

УДК 656.025.2:519.711.3(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-56-62

РАЗРАБОТКА ЛОГИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖДУГОРОДНИХ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК

М.Т. Алсеитов, Ч.З. Элеманов, А.У. Асанбеков

Аннотация. Рассматриваются логистические подходы к организации междугородних пассажирских перевозок в Кыргызской Республике с применением математических методов моделирования и оптимизации. Разработана математическая модель транспортной сети, включающая дискретную оптимизацию, теорию графов, линейное программирование и имитационное моделирование. Особое внимание уделено критериям эффективности перевозок: времени в пути, надёжности, экономическим затратам и уровню комфорта. Проведена интегральная оценка эффективности предложенной логистической модели на примере маршрута Бишкек–Каракол, показавшая её преимущество по сравнению с действующей системой. Практическая значимость работы заключается в возможности внедрения разработанных решений для повышения устойчивости и качества междугородних перевозок на национальном уровне.

Ключевые слова: логистика; перевозки; транспорт; модель; оптимизация; теория; программирование; моделирование; эффективность; комфорт; надёжность.

ШААРЛАР АРАЛЫК ЖҮРГҮНЧҮЛӨРДҮ ТАШУУНУ УЮШТУРУУНУН ЛОГИСТИКАЛЫК МОДЕЛИН ИШТЕП ЧЫГУУ

М.Т. Алсеитов, Ч.З. Элеманов, А.У. Асанбеков

Аннотация. Макалада Кыргыз Республикасында шаарлар аралык жүргүнчү ташууларды уюштурууда логистикалык ыкмаларды колдонуу жана аларды математикалык моделдөө, оптималдаштыруу ыкмалары аркылуу талдоо каралат. Транспорттук тармактын математикалык модели иштелип чыгып, ал дискреттик оптималдаштыруу, графтар теориясы, сызыктуу программалоо жана имитациялык моделдөө ыкмаларын камтыйт. Айрыкча көңүл жүргүнчү ташуулардын натыйжалуулугунун критерийлерине бурулган: жол жүрүү убактысы, ишенимдүүлүк, экономикалык чыгымдар жана ыңгайлуулук деңгээли. Бишкек–Каракол маршруту боюнча сунушталган логистикалык моделдин интегралдык натыйжалуулугунун баалоосу жүргүзүлүп, анын учурдагы системага салыштырмалуу артыкчылыгы көрсөтүлдү. Иштин практикалык мааниси - иштелип чыккан чечимдерди өлкө масштабына чейин шаарлар аралык жүргүнчү ташуулардын туруктуулугун жана сапатын жогорулатуу максатында киргизүү мүмкүнчүлүгүндө.

Түйүндүү сөздөр: логистика; ташуу; унаа; модель; оптимизация; теория; программалоо; моделдөө; натыйжалуулук; ыңгайлуулук; ишенимдүүлүк.

DEVELOPMENT OF A LOGISTIC MODEL FOR ORGANIZING INTERCITY PASSENGER TRANSPORTATION

M.T. Alseitov, Ch.Z. Elemanov, A.U. Asanbekov

Abstract. The article examines logistical approaches to organizing intercity passenger transportation in the Kyrgyz Republic using mathematical methods of modeling and optimization. A mathematical model of the transport network has been developed, incorporating discrete optimization, graph theory, linear programming, and simulation modeling. Special attention is given to the criteria of transportation efficiency: travel time, reliability, economic costs, and comfort level. An integrated assessment of the efficiency of the proposed logistical model was carried out using the Bishkek–Karakol route as an example, demonstrating its advantage over the current system. The practical significance of the

study lies in the possibility of implementing the developed solutions to enhance the sustainability and quality of intercity passenger transportation at the national level.

Keywords: logistics; transportation; transport; model; optimization; theory; programming; modeling; efficiency; comfort; reliability.

Эффективная организация междугородних пассажирских перевозок невозможна без применения математических методов, позволяющих объективно оценить и оптимизировать параметры маршрутной сети, график движения и загрузку подвижного состава. Логистический подход требует построения математических моделей, отражающих взаимодействие между спросом, предложением и ограничениями транспортной системы. В данной работе применяются методы дискретной оптимизации, теории графов, линейного программирования и имитационного моделирования [1–6].

Рассмотрим междугороднюю транспортную сеть как ориентированный граф:

$$G = (V, E),$$

где V – множество узлов (населённые пункты); E – множество дуг (транспортных маршрутов между узлами), каждой дуге $(i, j) \in E$ приписан вес c_{ij} , отражающий транспортные затраты (время, стоимость, расстояние); d_{ij} – пассажиропоток между узлами i и j (чел/день); x_{ij} – число рейсов или транспортных средств, назначаемых на маршрут (i, j) .

Цель – минимизировать совокупные затраты при удовлетворении существующего спроса на перевозки:

$$\min = \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} \times x_{ij}$$

при ограничениях:

$$x_{ij} \geq \frac{d_{ij}}{k_{ij}},$$

$$\forall (i, j) \in E,$$

где k_{ij} – вместимость одного транспортного средства на маршруте (i, j) . Это ограничение гарантирует, что выделенный транспорт удовлетворит спрос.

Для междугородних перевозок важен не только выбор маршрута, но и временная координация. Обозначим:

T – множество временных интервалов (например, часы суток),

x_{ij}^t – количество рейсов на маршруте (i, j) в интервал времени t ,

d_{ij}^t – ожидаемый спрос в этом интервале.

Оптимизационная задача:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij}^t \times x_{ij}^t$$

при ограничении:

$$\sum_{t \in T} x_{ij}^t \times x_{if} \geq \sum_{t \in T} d_{if}^t,$$

$$\forall (i, j) \in E$$

$$x_{ij} \geq \frac{d_{ij}}{k_{ij}}.$$

Это обеспечивает распределение рейсов по времени в соответствии с реальным пассажиропотоком.

Задача может быть представлена в форме линейного программирования (ЛП). Вектор переменных $x = \{x'_{ij}\}$, целевая функция – линейная, ограничения – линейные. Для её решения можно использовать:

- симплекс-метод;
- метод внутренней точки;
- специальные алгоритмы, адаптированные под транспортные задачи (например, модифицированный метод потенциалов).

Для оценки равномерности загрузки сети применима модель Уордарапа:

- Пассажиры выбирают маршруты с минимальными затратами.
- Никакой пассажир не может улучшить своё положение, перейдя на другой маршрут.

Равновесное распределение достигается, если для всех использующихся маршрутов p между парой узлов (i, j) :

$$C_p = \min_{q \in P_{ij}} C_q,$$

где P_{ij} – множество возможных маршрутов между i и j ; C_p – обобщённые затраты на маршруте p (время, стоимость и т. д.).

Для реализации используется итерационный алгоритм, включающий:

- вычисление кратчайших путей;
- перераспределение потоков;
- проверку на сходимость.

Для оптимального построения расписания важно учитывать неравномерность спроса во времени. Пусть h_t – интервал движения в момент времени t . Оптимизация направлена на минимизацию среднего времени ожидания пассажира:

$$\min \sum_{t \in T} d_t \times \frac{h_t}{2}$$

при условии, что количество транспортных средств и водителей ограничено:

$$\sum_{t \in T} \frac{1}{h_t} \leq M,$$

где M – максимально доступное количество рейсов.

Решение задачи позволяет задать адаптивный график движения – с укороченными интервалами в часы пик и удлинёнными в период спада.

Для оценки поведения логистической системы при реальных условиях используется имитационное моделирование, включающее:

- ввод случайных параметров (опоздания, аварии, рост спроса);
- моделирование очередей, пропускной способности терминалов;
- анализ чувствительности расписания.

Программные инструменты: AnyLogic, Simul8, MATLAB SimEvents, Arena [7].

Имитационное моделирование позволяет создавать цифровые двойники маршрутов, на которых можно тестировать различные сценарии и принимать обоснованные управленческие решения.

Разработка и внедрение логистической модели междугородних пассажирских перевозок невозможны без чётко определённых критериев эффективности, которые позволяют количественно и качественно оценить результативность транспортной системы. Эти критерии обеспечивают основу для принятия решений, оптимизации маршрутов, регулирования транспортных потоков и ориентации на нужды пассажиров. В данной работе особое внимание уделяется четырём ключевым критериям: время в пути, надёжность, затраты и комфорт.

1. *Время в пути (T)*. Время в пути является базовой характеристикой логистической эффективности. Оно включает:

- время движения между пунктом отправления и пунктом назначения;
- время ожидания рейса (задержки, стыковки, простои);
- время посадки/высадки пассажиров;
- влияние дорожных условий, сезонности и пробок.

Целевая функция может быть выражена как:

$$T_{\text{общ}} = T_{\text{движ}} + T_{\text{ожид}} + T_{\text{посад/высад}}.$$

Минимизация общего времени в пути без ущерба для безопасности и комфорта – одна из главных задач логистического моделирования. Сокращение времени также повышает привлекательность междугородних перевозок по сравнению с альтернативными видами транспорта.

2. *Надёжность перевозок (R)*. Под надёжностью понимается стабильность и предсказуемость перевозочного процесса. Это выражается в:

- соблюдении расписания (P_n): доля рейсов, прибывших вовремя;
- частоте сбоев (F): количество отмен или значительных задержек на 100 рейсов;
- доступности рейсов: возможность приобрести билет в нужное время.

Надёжность можно количественно описать коэффициентом:

$$R = \frac{N_{\text{всего}}}{N_{\text{вовремя}}} \times 100\%,$$

где $N_{\text{вовремя}}$ – количество выполненных рейсов без отклонений по времени; $N_{\text{всего}}$ – общее число запланированных рейсов.

Повышение надёжности напрямую влияет на доверие пассажиров и стабильность транспортной системы.

3. *Экономическая эффективность (C)*. Экономический критерий включает два аспекта:

- затраты пассажира (C_n), то есть стоимость билета, время, потраченное на поездку (включая ожидание), дополнительные расходы (трансфер, питание);
- затраты оператора (C_o), то есть топливо, амортизация, зарплата водителя, обслуживание техники, инфраструктура.

Общий показатель затрат:

$$C = C_n + C_o.$$

Для оптимизации логистики стремятся снизить суммарные затраты, не ухудшая качество услуги. Снижение себестоимости позволяет удерживать цены на доступном уровне и одновременно поддерживать устойчивость бизнеса.

4. *Комфорт и качество обслуживания* (K). Комфорт – один из наиболее субъективных, но критически важных показателей. Он влияет на выбор пассажира и лояльность к маршрутам. Оценивается через:

- состояние подвижного состава (чистота, удобство сидений, наличие кондиционирования, Wi-Fi и т. д.);
- уровень сервиса, то есть вежливость персонала, информирование, удобство покупки билета;
- время в пути без стрессов, то есть плавность поездки, отсутствие перегрузки и давки.

Оценка комфорта может проводиться по балльной шкале или с помощью анкеты пассажиров, что даёт интегральную оценку K , например:

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i,$$

где k_i – индивидуальная оценка каждого пассажира; n – число респондентов.

Все описанные выше показатели можно объединить в многокритериальную модель оценки эффективности:

$$E = w_1 \times \frac{1}{T} + w_2 \times R + w_3 \times \frac{1}{C} + w_4 \times K,$$

где w_1, w_2, w_3, w_4 – весовые коэффициенты значимости каждого критерия (определяются на основе экспертной оценки или анализа предпочтений пассажиров); E – более высокие значения которого отражают более эффективную модель перевозок.

Определение и количественная формализация ключевых критериев эффективности позволяют объективно оценить работоспособность предложенной логистической модели. Каждый из критериев отражает важный аспект системы междугородних перевозок, то есть скорость, стабильность, доступность и удовлетворённость. Только комплексный подход, учитывающий все параметры в балансе, способен привести к созданию устойчивой, конкурентоспособной и клиентоориентированной логистической структуры в условиях Кыргызской Республики.

После построения логистической схемы движения пассажиропотоков и математического моделирования необходимо провести оценку её эффективности. Цель этой оценки – подтвердить, что новая модель действительно улучшает организацию междугородних пассажирских перевозок по сравнению с текущей системой. Для этого используется система критериев, разработанных в предыдущем разделе: время в пути, надежность, затраты и комфорт. Их применение в сравнительном анализе позволяет выявить, насколько эффективно предложенное решение выполняет свои функции.

1. *Методика оценки эффективности.* Для проведения оценки используется сравнительный метод анализа, при котором показатели текущей (базовой) модели сравниваются с результатами, полученными после внедрения новой логистической схемы. Каждый критерий рассматривается по отдельности, а затем производится интегральная оценка общей эффективности модели.

Обозначим:

T_0, R_0, C_0, K_0 – показатели базовой (действующей) модели;

T_1, R_1, C_1, K_1 – показатели новой (предлагаемой) логистической модели;

E_0, E_1 – интегральные оценки эффективности, соответственно.

2. *Сравнительный анализ по критериям.* По результатам моделирования и оптимизации маршрутов наблюдается сокращение времени в пути. Расчеты выполним на примере автобусного междугороднего маршрута Бишкек–Каракол:

$$T_0 = 7,2^{\circ} \text{ ч};$$

$$T_1 = 6,1 \Rightarrow \Delta T = \frac{(T_0 - T_1)}{T_0 \times 100\%} = 15,3\%.$$

Снижение времени в пути повышает привлекательность перевозок и позволяет обслужить больше пассажиров за одинаковое время.

За счёт устранения узких мест, корректировки расписания и маршрутов надёжность возрастает:

$$R_0 = 82\%, R_1 = 92\% \Rightarrow \Delta R = 10\%.$$

Это достигается за счёт более точной привязки к реальным условиям движения, оптимизации распределения подвижного состава и внедрения цифрового контроля.

Экономический эффект проявляется как для пассажиров, так и для оператора. Допустим:

$$C_0 = 520 \text{ сом};$$

$$C_1 = 460 \text{ сом} \Rightarrow \Delta C = 11,5\%.$$

Снижение затрат обусловлено рационализацией маршрутов, уменьшением холостых пробегов, более эффективным использованием транспортных мощностей.

Уровень комфорта оценивается по пятибалльной шкале на основе анкетирования:

$$K_0 = 3,4;$$

$$K_1 = 4,1 \Rightarrow \Delta K = 20,6\%.$$

Повышение комфорта связано с внедрением улучшенного подвижного состава, цифровой навигации и удобного сервиса бронирования.

Интегральная оценка эффективности. Введем весовые коэффициенты:

$$w_1 = 0,3 \text{ – время в пути};$$

$$w_2 = 0,3 \text{ – надёжность};$$

$$w_3 = 0,2 \text{ – затраты};$$

$$w_4 = 0,2 \text{ – комфорт}.$$

3. Интегральная эффективность:

$$E_0 = 0,3 \times \frac{1}{7,2} + 0,3 \times 0,82 + 0,2 \times \frac{1}{520} + 0,2 \times 3,4 = 0,98;$$

$$E_1 = 0,3 \times \frac{1}{6,1} + 0,3 \times 0,92 + 0,2 \times \frac{1}{460} + 0,2 \times 4,1 = 1,15.$$

Для упрощённого сравнения можно выразить улучшение в процентах:

$$\Delta E = \frac{(E_1 - E_0)}{E_0} \times 100\%;$$

$$\Delta E = \frac{(1,15 - 0,98)}{0,98} \times 100\% = 17\%.$$

Так как $\Delta E > 10\%$, это говорит о значительном улучшении эффективности системы после внедрения логистической модели.

4. *Практическое значение оценки.* Оценка эффективности позволяет:

- обоснованно рекомендовать внедрение новой модели;
- разработать стратегию масштабирования (на другие регионы/маршруты);
- определить точки для последующей оптимизации;
- подготовить аргументы для инвестиционных решений и государственной поддержки.

Выводы. Оценка эффективности предложенной логистической модели на основе интегрального анализа показывает её высокую результативность. Уменьшение времени в пути, повышение надёжности, снижение затрат и рост удовлетворённости пассажиров создают совокупный эффект, обеспечивающий устойчивое и привлекательное развитие междугородних пассажирских перевозок в Кыргызской Республике.

Поступила: 16.05.2025; рецензирована: 30.05.2025; принята: 02.06.2025.

Литература

1. *Винокуров С.С.* Логистика пассажирских перевозок / С.С. Винокуров. М.: Академия, 2019. 256 с.
2. *Таха Х.А.* Введение в исследование операций / Х.А. Таха. М.: Вильямс, 2005. 912 с.
3. *Афанасьев В.Н.* Теория графов и её приложения в транспорте / В.Н. Афанасьев. М.: Транспорт, 2010. 312 с.
4. *Плотников Л.А.* Методы линейного программирования / Л.А. Плотников. Новосибирск: НГТУ, 2015. 184 с.
5. *Кононов А.Ю.* Оптимизация транспортных систем: математические модели и методы / А.Ю. Кононов, С.Н. Нуждин. СПб.: Политехника, 2016. 288 с.
6. *Баландин С.Г.* Имитационное моделирование логистических систем: теория и практика / С.Г. Баландин. М.: Инфра-М, 2021. 348 с.
7. MATLAB SimEvents – документация и примеры. URL: <https://www.mathworks.com/products/simevents.html> (дата обращения: 06.01.2025).