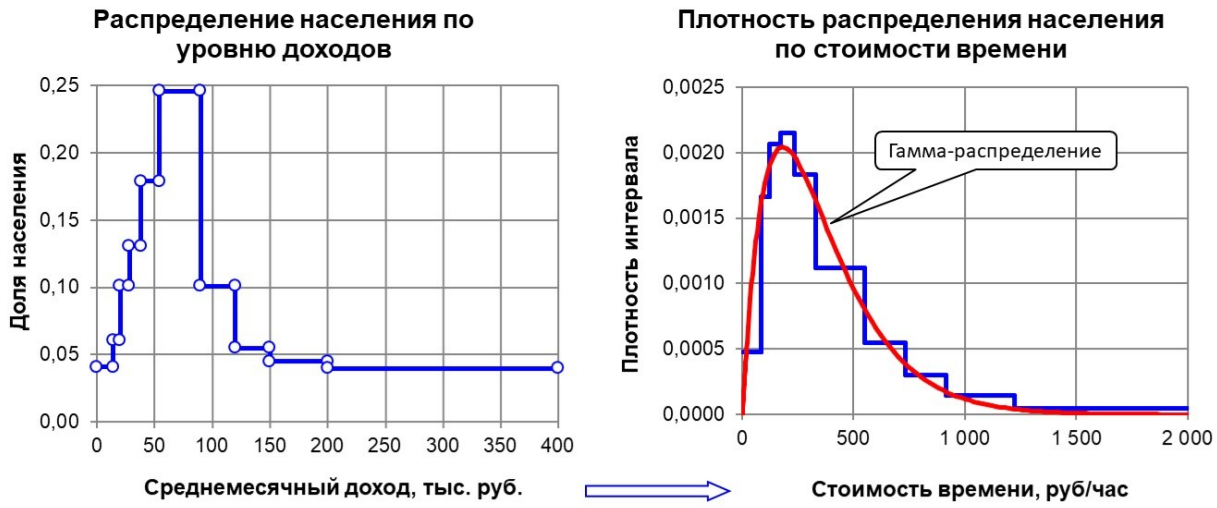


Рис. 1 - Станции планируемой скоростной магистрали

В настоящее время основные способы передвижения между данными станциями – это поезда и автобусы. Поезда дальнего сообщения – 10 пар поездов в сутки, делают остановки на всех станциях, кроме Чулымской (только половина остановок). Автобусное сообщение связывает Барабинск, Чулым и Новосибирск и осуществляется 2 раза в сутки.

Авиационное сообщение между Омском и Новосибирском осуществляется 1 раз в сутки. Пригородные поезда осуществляют перевозки из Омска только до Татарска. Между другими станциями количество поездов варьируется от 1 до 6.

Для региона трассы Омск-Новосибирск в 2024 году распределение доходов населения выглядит следующим образом (рис. 2 а).



а) б)

Рис. 2 – Среднемесячные доходы населения и их распределение:
а) – распределение населения по среднемесячному уровню доходов;
б) – плотность распределения населения по стоимости времени.

Тогда параметр $C_{вр}$ - стоимость времени населения, можно определить делением среднемесячного дохода на количество рабочих часов в месяце, которое примем равным 164 часам.

Одна из основных гипотез в математической статистике это гипотеза о законе распределения случайной величины [10]. Для проведения теоретических исследований реальные данные распределения населения по уровню доходов необходимо представить в виде некоторого закона. Наиболее часто используются нормальное распределение, экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, Гамма-распределение, равномерное распределение, логнормальное распределение, распределение Пирсона и др., каждое из которых имеет свою сферу практического применения.

Для поиска теоретического распределения в первую очередь необходимо определить семейство распределений, после чего определяют параметры распределения. Одним из основных способов поиска семейства распределений является сравнение реальных данных, представленных в виде гистограммы с функцией плотности теоретического распределения.

В рассматриваемом случае распределение среднемесячных доходов населения представлено неравномерными интервалами (рис 4.4а), поэтому для построения корректной гистограммы необходимо использовать, так называемую, плотность интервала или относительную частоту интервала, которая определяется делением доли населения в каждом интервале на его величину, выраженную в единицах стоимости времени $C_{вр}$ (руб./час).

Таким образом, рассчитав плотность каждого интервала, получим ступенчатый график распределения населения по стоимости времени (рис. 2 б).

Используя полученную гистограмму, подберем теоретическое распределение, путем сравнения с функцией плотности вероятности $f(x)$.

Для аппроксимации графика плотности распределения населения по стоимости времени, воспользуемся функцией плотности распределения частного случая Гамма-распределения – распределением Эрланга с целочисленными параметрами – параметром формы (α) и параметром масштаба (β) (формула 6):

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha}(\alpha-1)!} \quad (6)$$

.

В рассматриваемом примере, параметры распределения Эрланга, полученные методом максимального правдоподобия, составляют $\alpha = 2$ и $\beta = 180$ (рисунок 2 б) [3].

Полученная аппроксимация необходима для прогнозной оценки доли населения, выбирающей тот или иной вариант железнодорожного сообщения – обычный или скоростной поезд, в соответствии с формулой (4), где функция распределения стоимости времени населения – распределение Эрланга, имеет вид (формула 7):

$$F(x) = 1 - \sum_{n=0}^{n=\alpha-1} \frac{1}{n!} \cdot \left(\frac{x}{\beta}\right)^{n} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}. \quad (7)$$

Данный подход реализован в разработанной автором исследования программе для ЭВМ «Стрела-XXI», предназначенной для расчета пассажиропотока при скоростном движении [11].

В табл. 1 приведен пример расчета пассажиропотока по скорректированной с учетом стоимости пассажиро-часа (формулы 3, 4) гравитационной модели с использованием трех видов передвижения – обычный поезд, скоростной (экспресс) и самолет, с фиксированными тарифами на поездку.

Таблица 1 – Распределение суточного пассажиропотока между городами Омск-Новосибирск с учетом стоимостного фактора в 2023 г.

Вид транспорта	Цена билета, руб.	Время поездки, час	Стоимость времени, руб./ч	Доля от исходного пассажиропотока	Добавленный пассажиропоток, чел./сут.
Обычный поезд	3000	7,6	≤ 500	0,77	0,00
Скоростной поезд	5000	3,6	≤ 1667	0,23	1229
Самолет	8000	1,8	> 1667	0,00	0,00

Для определения граничных значений стоимости времени используем ограничение (формула 3). Пассажиры с низкой стоимостью времени предпочитают использовать обычный поезд, так как не готовы платить за экономию времени. В таблице 4.4 скоростной поезд позволяет сократить время передвижения на 4 часа $t_П - t_Э = 7,6 - 3,6$, при этом требуется доплатить 2000 рублей $C_Э - C_П = 5000 - 3000$. Таким образом (формула 8):

$$\frac{C_Э - C_П}{t_П - t_Э} = \frac{2000}{4} = 500. \quad (8)$$

Аналогичным образом определим пограничную стоимость времени, при которой происходит перераспределение пассажиров между скоростным поездом (экспрессом) самолетом (формула 9):

$$\frac{C_С - C_Э}{t_Э - t_С} = \frac{8000 - 5000}{3,6 - 1,8} = 1667. \quad (9)$$

Рассчитаем доли каждого способа передвижения. Для обычного поезда по теории вероятности (формула 7):

$$\delta_П = P(x \le 500) = F(500) = 1 - e^{-\frac{x}{180}} - \frac{x}{180} e^{-\frac{x}{180}} = 0,77.$$

То есть у 77% населения стоимость времени менее 500 рублей в час и им не рационально использовать скоростной поезд.

Доля передвижений на самолете:

$$\delta_С = P(x \ge 1667) = 1 - F(1667) = 0,001.$$

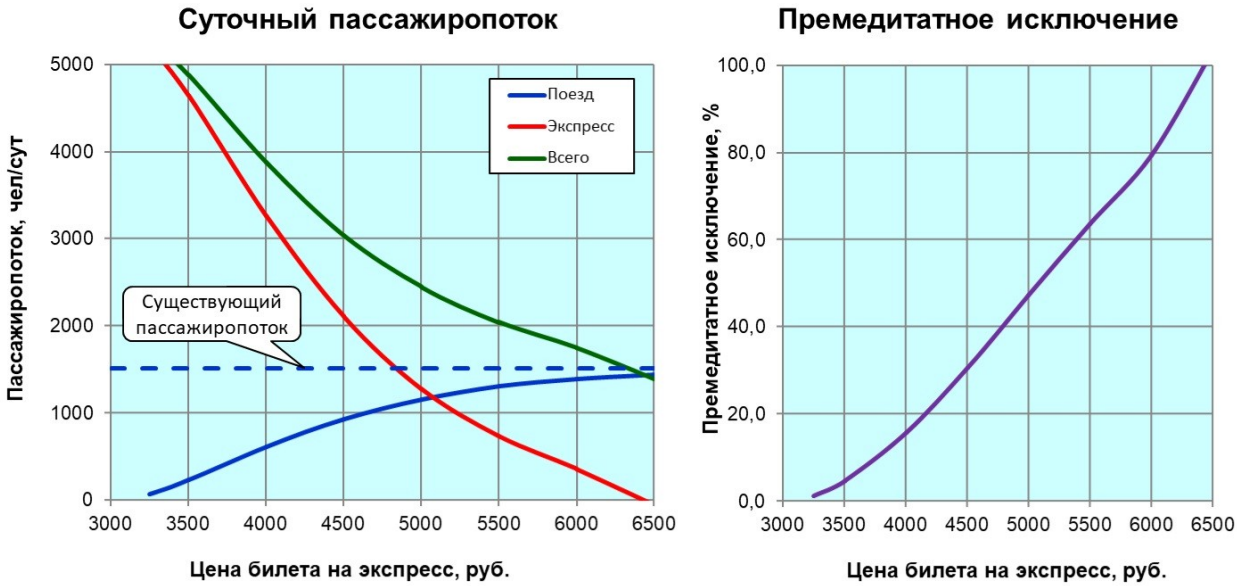
То есть на самолете между Новосибирском и Омском не выгодно передвигаться при наличии скоростного железнодорожного сообщения. Но в любом случае это может быть выгодно для транзитных пассажиров Новосибирского аэропорта, а такой пассажиропоток в данной работе не рассматривается. (Отметим, что при отсутствии скоростного поезда, на обычном поезде поедут 95% пассажиров, а на самолете полетят 5%).

Таким образом, все оставшиеся пассажиры используют скоростной поезд (формула 4):

$$\delta_Э = F\left(\frac{C_С - C_Э}{t_Э - t_С}\right) - F\left(\frac{C_Э - C_П}{t_П - t_Э}\right) = 0,23.$$

В соответствии с формулой (5) премедитатное исключение в приведенном примере равно 77%.

На рис. 3 показан результат скорректированной гравитационной модели оценки пассажиропотока в зависимости от тарифа на перевозки по скоростной магистрали при фиксированной стоимости билета Омск-Новосибирск на обычный поезд 3000 руб.



а) б)

Рис. 3 – Зависимость суточного пассажиропотока (а) и премедитатного исключения пассажиров (б) на участке Омск-Новосибирск от тарифа на скоростной поезд (экспресс)

На рис. 3 а) представлены результаты генерации пассажиропотока при внедрении скоростного железнодорожного сообщения с учетом гравитационной модели. Например, в соответствии с табл. 1, скоростной поезд будут использовать 23% пассажиров от существующего пассажиропотока 1520 человек (или 356 пассажиров в сутки). Но на самом деле для всех потенциальных пассажиров с такой стоимостью времени (от 500 до 1667) появится новый эффективный способ передвижения, который они раньше не рассматривали и отказывались от передвижения (на поезде долго, а на самолете дорого). Для этой категории пассажиров время передвижения сократится в 7,6/3,6 = 2,11 раза.

В соответствии с гравитационной моделью (формула 2), при сокращении времени передвижения в 2,11 раза, количество пассажиров увеличится в 2,112 = 4,46 раза. То есть, вместо 356 пассажиров, пассажиропоток составит 4,46·356 = 1585 пассажиров в сутки. То есть, приток пассажиров в сутки составит 1585 – 356 = 1229 человек, как это и следует из рис. 3 а), где общий пассажиропоток при тарифе на скоростном поезде в 5000 рублей, на 1229 человек выше существующего. На рис. 3 а) хорошо видно, что пассажиропоток очень чувствителен к уровню тарифов. Например, при увеличении тарифа на скоростной поезд с 4000 руб. до 5500 руб. суммарный пассажиропоток уменьшится в 2 раза. Что касается премедитатного исключения, которое рассчитывается как отношения пассажиропотока на обычном поезде к общему пассажиропотоку, то этот показатель при увеличении тарифа на скоростной поезд с 4000 руб. до 5500 руб., увеличится более чем в 4 раза (рис. 3 б).

Таким образом, проведенная оценка социально-экономических эффектов от введения скоростного движения представлена одним из подходов, при котором оценка стоимости времени осуществляется в виде стоимости рабочего времени

человека. То есть при оценке стоимости часа пассажира используется среднемесячный доход, деленный на среднемесячное число рабочих часов. Авторская методика показывает ориентировочный эффект от введения скоростного движения на участке Омск-Новосибирск, который дает основание считать проекты развития скоростных дорог в Сибирском регионе экономически обоснованными.

Библиографический список

1. Жаркова, Е. А. Системные аспекты развития железнодорожного транспорта на основе информационных технологий / Е. А. Жаркова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. – 2018. – № 1 (3). – С. 10–14.
2. Лапшин, В. А. Особенности моделирования пассажиропотока объектов транспортной инфраструктуры // Молодой ученый. 2020. № 291. С. 33–36.
3. Карасев, С. В. Оценка задержек поездов на железнодорожной сети методом моделирования в условиях случайного образования заявок на перевозку / С. В. Карасев, М. Е. Корягин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2018. – № 2 (45). – С. 43-51.
4. Аксененко, А. С. Оценка влияния расстояния до областного центра и текущего количества жителей на динамику изменения населения Новосибирской области / А. С. Аксененко, М. Е. Корягин, А. А. Прудников // Финансовый менеджмент. – 2024. – №. 3. – С. 301-310.
5. Карасев, С. В. Имитационное моделирование оценки задержек поездов на железнодорожной сети / С. В. Карасев, М. Е. Корягин // Политранспортные системы: Материалы X Международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 163-165.
6. Бердышева, Ю. А. Оценка пассажиропотока на скоростной магистрали Омск-Новосибирск в условиях транспортной конкуренции / Ю. А. Бердышева, М. Е. Корягин // Управленческий учет. – 2023. – № 11-2. – С. 681-688.
7. Бердышева, Ю. А. Методические подходы к оценке эффектов от организации скоростного движения / Ю. А. Бердышева, М. Е. Корягин // Финансовые рынки и банки. – 2026. – № 2. – С. 206-209.
8. Бердышева, Ю. А. К вопросу оценки качества пассажирских перевозок на железной дороге / Ю.А. Бердышева, Е. А. Жаркова // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения: Гуманитарные исследования. – 2020. – № 2 (8). – С. 5-9.
9. Бердышева, Ю. А. Премедитатное исключение в пассажирских железнодорожных перевозках: экономический аспект / Ю. А. Бердышева // Вопросы новой экономики. – 2023. – № 2(66). – С. 29-38.
10. Wilson, A. G. A statistical theory of spatial distribution models // Transportation research. – 1967. – Т. 1. – №. 3. – С. 253-269. – URL: https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2492567 (дата обращения: 12.09.2020).

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617548 Российская Федерация. Программа для расчета пассажиропотока при скоростном движении «Стрела-XXI»: № 2024616257: заявл. 27.03.2024: опубл. 03.04.2024 / Ю. А. Бердышева, М. Е. Корягин; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».