

О.К. Бегимбетов<sup>1</sup>, А.Т. Нурсейтова<sup>2\*</sup>, Т.Т. Болтайханова<sup>3</sup>,  
К.Б. Тармышов<sup>4</sup>, Г.Т. Тургумбаева<sup>5</sup>

<sup>1</sup>РГП «Институт информационных и вычислительных технологий» КН МНВО РК, г.Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>TOO Astana IT University, г.Астана, Казахстан

<sup>3</sup>ТОО ҚазМұнайГаз Инжиниринг, г.Астана, Казахстан

<sup>4</sup>Независимый исследователь, г.Мюнхен, Германия

<sup>5</sup>НАО Карагандинский Индустриальный Университет, г.Темиртау, Казахстан

\*e-mail: [a.nurseitova@astanait.edu.kz](mailto:a.nurseitova@astanait.edu.kz)

## СТРАТЕГИЯ МАКСИМИЗАЦИИ ПАССАЖИРООБОРОТА НА СОЦИАЛЬНО ЗНАЧИМЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАРШРУТАХ В УСЛОВИЯХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ТАРИФОВ

### Аннотация

В статье рассматриваются методы повышения эффективности использования провозной емкости пассажирских поездов дальнего следования, функционирующих в условиях государственного регулирования тарифов. В отличие от классических систем управления доходами, основанных на динамическом ценообразовании, социально значимые железнодорожные перевозки ограничены фиксированными тарифами и не могут использовать ценовые механизмы для регулирования спроса. В этих условиях основным инструментом повышения эффективности становится интеллектуальное управление распределением мест между различными корреспонденциями Origin–Destination (O&D). Предлагается комплексная методология управления емкостью, основанная на классификации поездов по уровню населенности, сегментации маршрутов по их вкладу в пассажирооборот, применении виртуальной вложенности (Virtual Nesting), восстановлении скрытого спроса и технологии маршрутного сшивания (Route Splicing). Разработаны алгоритмы управления для пяти категорий поездов в зависимости от прогнозируемого коэффициента населенности. Проведен эмпирический анализ на реальных данных АО «Пассажирские перевозки» (Казахстан) за период 2022–2025 гг. и имитационное моделирование, демонстрирующее потенциальное увеличение пассажирооборота на 6–12% по сравнению с базовым методом статического квотирования. Показано, что максимизация пассажирооборота может позволить повысить эффективность использования субсидируемых перевозок без изменения тарифной политики.

**Ключевые слова:** пассажирские перевозки, железнодорожный транспорт, управление доходами, пассажирооборот, O&D-модель, провозная емкость, Virtual Nesting, Route Splicing, социально значимые маршруты.

О.К. Бегимбетов<sup>1</sup>, А.Т. Нурсейтова<sup>2\*</sup>, Т.Т. Болтайханова<sup>3</sup>, К.Б. Тармышов<sup>4</sup>, Г.Т. Тургумбаева<sup>5</sup>

<sup>1</sup>ҚР ҒЖБМ ҒК Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Astana IT University ЖШС, Астана қ., Қазақстан

<sup>3</sup>ҚазМұнайГаз Инжиниринг ЖШС, Астана қ., Қазақстан

<sup>4</sup>Тәуелсіз зерттеуші, Мюнхен қ., Германия

<sup>5</sup>Қарағанды индустриялық университеті КЕАҚ, Теміртау қ., Қазақстан

## БЕЛГІЛЕНГЕН ТАРИФТЕР ЖАҒДАЙЫНДА ӘЛЕУМЕТТІК МАҢЫЗЫ БАР ТЕМІРЖОЛ БАҒЫТТАРЫНДАҒЫ ЖОЛАУШЫЛАР АЙНАЛЫМЫН БАРЫНША МАКСИМИЗАЦИЯЛАУ СТРАТЕГИЯСЫ

### Аңдатпа

Мақалада мемлекеттік тарифтік реттеу жағдайында жұмыс істейтін алыс қашықтыққа қатынайтын жолаушылар пойыздарының тасымалдау сыйымдылығын пайдалану тиімділігін арттыру әдістері қарастырылады. Динамикалық баға белгілеуге негізделген дәстүрлі кірістерді басқару жүйелерінен

(Revenue Management) айырмашылығы – әлеуметтік маңызы бар теміржол тасымалдары белгіленген (бекітілген) тарифтермен шектеледі, сондықтан сұранысты реттеу үшін баға механизмдерін қолдана алмайды. Бұл жағдайда тиімділікті арттырудың негізгі құралы – түрлі жөнелту-межелі пункттер (Origin–Destination / O&D) арасында орындарды бөлуді интеллектуалды басқару болып табылады. Жұмыста пойыздарды толығы деңгейі бойынша жіктеуге, бағыттарды олардың жолаушылар айналымына қосатын үлесіне қарай сегменттеуге, виртуальды ұяшықтау (Virtual Nesting) әдісін қолдануға, жасырын сұранысты қалпына келтіруге және бағыттарды түйістіру (Route Splicing) технологиясына негізделген сыйымдылықты басқарудың кешенді әдістемесі ұсынылады. Жоспарланатын толығы коэффициентіне байланысты пойыздардың бес санаты үшін басқару алгоритмдері әзірленді. «Жолаушылар тасымалы» АҚ-ның (Қазақстан) 2022–2025 жылдар аралығындағы нақты деректері негізінде эмпирикалық талдау және имитациялық модельдеу жүргізілді. Нәтижесінде, статикалық квоталаудың базалық әдісімен салыстырғанда, жолаушылар айналымын 6–12%-ға арттырудың потенциалды мүмкіндігі көрсетілді. Жолаушылар айналымын барынша арттыру (максимизациялау) тарифтік саясатты өзгертпей-ақ, субсидияланатын тасымалдарды пайдалану тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік беретіні дәлелденді.

**Түйін сөздер:** жолаушылар тасымалы, теміржол көлігі, кірістерді басқару, жолаушылар айналымы, O&D-модель, тасымалдау сыйымдылығы, виртуальды ұяшықтау (Virtual Nesting), бағыттарды түйістіру (Route Splicing), әлеуметтік маңызы бар бағыттар.

O.K. Begimbetov<sup>1</sup>, A.T. Nurseitova<sup>2</sup>, T.T. Boltaikhanova<sup>3</sup>, K.B. Tarmyshov<sup>4</sup>, G.T. Turgumbayeva<sup>5</sup>

<sup>1</sup>International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Astana IT University LLC, Astana, Kazakhstan

<sup>3</sup>KazMunayGas Engineering LLP, Astana, Kazakhstan

<sup>4</sup>Independent Researcher, Munich, Germany

<sup>5</sup>Karaganda Industrial University NJSC, Temirtau, Kazakhstan

## PASSENGER TURNOVER MAXIMIZATION STRATEGY FOR SOCIALLY SIGNIFICANT RAILWAY ROUTES UNDER DETERMINISTIC TARIFFS

### Abstract

This article examines methods for enhancing the capacity utilization efficiency of long-distance passenger trains operating under state-regulated tariffs. Unlike traditional revenue management systems based on dynamic pricing, socially significant passenger rail services are constrained by fixed tariffs and cannot employ price mechanisms to regulate demand. Under these conditions, intelligent management of seat allocation across various Origin–Destination (O&D) city pairs becomes the primary instrument for increasing operational efficiency. We propose a comprehensive capacity management methodology based on train classification by occupancy level, route segmentation by contribution to passenger turnover, application of Virtual Nesting, unconstrained demand estimation, and Route Splicing technology. Control algorithms were developed for five train categories based on predicted load factors. An empirical analysis using real-world operational data from JSC "Passenger Transportation" (Kazakhstan) for the 2022–2025 period, combined with simulation modeling, demonstrates a potential 6–12% increase in passenger turnover compared to the baseline static bucket allocation method. The findings show that maximizing passenger turnover can improve the efficiency of subsidized rail operations without altering existing tariff policies.

**Keywords:** passenger transportation, railway transport, revenue management, passenger turnover, O&D model, carrying capacity, Virtual Nesting, Route Splicing, socially significant routes.

### Введение

Управление доходами (Revenue Management) является одним из ключевых инструментов повышения эффективности транспортных компаний. Концепция управления доходами исторически сформировалась в авиационной индустрии и базировалась на трех фундаментальных столпах: динамическом ценообразовании, распределении емкости и структурных решениях сети [1]. Однако экстраполяция классических моделей на сектор пассажирских железнодорожных перевозок требует существенной концептуальной адаптации, особенно когда речь идет о социально значимых перевозках, субсидируемых государством в рамках обязательств по общественному обслуживанию (Public Service

Obligation, PSO) [2]. В подобных условиях железнодорожный оператор оперирует в парадигме жестко зафиксированного тарифа, который не может выступать инструментом регулирования спроса [3]. В контексте протяженных маршрутов (до 50 станций и времени в пути до 48 часов), характерных для географии Казахстана, ключевой операционной проблемой становится фрагментация провозной емкости. Железнодорожный транспорт обладает уникальной сетевой топологией: один рейс представляет собой сложную матрицу возможных корреспонденций Origin & Destination (O&D). В поезде, проходящем 50 станций, формируется теоретическое множество из 1225 возможных пар станций отправления и назначения. Каждая такая пара представляет собой отдельную корреспонденцию Origin–Destination, конкурирующую за ограниченную провозную емкость поезда. Пассажир, приобретающий билет на короткий промежуточный отрезок, физически изымает место из инвентарной базы на всем протяжении маршрута поезда. Если спрос на дальние поездки, пересекающие данный короткий участок, высок, оператор сталкивается с феноменом вытеснения или упущенного спроса (Spill). Одновременно на участках до посадки локального пассажира и после его высадки возникает эффект потери емкости (Spoilage) — места следуют абсолютно пустыми из-за искусственной блокировки сквозного проезда [4].

В данной работе проверяются следующие гипотезы:

1. При фиксированных тарифах географическая вложенность эффективнее временных квот.
2. Восстановление нецензурированного спроса значительно повышает пассажирооборот (RPK).
3. Технология маршрутного сшивания эффективна при уровне загрузки Network Load Factor (NLF– сетевой коэффициент населенности) > 80%.

### **Методология исследования**

#### *Международный опыт управления провозной емкостью*

Для формирования жизнеспособной модели оптимизации в условиях ручного управления необходимо детально проанализировать эволюцию систем резервирования.

*Специфика и ограничения наследия СНГ: Казахстан и Россия.* Железнодорожные администрации государств-участников Содружества Независимых Государств (СНГ), включая Казахстан и Российскую Федерацию, исторически оперируют в едином технологическом стандарте, заданном регламентами Организации сотрудничества железных дорог (ОСЖД) и межправительственными соглашениями [5]. Технологическим ядром управления пассажирскими перевозками выступают автоматизированные системы управления (АСУ) семейства «Экспресс». Традиционная парадигма управления емкостью в этих системах базируется на механизме так называемых «станционных трафаретов» или жестких физических квот. Суть этого подхода заключается в априорном разделении общей вместимости поезда на фиксированные блоки, которые жестко закрепляются за крупными узловыми станциями по маршруту следования [5]. Фундаментальный недостаток системы жесткого квотирования заключается в ее неспособности адаптироваться к стохастической природе спроса. Если спрос на станции отправления превышает квоту, пассажиры получают отказ (Spill), в то время как квота промежуточной станции может оставаться невыкупленной. В результате эти места следуют пустыми от начальной станции до транзитной (Spoilage) [4]. Хотя современные итерации систем бронирования в СНГ внедряют элементы логической доступности и переменного трафарета, управление сложными социально значимыми маршрутами с 40–50 остановками по-прежнему требует интенсивного ручного вмешательства аналитиков [5].

*Опыт операторов Европейского Союза.* Европейский рынок пассажирских перевозок представляет собой сложный конгломерат коммерческих (дерегулированных) и социально значимых (субсидируемых) маршрутов. Как показывает анализ шведского опыта, на дерегулированных рынках распределение пропускной способности инфраструктуры между операторами может базироваться на аукционных механизмах и оценке готовности платить, однако для субсидируемых сегментов основным критерием остается социальный анализ

затрат и выгод [6]. Оценка экономической ценности конкретного поезда или маршрута представляет значительную сложность даже для самой железнодорожной компании [7]. Наиболее релевантным примером технологического преодоления проблемы фиксированных тарифов является внедрение Системы управления доходами (Yield Management System) итальянским национальным оператором Trenitalia в сотрудничестве с корпорацией IBM [8]. Система, управляющая инвентарем для более чем 10 миллионов пассажиров и обрабатывающая свыше 120 миллиардов решений об аллокации мест, базируется на двухэтапной стохастической модели [8]. Ввиду наличия кластерной структуры фиксированных семейств тарифов система Trenitalia не может бесконечно варьировать цены. Вместо этого она прогнозирует неконсолидированный (unconstrained) спрос с использованием аддитивных методов коррекции и оптимизирует распределение провозной емкости по каждой паре O&D на протяжении всего горизонта бронирования. Важнейшим элементом является использование техники частичной вложенности (partial nesting) O&D [8].

*Североамериканский опыт.* Американский оператор дальнего следования Amtrak оперирует в условиях, схожих с казахстанскими: огромные расстояния, множество промежуточных остановок и жесткая конкуренция с другими видами транспорта. Управление инвентарем в Amtrak сфокусировано на минимизации двух упомянутых ранее рисков: потери емкости и упущенного спроса [4]. Ключевым аналитическим сдвигом в практике Amtrak стал отказ от использования традиционного коэффициента загрузки (Load Factor, процент проданных мест) в качестве главной метрики успеха. Данный показатель признан обманчивым, так как полная посадка на коротком плече маскирует пустоту на остальном протяжении маршрута. Вместо этого фокус смещен на метрику T-RASM (Ticket Revenue per Available Seat-Mile) – выручку от билетов на доступную кресло-милю [4]. В контексте неизменного тарифа, привязанного к расстоянию, максимизация T-RASM математически эквивалентна максимизации произведенных пассажиро-километров [4].

*Азиатский вектор.* Опыт японских высокоскоростных железных дорог (Shinkansen) демонстрирует альтернативный подход, при котором доходность максимизируется не только управлением продажами, но и управлением самой физической емкостью. В отличие от авиации, где размер самолета фиксирован, железнодорожная отрасль позволяет добавлять емкость дискретными «кусками» (вагонами) в зависимости от кривой накопления спроса [9]. Исследования показывают, что совместная оптимизация ценообразования и пропускной способности имеет принципиальное значение. В условиях, когда изменение цен невозможно, японские операторы применяют политику гибкой емкости (flexible capacity), адаптируя длину состава под прогнозируемые транзитные потоки [1]. Разработанные математические модели показывают, что такие стратегии асимптотически оптимальны и масштабируются пропорционально росту спроса [9].

*Прогнозирование спроса на железнодорожные билеты в Казахстане.* Важным направлением исследований в области управления пассажирскими перевозками является прогнозирование спроса на железнодорожные билеты. В работе [10] проведен сравнительный анализ методов прогнозирования спроса на основе исторических данных о продажах билетов в Казахстане за период 2021–2023 гг. Исследование охватывает 55 корреспонденций Origin-Destination (O&D) и использует данные, предоставленные билетным агентом Nur-Kassa LLP. Авторы рассматривают четыре класса моделей: ARIMA (AutoRegressive Integrated Moving Average) – классический статистический метод для прогнозирования временных рядов; SARIMAX (Seasonal ARIMA with exogenous variables) – расширение ARIMA, учитывающее сезонность и внешние факторы; LSTM (Long Short-Term Memory) – рекуррентная нейронная сеть, способная моделировать долгосрочные зависимости в данных; CNN (Convolutional Neural Network) – сверточная нейронная сеть, применяемая для прогнозирования всей O&D-матрицы как единого 3D-массива, где каждый элемент представляет пассажиропоток между станцией отправления и станцией назначения. Ключевой результат исследования заключается в том, что CNN-модель, учитывающая пространственные взаимосвязи между различными O&D-парами (общие маршруты, транзитные узлы), демонстрирует наилучшую точность прогнозирования. Значения средней абсолютной ошибки (MAE) для CNN составили 3.583 в первом тестовом сценарии (ноябрь–декабрь 2022 г.) и 3.111 во втором (сентябрь 2022 г. – август 2023 г.), что существенно ниже показателей ARIMA, SARIMAX и LSTM [10]. Полученные результаты имеют прямое отношение к методологии, предлагаемой в настоящей статье. Во-первых, прогнозирование спроса на уровне отдельных O&D пар является необходимым условием для установления уровней защиты (Protection

Levels) в рамках виртуальной вложенности (Virtual Nesting). Во-вторых, способность CNN-модели учитывать взаимосвязи между корреспонденциями открывает возможности для построения более точных прогнозов секционной населенности (SLF) и, следовательно, более эффективного применения технологии сшивания маршрутов (Route Splicing). В-третьих, горизонтальная ось прогнозирования (количество дней до отправления) в работе [10] коррелирует с хронологией управленческих решений (D-45, D-30, D-14, D-7, D-3, D-1). Здесь и далее нотация D-N означает количество дней до даты отправления поезда: например, D-45 соответствует 45-му дню до отправления, а D-0 — дню отправления. Это позволяет интегрировать прогнозные модели в разработанный алгоритм управления провозной емкостью.

#### *Концепция максимизации пассажирооборота*

При фиксированных тарифах эффективность работы поезда определяется не количеством перевезенных пассажиров, а объемом выполненной транспортной работы.

*Целевая функция.* В качестве основной целевой функции предлагается использовать показатель пассажирооборота (Revenue Passenger Kilometers, RPK)[4]:

$$RPK = \sum_{i=1}^n Pax_i \cdot Distance_i \quad (1)$$

где  $Pax_i$  — количество пассажиров по  $i$ -й корреспонденции,  $Distance_i$  — расстояние поездки.

Максимизация показателя RPK является главной целью управления.

*Доступная провозная емкость.* Доступная провозная емкость (Available Seat Kilometers, ASK) представляет собой меру предложенного рынку объема услуг с учетом физической длины маршрута [4]:

$$ASK = TotalSeats \times TotalRouteDistance, \quad (2)$$

где  $TotalSeats$  — общая вместимость поезда (количество мест),  $TotalRouteDistance$  — протяжённость всего маршрута (км).

*Сетевой коэффициент населенности.* Сетевой коэффициент населенности (NLF) отражает пространственную утилизацию поезда в отличие от обманчивого процента проданных билетов [4]:

$$NLF = \frac{RPK}{ASK}, \quad (3)$$

где RPK и ASK — показатели, определённые формулами (1) и (2) соответственно.

*Секционная населенность.* Для анализа распределения пассажиропотока по отдельным участкам маршрута используется показатель секционной населенности (Sectional Load Factor, SLF). В отличие от NLF, характеризующего использование провозной емкости на протяжении всего маршрута, показатель SLF отражает степень заполнения поезда на каждом отдельном перегоне между соседними станциями.

SLF для каждого перегона рассчитывается как отношение количества пассажиров, следующих по данному перегону, к общей вместимости поезда:

$$SLF_{leg} = \frac{Pax_{on\_leg}}{Seats_{total}}, \quad (4)$$

где  $Pax_{on\_leg}$  — количество пассажиров, следующих через данный перегон,

$Seats_{total}$  — общая вместимость поезда.

#### *Классификация корреспонденций.*

Для управления спросом все корреспонденции предлагается разделять на три группы на основе их вклада в общий пассажирооборот (Таблица 1).

Таблица 1. Классификация O&amp;D корреспонденций

| Категория                          | Определение            | Стратегическое значение                                                                                            |
|------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Магистральные (Long-haul O&D)      | >75% длины маршрута    | Фундаментальное ядро генерации RPK, наивысший приоритет, устанавливаются жесткие уровни защиты (Protection Levels) |
| Среднемагистральные (Mid-haul O&D) | 35%–75% длины маршрута | Формируют базовую экономическую загрузку поезда                                                                    |
| Локальные (Shorthaul O&D)          | <35% длины маршрута    | Критическая угроза для NLF, подлежат жесткому квотированию на ранних этапах продаж                                 |

Обоснование порогов классификации рейсов. Пороги классификации рейсов по NLF (50%, 65%, 80%, 90%) являются экспертными значениями, основанными на следующем эмпирическом анализе исторических данных:

1. Анализ распределения NLF: на основе данных по 2190 рейсам за 2022–2025 гг. построено распределение NLF, выявившее естественные кластеры в окрестностях указанных порогов. Распределение имеет колоколообразную форму с пиком в диапазоне 65–80%.

2. Анализ кривых бронирования: Для каждого порогового значения проанализирована форма кривой накопления продаж. Рейсы с NLF < 50% демонстрируют аномально низкие темпы продаж на всем горизонте бронирования. Рейсы с NLF > 90% характеризуются практически линейным выкупом с ранним насыщением.

3. Сопоставление с международной практикой: Используемые пороги согласуются с классификациями, применяемыми в системах управления доходами Amtrak и Trenitalia [4, 8].

4. Практическая управляемость: Количество категорий (5) и их границы выбраны так, чтобы обеспечить различный набор управляющих воздействий для каждой категории, избегая избыточной детализации.

Методология управления емкостью

Виртуальная вложенность (Virtual Nesting). Основой предлагаемого подхода является концепция виртуальной вложенности, адаптированная к условиям фиксированных тарифов. При управлении поездами аналитик должен реализовывать логику «ограждения» инвентаря (fare fencing), переложенную с ценовых классов на географические расстояния [8]. Магистральные плечи формируют высший Класс 1. Среднемагистральные отнесены к Классу 2. Локальные образуют Класс 3. Принцип виртуальной вложенности диктует иерархию доступа: провозная емкость, выделенная для Класса 3, также прозрачно доступна для Классов 1 и 2. Однако емкость, защищенная для Класса 1 (Protection Level), абсолютно недоступна для пассажиров Классов 2 и 3 [8].

Пример распределения мест по виртуальным классам бронирования и соответствующая динамика емкостей приведены в таблице 2.

Таблица 2. Пример распределения мест при виртуальной вложенности

| Класс                | Базовый пул | Защищенный уровень | Доступность для классов |
|----------------------|-------------|--------------------|-------------------------|
| Класс 1 (Long-haul)  | 200         | 80                 | Только Класс 1          |
| Класс 2 (Mid-haul)   | 180         | 40                 | Классы 1, 2             |
| Класс 3 (Short-haul) | 120         | -                  | Классы 1, 2, 3          |

В условиях устаревших систем типа «Экспресс» эта логика эмулируется через физическое выделение определенных вагонов исключительно под транзитный поток.

*Адаптация эвристики ожидаемого предельного пассажирооборота.* В классической модели EMSR (Expected Marginal Seat Revenue) сравниваются доходы. В нашей модели сравниваются ожидаемые приросты пассажиро-километров:

$$E(\Delta RPK_{long}) = Distance_{long} \times P(D_{long} > x) \quad (5)$$

где  $Distance_{long}$  – физическая длина магистрального маршрута,  $P(D_{long} > x)$  – вероятность того, что спрос на магистральный маршрут превысит количество уже защищенных мест  $x$ ,  $D_{long}$  – случайная величина спроса на магистральный маршрут. Продажа на локальное плечо должна быть заблокирована, пока справедливо неравенство:

$$Distance_{short} < Distance_{long} \times P(D_{long} > x) \quad (6)$$

где  $Distance_{short}$  – физическая длина локального (short-haul) участка маршрута.

Поскольку длина полного маршрута в поездах на 40–50 станций часто в 15–20 раз превосходит локальный перегон, математика неумолимо требует жесткой защиты мест для дальних поездок даже при крайне низкой вероятности их реализации [8].

*Восстановление истинного спроса.* Фундаментальной ошибкой аналитиков является отождествление исторических данных о продажах с реальным историческим спросом. Если в прошлом году все места в поезде были проданы, система покажет спрос, равный вместимости, тогда как реальный спрос мог быть существенно выше. Попытка базировать уровни защиты на цензурированных (обрезанных вместимостью) данных приводит к занижению квот для дальних пассажиров и эффекту нисходящей спирали (spiral-down effect) [8]. Для корректной работы необходимо восстанавливать неконсолидированный спрос с использованием методов децензурирования: мониторинг отказов в системе резервирования, анализ кривой бронирования (Booking Curve), экстраполяция темпов продаж до даты отправления [8].

*Технология маршрутного сшивания (Route Splicing).* Одной из самых продвинутых техник ручного управления при высоком NLF является контроль идеальных стыковок. Если аналитический мониторинг показывает формирование устойчивого разрыва спроса на средней станции маршрута, аналитик применяет сшивание. На маршруте от станции А до станции Z при исторически сильном спросе на участках А–М и М–Z аналитик разрешает продажу комбинации А–М и М–Z как двух независимых бронирований на одно физическое место. Количественный пример работы технологии маршрутного сшивания: рассмотрим поезд вместимостью 500 мест на маршруте А–Z (1190 км) с точкой разрыва М на 600 км от А. Тогда расчёт RPK для базового сценария и после сшивания будут соответственно:

$$RPK = 200 \times 1190 + 50 \times 600 + 30 \times 590 = 238000 + 30000 + 17700 = 285700$$

$$RPK^* = 200 \times 1190 + 100 \times 600 + 80 \times 590 = 238000 + 60000 + 47200 = 345200$$

Результаты расчета эффекта от внедрения технологии маршрутного сшивания приведены в таблице 3.

Таблица 3. Пример расчета эффекта технологии маршрутного сшивания

| Показатель       | Базовый сценарий | После сшивания | Изменение |
|------------------|------------------|----------------|-----------|
| Пассажиры А–Z    | 200              | 200            | 0         |
| Пассажиры А–М    | 50               | 100            | +50       |
| Пассажиры М–Z    | 30               | 80             | +50       |
| Итого пассажиров | 280              | 380            | +100      |
| RPK, км          | 285 700          | 345 200        | +59 500   |

Прирост RPK составляет 20.8% при сохранении неизменной вместимости поезда.

Алгоритм управления. Предлагаемый алгоритм управления провозной емкостью представлен в виде псевдокода на алгоритме 1.

#### Алгоритм 1. Алгоритм управления провозной емкостью

**Algorithm 1** Алгоритм управления провозной емкостью

**Require:** *train* — информация о поезде, *forecast\_nlf* — прогноз NLF

**Ensure:** Распределение мест по O&D-классам

```

1: category  $\leftarrow$  ClassifyByNLF(forecast_nlf)
2: protection_levels  $\leftarrow$   $\emptyset$ 
3: splicing_candidates  $\leftarrow$   $\emptyset$ 
4: if category = 1 then                                     ▷ NLF < 50%
5:   Разрешить продажу на все O&D без ограничений
6:   Рассмотреть отцепку вагонов
7: else if category = 2 then                                 ▷ 50% ≤ NLF < 65%
8:   Блокировать продажи на участки < 3 станций в радиусе 100 км от крупных городов
9:   Построить SLF-профиль на D-20
10:  Закрыть локальные O&D на дефицитных перегонах на D-10
11: else if category = 3 then                                   ▷ 65% ≤ NLF < 80%
12:  protection_levels  $\leftarrow$  CalculateProtectionLevels(forecast_demand)
13:  Применить виртуальную вложенность
14:  if booking_pace > historical_norm на D-25 then
15:    Расширить пул защиты
16:  end if
17:  Сбросить нереализованные остатки на D-4..D-1
18: else if category = 4 then                                   ▷ 80% ≤ NLF < 90%
19:  Блокировать все локальные перегоны (< 35% маршрута)
20:  protection_levels  $\leftarrow$  CalculateProtectionLevels(forecast_demand)
21:  Открыть изолированные перегоны на D-30
22:  Постепенно открывать mid-haul на D-9..D-6
23: else if category = 5 then                                   ▷ NLF ≥ 90%
24:  Запросить дополнительные вагоны на D-45
25:  Установить Protection Level 75–80% для long-haul
26:  splicing_candidates  $\leftarrow$  FindSplicingCandidates(SLF_profile)
27:  Применить технологию маршрутного сшивания на D-14
28: end if
29: return (protection_levels, splicing_candidates)

```

#### Дифференцированное управление в зависимости от уровня загрузки

Исторический и прогнозируемый уровни загрузки определяют агрессивность стратегии ограждения инвентаря (fencing). Предлагается выделять пять категорий поездов по прогнозируемому коэффициенту населенности NLF.

**Категория 1: Депрессивная населенность (NLF < 50%).** Хронический дефицит пассажиров на всем протяжении маршрута, отсутствие выраженных пиков. Приоритет – минимизация потери емкости. Полное отсутствие логических ограничений по O&D. Цель – захват любого доступного платежеспособного спроса. Рассмотрение вопроса о физическом сокращении составности (отцепке вагонов) [4]. Хронология действий аналитика:

1. *D-45 (Открытие продаж):* Полное снятие всех системных ограничений, трафаретов и квот. Продажа разрешена на любые мыслимые комбинации O&D.

2. *D-15 до D-8:* Оценка кривой накопления бронирований. При низких темпах продаж вмешательство запрещено.

3. *D-7 до D-2:* Пассивное наблюдение. При превышении 70% выкупа на любом O&D – перевод в Категорию 2.

**Категория 2: Разбалансированная населенность (NLF = 50%– 65%).** Поезд располагает достаточным общим резервом мест, однако на некоторых перегонах вблизи крупных агломераций формируются локальные пики спроса. Хронология действий:

1. D-45: Наложение превентивных мягких ограничений. Блокировка продаж на короткие пригородные участки (менее 3 станций) в радиусе 100 км от крупных городов.

2. D-20: Построение графика секционной населенности (SLF) по каждому перегону.

3. D-10: Заккрытие продаж на локальные O&D в зоне дефицитного перегона.

4. D-3: Полное снятие всех ограничений. Оставшаяся емкость отдается локальному спросу.

*Категория 3. Стабильная населенность (NLF = 65%–80%).* Устойчивый спрос с регулярными периодами конкуренции между пассажирами различной дальности следования. Классический полигон для виртуальной вложенности. Хронология действий:

1. D-45: Защита мест (Protection Level) для запросов с протяженностью более 65% маршрута на основе восстановленного спроса [8].

2. D-25: Анализ скорости выкупа магистральных плеч. При опережении нормы — расширение пула защиты.

3. D-10: Блокировка продаж на участки короче 10 станций, пересекающих центры транзитного потока. 4. D-4 до D-1: Сброс нереализованных остатков из защищенного пула в общий инвентарь.

*Категория 4: Дефицитная населенность (NLF = 80%–90%).* Состояние постоянной нехватки провозной способности. Риск вытеснения высокодоходных длинных O&D достигает критических значений. Хронология действий:

1. D-45: Экстремально жесткое разделение инвентаря. Локальные перегоны (короче 35% маршрута) тотально блокируются.

2. D-30: Ревизия образовавшихся «дыр» в инвентаре. Открытие продаж на изолированные пустые перегоны.

3. D-20 до D-10: Расширение пула защиты при опережении темпов продаж.

4. D-9 до D-6: Постепенное открытие продаж на среднемагистральные участки.

5. D-5 до D-3: Абсолютное снятие всех блокировок («Правило последних 24 часов») [4].

*Категория 5: Экстремальная населенность (NLF > 90%).* Сверх пиковый спрос (национальные праздники, летние отпуска). Поезд гарантированно будет продан на 100%. Хронология действий:

1. D-45: Запрос на физическое масштабирование состава (прицепка дополнительных вагонов) [1]. Установление режима диктатуры магистральных продаж (ограждение до 75–80%).

2. D-14: Продажа непроданных мест исключительно через технологию маршрутного сшивания.

3. D-3: Финальная распродажа изолированных коротких перегонов локальным пассажирам.

Категоризация поездов и соответствующие им стратегии управления детально систематизированы в таблице 4.

Таблица 4. Сводная таблица категорий поездов и стратегий управления

| № | Категория          | NLF     | Базовая парадигма управления емкостью                                      |
|---|--------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Депрессивная       | <50%    | Приоритет минимизации потери емкости, полное отсутствие ограничений по O&D |
| 2 | Разбалансированная | 50%–65% | Точечная интервенция, легкие ограничения на локальных перегонах            |
| 3 | Стабильная         | 65%–80% | Классическая балансировка, виртуальная вложенность                         |
| 4 | Дефицитная         | 80%–90% | Агрессивное ограждение, жесткая блокировка локальных продаж                |
| 5 | Экстремальная      | >90%    | Стратегическое планирование, технология маршрутного сшивания               |

### Результаты исследования

*Эмпирический анализ исторических данных.* Для проверки предпосылок предложенной методологии проведен анализ исторических данных АО «Пассажирские перевозки» (Казахстан) по четырем поездкам дальнего следования: магистральным 109X/110X (маршрут Актобе - Мангистау, протяженность 1190 км) и сезонным 631X/632T (Атырау - Дины Нурпеисовой, 283 км). Период покрытия данных: 2022-2025 гг. Общий объем обработанных записей – 1063 192 строки продаж. Разработана система материализованных представлений (materialized views) для поэтапной очистки и агрегации данных.

Очистка данных и восстановление реального пассажиропотока. Критической проблемой исходных данных является наличие у одного билета как confirmed-строки (при покупке), так и refunded-строки (при возврате). Простой фильтр WHERE status\_id = 2 оставлял 168 530 «зомби-подтверждений» – билетов, учтенных в пассажирообороте, но фактически возвращенных. Разработан слой данных mv\_sales\_traveled, реализующий правило: билет считается проехавшим, если существует confirmed-строка и отсутствует refunded-строка по тому же ticket\_number:

```
SELECT s.*
FROM mv_sales_clean s
WHERE s.status_id = 2
AND NOT EXISTS (
    SELECT 1 FROM mv_sales_clean r
    WHERE r.ticket_number = s.ticket_number AND r.status_id = 1
);
```

Результаты очистки представлены в таблице 5.

Таблица 5. Очистка данных

| Слой              | Строк   | Что удалено        |
|-------------------|---------|--------------------|
| sales (raw)       | 1063192 |                    |
| mv_sales_clean    | 995465  | 67727 ETL-дублей   |
| mv_sales_traveled | 658361  | 337104 зомби-строк |

Физическая валидация очистки проведена через проверку: на одном физическом месте за один рейс сумма distance\_km всех проехавших билетов не должна превышать route\_km. Результат: 99.984% мест прошли проверку (88 нарушений на 555 511 рейсовых мест).

*Базовые показатели.* Расчет RPK выполнен по формуле (1). Расчет ASK выполнен с учетом per-departure составности по формуле (2). Ключевое решение: состав поезда меняется день-ко дню (от 1 до 13 вагонов на магистралях), поэтому ASK рассчитывается для каждого рейса индивидуально. NLF рассчитан по формуле (3). Результаты по поездкам представлены в таблице 6.

Таблица 6. Базовые показатели по поездкам

| Поезд | Рейсов | NLF, % | RPK, млн | ASK, млн |
|-------|--------|--------|----------|----------|
| 109X  | 995    | 66.7   | 235.4    | 352.9    |
| 110X  | 957    | 68.9   | 244.6    | 355.2    |
| 631X  | 139    | 76.3   | 4.7      | 6.1      |
| 632X  | 139    | 77.8   | 4.8      | 6.1      |

*Классификация рейсов по 5 категориям.* На основе расчетного NLF рейсы распределены по пяти категориям согласно порогам, определенным в разделе 5. Результаты представлены в таблице 7.

Таблица 7. Распределение рейсов по категориям NLF

| № | Категория          | NLF     | Рейсов | Доля, % | РПК, млн |
|---|--------------------|---------|--------|---------|----------|
| 1 | Депрессивная       | <50%    | 364    | 16.6    | 39.8     |
| 2 | Разбалансированная | 50%–65% | 491    | 22.4    | 97.4     |
| 3 | Стабильная         | 65%–80% | 690    | 31.5    | 181.0    |
| 4 | Дефицитная         | 80%–90% | 521    | 23.8    | 120.6    |
| 5 | Экстремальная      | >90%    | 124    | 5.7     | 50.6     |

Распределение имеет колоколообразную форму с центром в «Стабильной» категории, что соответствует типичному для социально значимых маршрутов характеру спроса.

6.4 Показатель секционной населенности и потеря емкости. Для расчета SLF на каждом перегоне выполнена реконструкция последовательности станций. В базе данных отсутствует поле «порядок станций», поэтому последовательность восстановлена через MIN (distance\_km) от каждой станции до терминала. Всего восстановлено 64 станции (по 22 на 109X/110X, по 10 на 631X/632Т). Сумма длин перегонов точно совпадает с длиной маршрута (1190/1190/283/283км). Каждый билет занимает место на всех перегонах между origin и destination. SLF на перегоне рассчитан по формуле (4). Анализ SLF-профиля поезда 109X выявил две четкие точки разрыва спроса (Таблица 8).

Таблица 8. SLF-профиль поезда 109X

| Участок                         | Средний SLF     | Значение                 |
|---------------------------------|-----------------|--------------------------|
| Актобе-1 → Кульсары (legs 1–12) | 0.68 → 0.78     | Основной «горб» загрузки |
| Кульсары → Толтыр (leg 13)      | Падение до 0.63 | Первая точка разрыва     |
| Толтыр → Бейнеу (legs 14–16)    | 0.61–0.63       | Средний участок          |
| Бейнеу → Устьюрт (leg 17)       | падениедо0.53   | Вторая точка разрыва     |
| Устьюрт → Шетпе (legs 18–20)    | 0.52–0.53       | Западная половина        |
| Шетпе → Мангистау (leg 21)      | 0.47            | Самый недозагруженный    |

На рисунке 1 представлен SLF-профиль поезда 109X (Актобе–Мангистау) как функция номера перегона. На графике отчетливо видны два характерных участка:

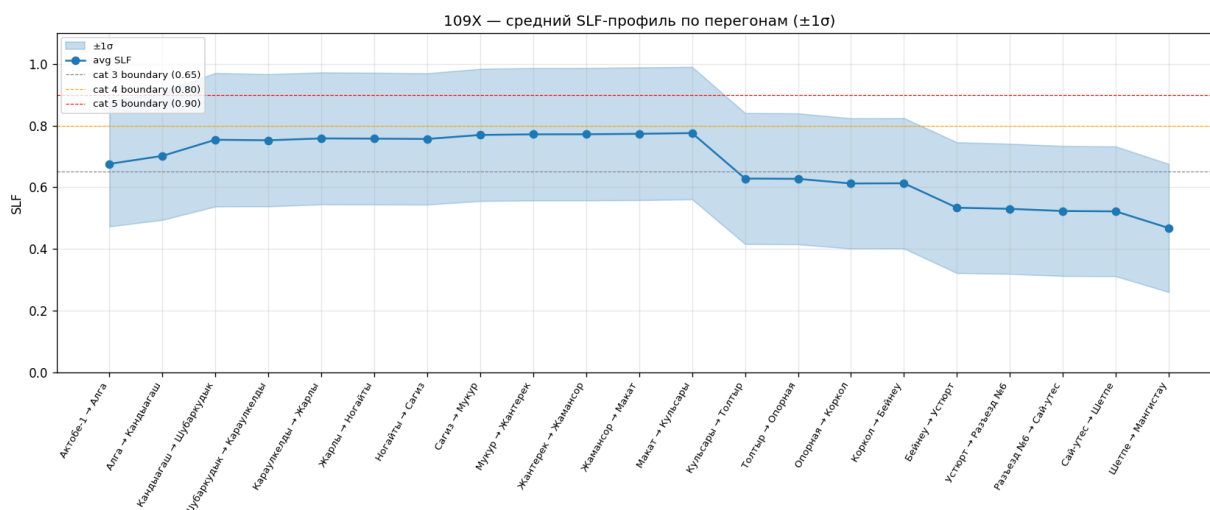


Рисунок 1. SLF-профиль поезда 109X (Актобе–Мангистау)

1. Восточная половина маршрута (legs 1–12): SLF монотонно возрастает от 0.68 до 0.78, формируя устойчивый «горб» загрузки на участке Актобе-1 → Кульсары. Это свидетельствует о стабильном спросе на восточном направлении.

## 2. Две точки разрыва:

- Кульсары → Толтыр (leg 13): SLF падает до 0.63 — первая точка разрыва спроса;
- Бейнеу → Устьюрт (leg 17): SLF падает до 0.53 — вторая точка разрыва.

3. Западная половина маршрута (legs 18–21): SLF продолжает снижаться до 0.47 на перегоне Шетпе → Мангистау, что указывает на существенно более низкий спрос на западном плече маршрута.

Штриховыми линиями показан доверительный интервал  $\pm 1\sigma$ , демонстрирующий устойчивость выявленных закономерностей. Точки разрыва – Кульсары и Бейнеу – являются прямыми кандидатами для применения технологии маршрутного сшивания (раздел *Технология маршрутного сшивания Route Splicing*). Для визуализации временной динамики загрузки перегонов построена тепловая карта SLF поезда 109X (Рис. 2). По оси абсцисс отложены перегоны от Актобе-1 до Мангистау, по оси ординат — даты отправления в хронологическом порядке. Цветовая шкала отражает значение SLF: от темно-синего (SLF = 0) до темно-красного (SLF  $\geq 0.8$ ).

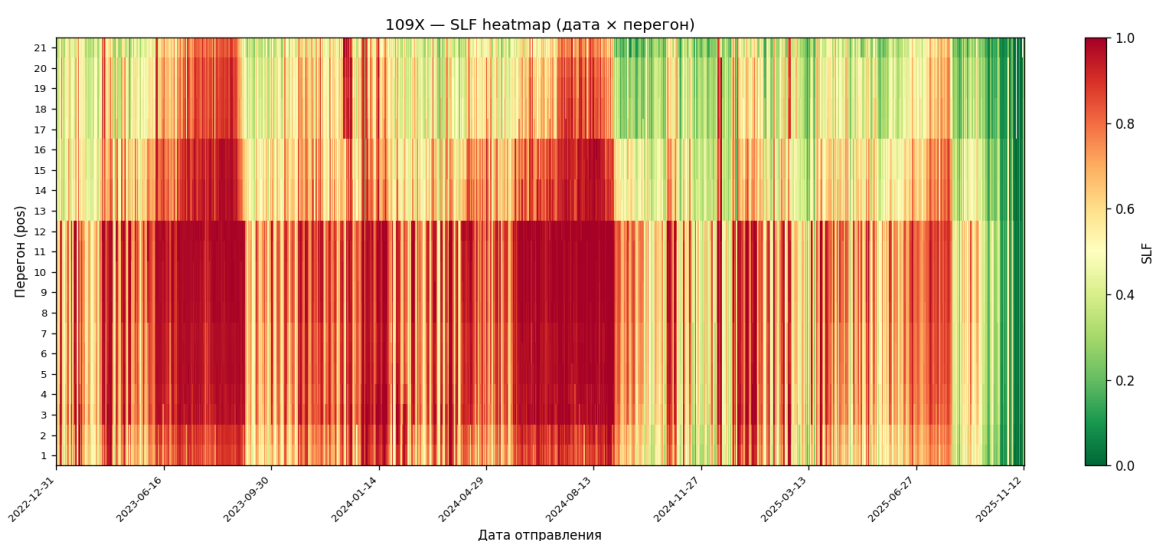


Рисунок 2. Тепловая карта SLF поезда 109X в разрезе дата отправления × номер перегона

Анализ тепловой карты позволяет выделить следующие закономерности:

1. Пространственная структура: Восточная половина маршрута (legs 1-12) на протяжении всего периода наблюдений демонстрирует устойчиво высокую загрузку (красные и оранжевые тона). Западная половина (legs 13-21) характеризуется более низкой и нестабильной загрузкой, особенно на конечных перегонах.

2. Сезонная динамика: В летние месяцы (июль-август 2024) наблюдается пиковая загрузка практически на всем протяжении маршрута. В межсезонье западная половина маршрута переходит в зеленую зону (SLF 0.4-0.6).

3. Тренд 2025 года: Конец 2025 года демонстрирует заметный спад загрузки даже на восточной половине маршрута, что может свидетельствовать о начальных проявлениях эффекта нисходящей спирали.

Тепловая карта подтверждает устойчивость выявленных точек разрыва спроса (legs 13 и 17) во времени и позволяет идентифицировать периоды, когда применение технологии маршрутного сшивания могло бы быть наиболее эффективным. Точки разрыва – Кульсары и Бейнеу – являются прямыми кандидатами для применения технологии маршрутного сшивания. Классификация O&D-корреспонденций по haul-классам представлена в таблице 9. Long-haul доминирует на всех маршрутах, что свидетельствует о фундаментальной роли магистральных корреспонденций в генерации пассажирооборота.

Таблица 9: Распределение RPK по haul-классам

| Поезд | Long-haul (>75%) | Mid-haul (35%–75%) | Short-haul (<35%) |
|-------|------------------|--------------------|-------------------|
| 109X  | 57.7             | 36.8               | 5.5               |
| 110X  | 55.6             | 39.7               | 4.7               |
| 631X  | 91.5             | 8.3                | 0.2               |
| 632T  | 93.1             | 6.7                | 0.2               |

Расчет потери емкости по категориям NLF (Таблица 10) показывает, что 89% общего эффекта потери емкости сосредоточено в категориях 1-3 (NLF < 80%).

Таблица 10. Потеря провозной емкости (Spoilage) по категориям NLF

| № | Категория          | Средний NLF | Доля Spoilage | Млн кресло-км | Доля от общего, % |
|---|--------------------|-------------|---------------|---------------|-------------------|
| 1 | Депрессивная       | 0.366       | 0.635         | 67.3          | 29.2              |
| 2 | Разбалансированная | 0.582       | 0.418         | 69.4          | 30.1              |
| 3 | Стабильная         | 0.725       | 0.275         | 68.6          | 29.7              |
| 4 | Дефицитная         | 0.845       | 0.155         | 21.8          | 9.4               |
| 5 | Экстремальная      | 0.929       | 0.071         | 3.9           | 1.7               |

Кривая бронирования. Диагностика горизонта продаж показала резкий разрыв на D-45: бакет D-46..60 в 30 раз меньше D-31..45 (0.50% vs 4.47% выборки). Это соответствует системному горизонту продаж в АСУ «Экспресс» – 45 дней, что подтверждено продакт-менеджером. Для каждого рейса построены две кривые:

- netcurve – доля активных в инвентаре билетов на момент D-X;
- gross curve – доля билетов, когда-либо вошедших в инвентарь (без вычета возвратов).

Кривые выкупа по категориям NLF представлены в таблице 11 и на рисунке 3.

Таблица 11. Кривая выкупа по категориям NLF (доля net от количества фактически перевезенных пассажиров), %

| № | Категория          | D-45 | D-30 | D-21 | D-14 | D-10 | D-7  | D-3  | D-1  | D-0 |
|---|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 1 | Депрессивная       | 0.9  | 12.7 | 23.5 | 34.9 | 44.2 | 52.7 | 69.8 | 88.0 | 100 |
| 2 | Разбалансированная | 4.3  | 16.5 | 27.8 | 39.8 | 49.1 | 57.4 | 73.1 | 89.0 | 100 |
| 3 | Стабильная         | 2.3  | 16.9 | 30.1 | 44.0 | 54.0 | 62.8 | 77.9 | 91.4 | 100 |
| 4 | Дефицитная         | 2.1  | 20.7 | 35.4 | 50.2 | 59.9 | 68.3 | 82.6 | 93.5 | 100 |
| 5 | Экстремальная      | 2.9  | 30.1 | 47.5 | 69.8 | 69.8 | 76.1 | 85.4 | 93.7 | 100 |

Кривые выкупа по категориям NLF представлены на рисунке 3. Наблюдается четкое разделение «веером»: на D-14 разрыв между категорией 1 и категорией 5 составляет 27 процентных пунктов (35% vs 62%). Категория 5 уже на D-30 имеет 30% выкупа против 12% у категории 1 – это дает возможность ранней классификации рейса по темпу выкупа. Сплошные линии (net) демонстрируют долю билетов, остающихся активными в инвентаре на каждый момент времени, тогда как пунктирные линии (gross) показывают совокупный спрос без учета возвратов. Разрыв между этими кривыми отражает теневой спрос (shadow demand) – билеты, которые были куплены, но впоследствии возвращены. Кривые по haul-классам представлены в таблице 12 и на рисунке 4.

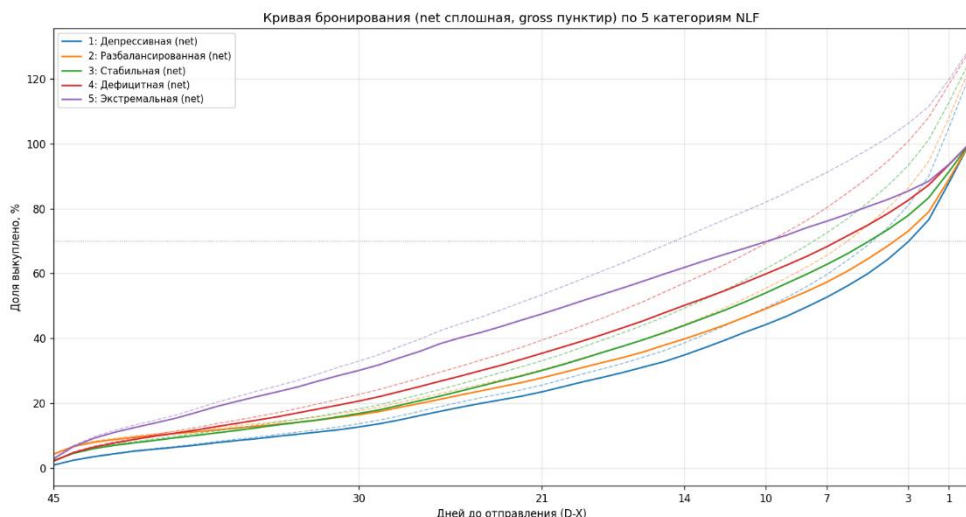


Рисунок 3. Кривая бронирования по категориям NLF: сплошные линии – net, пунктир gross

Таблица 12: Кривая выкупа по haul-классам, %

| Класс      | D-30 | D-21 | D-14 | D-7  | D-3  | D-1  | D-0 |
|------------|------|------|------|------|------|------|-----|
| Long-haul  | 21.3 | 37.4 | 53.4 | 73.0 | 87.4 | 98.0 | 100 |
| Mid-haul   | 20.4 | 34.5 | 48.6 | 67.5 | 82.5 | 94.4 | 100 |
| Short-haul | 4.7  | 8.2  | 12.6 | 21.9 | 36.4 | 62.3 | 100 |

Графическая визуализация этих данных содержится на рисунке 4.

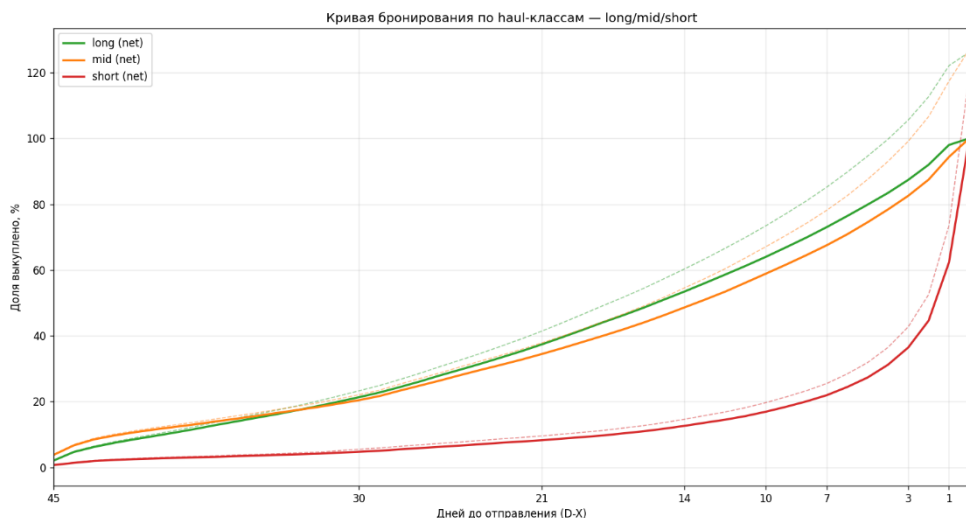


Рисунок 4. Кривая бронирования по haul-классам: long, mid, short

Анализ кривых по haul-классам демонстрирует принципиальное различие в поведении пассажиров разных категорий дальности. Long и mid-haul идут вместе на всем горизонте бронирования: на D-30 они составляют 21.3% и 20.4% соответственно, на D-7 - 73.0% и 67.5%. Short-haul, напротив, представляет собой отдельный трек: пассажиры начинают бронировать значительно позже. На D-3 выкуплено только 36.4% short-haul мест против 87.4% long-haul. В последние три дня short-haul почти утраивается (с 36.4% до 100%).

Это наблюдение является прямым эмпирическим аргументом в пользу виртуальной вложенности (Virtual Nesting) и защиты мест для long-haul корреспонденций (Protection Levels), описанных в разделах *Виртуальная вложенность (Virtual Nesting)* и *Адаптация эвристики ожидаемого предельного пассажирооборота*. Long-haul спрос можно ограждать на ранних этапах, так как short-haul пассажир физически не появляется до последних 2-3 дней.

«Жертва short ради long» из формулы (5) статьи в нашей выборке имеет очень узкое окно реализации – преимущественно D-3..D-1. Анализ разрыва между gross и net кривыми (Таблица 13) позволяет количественно оценить теневой спрос.

Таблица 13. Теневой спрос (полная и чистая кривые бронирования), %

| № | Категория          | netD-0 | gross D-0 | Теневой спрос |
|---|--------------------|--------|-----------|---------------|
| 1 | Депрессивная       | 100    | 121.0     | +21.0         |
| 2 | Разбалансированная | 100    | 123.2     | +23.2         |
| 3 | Стабильная         | 100    | 125.2     | +25.2         |
| 4 | Дефицитная         | 100    | 128.4     | +28.4         |
| 5 | Экстремальная      | 100    | 129.1     | +29.1         |

Через инвентарь рейса прошло на 21–29% больше билетов, чем итоговое число пассажиров. На пиковых рейсах (категория 5) теневой спрос максимален и составляет 29.1%. Это эмпирическая количественная оценка нецензурированного спроса из раздела *Восстановление истинного спроса* статьи – для категоризированного алгоритма это означает, что наблюдаемый финальный NLF систематически занижает истинный пиковый спрос. Анализ временного распределения возвратов (refundpace) показал, что 63.4% всех возвратов происходят в последние 7 дней до отправления (Таблица 14).

Таблица 14. Распределение возвратов по дням до отправления

| Окно    | Возвратов | Доля, % |
|---------|-----------|---------|
| D-0     | 24856     | 14.75   |
| D-1     | 23757     | 14.10   |
| D-2–3   | 27721     | 16.45   |
| D-4–7   | 30445     | 18.07   |
| D-8–14  | 26723     | 15.86   |
| D-15–21 | 14479     | 8.59    |
| D-22–30 | 10968     | 6.51    |
| D-31–45 | 9581      | 5.69    |

Анализ возвратов показал, что 63.4% всех возвратов приходится на последние 7 дней до отправления поезда. Данный результат свидетельствует о существенном перераспределении доступной провозной емкости на заключительном этапе продаж и подтверждает необходимость динамического управления инвентарем в преддверии отправления. Следовательно, при принятии решений о снятии ограничений и открытии продаж на ранее защищенные O&D-корреспонденции необходимо учитывать ожидаемый объем возвратов, что позволяет эффективнее использовать освобождающиеся места и снизить потери пассажирооборота.

Сравнение кривых выкупа по годам в сопоставимом окне март-июль (Таблица 15) позволяет оценить динамику покупательского поведения

Таблица 15. Год-к-году динамика кривой выкупа (март-июль), %

| Поезд | Год  | D-30 | D-21 | D-14 | D-7  | D-3  | D-0 |
|-------|------|------|------|------|------|------|-----|
| 109X  | 2023 | 15.6 | 29.5 | 44.1 | 62.1 | 76.4 | 100 |
| 109X  | 2024 | 17.6 | 31.6 | 45.2 | 61.6 | 74.6 | 100 |
| 109X  | 2025 | 15.1 | 28.2 | 42.8 | 61.2 | 76.7 | 100 |
| 110X  | 2023 | 23.5 | 40.5 | 57.1 | 74.6 | 85.1 | 100 |
| 110X  | 2024 | 29.3 | 45.9 | 59.4 | 74.1 | 83.9 | 100 |
| 110X  | 2025 | 18.8 | 34.6 | 49.1 | 66.9 | 82.6 | 100 |

У поезда 109Х динамика бронирования по годам остается стабильной: различия между годовыми кривыми не превышают 2 процентных пунктов. Для поезда 110Х, напротив, на горизонте D-30 в 2025 году доля выкупленных мест составляет 18.8% против 29.3% в 2024 году, что соответствует замедлению темпов раннего бронирования примерно на 35%. При этом к моменту отправления (D-0) различия практически исчезают, а итоговый NLF остается сопоставимым. Полученный результат свидетельствует о смещении спроса в сторону более позднего бронирования и показывает, что использование только ранних данных о продажах может привести к недооценке ожидаемого спроса при принятии решений о распределении провозной емкости.

#### *Управление системными рисками и механизмами тигации*

Имплементация агрессивных методов управления O&D в среде социально значимых перевозок сопровождается комплексом институциональных, технологических и социальных рисков.

*Социально-политический конфликт.* Субсидируемые государством пассажирские перевозки обладают двойственной природой. С одной стороны, от оператора требуют коммерческой эффективности и сокращения размера субсидий; с другой – поезда выполняют безальтернативную социальную функцию обеспечения территориальной связности [2]. Жесткая блокировка продаж на короткие перегоны с целью роста РПК неизбежно приведет к социальной напряженности. Для митигации данного риска используется концепция мультимодальной синхронизации и императивное «Правило последних 24 часов», гарантирующее, что ни одно место не уйдет пустым [4].

*Искажение данных и проблема No-Show.* Опора аналитиков исключительно на исторические данные продаж таит в себе ловушку. Исторические ряды часто сильно загрязнены факторами массовых возвратов, групповых отмен бронирований и неявки пассажиров (no-shows) [1]. Феномен нисходящей спирали заставляет аналитиков из года в год занижать квоты для длинных поездок [8]. Решением является обязательное внедрение процедур очистки данных: корректировка исторических рядов на коэффициент упущенного спроса в пиковые периоды и непрерывный мониторинг текущих темпов бронирования.

*Инфраструктурные барьеры динамической емкости.* Стратегия Категории 5 опирается на добавление вагонов. На практике этот механизм жестко лимитирован длиной пассажирских платформ на периферийных станциях и тяговыми расчетами [7].

*Технологическая ригидность устаревших систем.* Фундаментальным ограничением выступает архитектура систем резервирования, используемых в СНГ (АСУ «Экспресс»). Эти системы проектировались в эпоху плановой экономики и ориентированы на статичное квотирование [5]. Они зачастую не поддерживают сложную математику виртуальной вложенности O&D «из коробки» [8].

### **Дискуссия**

Ограничения исследования Представленное исследование имеет следующие ограничения:

1. Отсутствие данных о упущенном спросе: В системе АСУ «Экспресс» не фиксируются попытки бронирования, завершившиеся отказом. Восстановление истинного спроса выполнено косвенными методами (анализ кривой бронирования, gross vs net).

2. Неполнота данных о составе поезда: Отсутствует информация о вагонах без продаж (вагоны, в которых отсутствовали зарегистрированные продажи) и о прицепке/отцепке вагонов на промежуточных станциях. Это может приводить к систематическим ошибкам в расчете ASK на отдельных леггах.

3. Ограниченный временной горизонт: Данные покрывают период 2022–2025 гг. с неравномерным покрытием месяцев (отсутствуют январь 2023, ноябрь декабрь 2025).

4. Ограниченная выборка поездов: Анализ выполнен только по четырем поездам (два магистральных, два сезонных), что может ограничивать обобщаемость результатов на другие маршруты.

5. Отсутствие данных о no-show: Используемые данные не позволяют идентифицировать пассажиров, не явившихся на посадку (no-show), поскольку информация о фактической посадке отсутствует.

6. Статичность тарифов: Исследование исходит из предположения о фиксированных тарифах, что соответствует текущей практике, но не позволяет оценить совместный эффект ценообразования и управления емкостью.

Выявленные ограничения определяют перспективные направления дальнейших исследований. Приоритетом является расширение выборки маршрутов и восстановление непрерывных временных рядов для повышения обобщаемости результатов. Кроме того, планируется уточнить расчет ASK с учетом фактора no-show и схем формирования поездов, а также перейти от статичной тарифной модели к совместной оптимизации управления емкостью (*capacity management*) и динамического ценообразования.

### **Заключение**

В условиях детерминированных тарифов максимизация пассажирооборота становится основным направлением повышения эффективности социально значимых железных дорог. Предложенная методология позволяет перейти от статического распределения мест к интеллектуальному управлению провозной емкостью на основе прогнозирования спроса и анализа O&D-потоков. Основные результаты работы:

1. Разработана математическая модель управления емкостью с целевой функцией максимизации RPK.

2. Предложена классификация поездов по 5 категориям в зависимости от прогнозируемого NLF.

3. Разработаны пошаговые алгоритмы управления для каждой категории.

4. Проведен эмпирический анализ на реальных данных АО «Пассажирские перевозки» (2 190 рейсов, 658 361 проехавших пассажиров), показавший:

- Наличие четких точек разрыва SLF (Кульсары и Бейнеу на 109X) — кандидатов для технологии маршрутного шивания;

- Теневой спрос 21–29% от количества фактически перевезенных пассажиров;

- 63.4% возвратов в последние 7 дней;

- Ранние сигналы изменения покупательского поведения на поезде 110X (падение темпа выкупа на D-30 на 35%).

5. Выявлены и систематизированы риски внедрения и предложены механизмы их митигации.

Практическое применение разработанного подхода способно повысить сетевую насыщенность поездов дальнего следования и сократить потребность в государственном субсидировании без изменения тарифной политики. Несмотря на полученные результаты, предложенная методология требует дальнейшего развития. Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку методов автоматической классификации на основе машинного обучения и интеграцию с системами динамического ценообразования в случае либерализации тарифной политики.

### **Благодарность**

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках грантового финансирования AP26103651 «Разработка и улучшение модели управления доходами железнодорожных пассажирских перевозок на основе методов машинного обучения и искусственного интеллекта». Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «Пассажирские перевозки» за предоставленные данные и ценные консультации.

### References

- [1] Kamandanipour K., Haji Yakhchali S., Tavakkoli-Moghaddam R. Dynamic revenue management in a passenger rail network under price and fleet management decisions // *Annals of Operations Research*. — 2023. — 6 Apr. — P. 1–25. — DOI: 10.1007/s10479-023-05296-4. — PMID: 37361095. — PMCID: PMC10078050.
- [2] Fraser J., Thompson L. S. Purchasing Power Parity Adjusted Railway Performance [Электронный ресурс] // *World Bank Infrastructure Note*. — 1994. — No. RW-9. — December. — Режим доступа: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/242121468327616446/pdf/360080Purchasing0parity0td1rw9.pdf> (дата обращения: 03.06.2026).
- [3] Wang Y., Li Z., Zhang X. A Literature Review of Railway Pricing Based on Revenue Management // *Mathematics*. — 2023. — Vol. 11, No. 4. — P. 85. — DOI: 10.3390/math11040085.
- [4] Pricing and Revenue Management [Электронный ресурс] // *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)*. — Режим доступа: [https://transportation.org/rail/wp-content/uploads/sites/24/2024/07/AASHTO\\_v4.ppt](https://transportation.org/rail/wp-content/uploads/sites/24/2024/07/AASHTO_v4.ppt) (дата обращения: 03.06.2026).
- [5] Economic Commission for Europe, Inland Transport Committee, Working Party on Rail Transport, Group of Experts on International Railway Passenger Hubs. Handbook of Instruments Governing International Rail Passenger Transport [Электронный ресурс] : Analysis of the legal framework governing international passenger transportation / transmitted by the Russian Federation. — Second session, Geneva, 15–17 December 2021. — Agenda item 6. — Approved at the meeting of the OSJD Commission on Transport Law on 24–26 November 2020. — Режим доступа: [https://unece.org/sites/default/files/2022-07/ECE-TRANS-SC.2\\_HUBS-2021-07e.pdf](https://unece.org/sites/default/files/2022-07/ECE-TRANS-SC.2_HUBS-2021-07e.pdf) (дата обращения: 03.06.2026).
- [6] Broman E., Eliasson J., Aronsson M. Efficient capacity allocation on deregulated railway markets // *Journal of Rail Transport Planning & Management*. — 2022. — Vol. 21. — P. 100294. — DOI: 10.1016/j.jrtpm.2021.100294.
- [7] Klages S. G. Algorithmic Railway Capacity Allocation in a Competitive European Railway Market [Электронный ресурс] : Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften / S. G. Klages ; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. — Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Wendler, Prof. Dr.rer.nat. B. Vöcking. — Tag der mündlichen Prüfung: 14. Januar 2010. — Режим доступа: [http://publications.rwth-aachen.de/record/51543/files/Klages\\_Sebastian.pdf](http://publications.rwth-aachen.de/record/51543/files/Klages_Sebastian.pdf) (дата обращения: 03.06.2026).
- [8] Berto A. Rail Yield Management. Trenitalia Case [Электронный ресурс] : PhD Thesis in Operations Research / A. Berto ; Roma Tre University. — Advisors: Prof. A. Pacifici, Prof. G. Nicosia. — Year 2019. — Режим доступа: [https://arcadia.sba.uniroma3.it/bitstream/2307/40637/1/Tesi\\_PhD\\_Berto\\_2019.pdf](https://arcadia.sba.uniroma3.it/bitstream/2307/40637/1/Tesi_PhD_Berto_2019.pdf) (дата обращения: 03.06.2026).
- [9] Manchiraju C. Dynamic Pricing and Capacity Optimization in Railways [Электронный ресурс] // *Mitsubishi Electric Research Laboratories*. — 2025. — No. TR2025 007. — Режим доступа: <https://www.merl.com/publications/docs/TR2025-007.pdf> (дата обращения: 03.06.2026).
- [10] Boltaikhanova T., Bostanbekov K., Nurseitov D., Begimbetov O. (2024). Forecasting Railway Ticket Demand. 10.20944/preprints202411.0098.v1