

Научная статья
УДК 656.073.2:519.8
doi:10.52170/1815-9265_2026_80_23

Методика маршрутизации материальных потоков в логистике при ограничениях загрузки узлов и дифференцированной ценности грузов

Роман Юрьевич Упырь

Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия, roman.upyr@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматриваются подходы к разработке эффективной универсальной методики оперативного планирования маршрутов и обработки материальных потоков в различных логистических сетях с ограниченной перерабатывающей способностью узлов, позволяющей экономически обоснованно отказываться от перевозки низкорентабельных грузов при возникновении узких мест. Предложена математическая модель в виде задачи целочисленной оптимизации с целевой функцией, включающей затраты на накопление транспортных партий, обработку в узлах (с нелинейным штрафом за превышение мощности), экономию от транзита без переработки, а также альтернативную стоимость отказа от перевозки. Для решения используется итеративный эвристический алгоритм (метод динамической стабилизации), на каждом шаге фиксирующий коэффициенты загрузки и перераспределяющий потоки до сходимости. Разработанная автором модель впервые объединяет нелинейный штраф за перегрузку узлов (включенный непосредственно в целевую функцию) и возможность селективного исключения низкорентабельных отправок. Методика инвариантна к виду транспорта и может использоваться для планирования работы сортировочных станций, складов, портов и терминалов, а также для обоснования инвестиций в расширение перерабатывающей способности инфраструктуры. В отличие от действующих нормативных документов ОАО «РЖД», где штраф за перегрузку вводится лишь как временный вычислительный прием и исключается из итоговой оценки, а все потоки считаются обязательными к освоению, предложенная методика позволяет ранжировать грузопотоки по ценности и принимать экономически обоснованные решения об отказе от перевозки в условиях дефицита ресурсов, что особенно актуально в пиковые периоды.

Ключевые слова: логистика материальных потоков, маршрутизация грузов, транспортные узлы, перерабатывающая способность, план формирования поездов

Для цитирования: Упырь Р. Ю. Методика маршрутизации материальных потоков в логистике при ограничениях загрузки узлов и дифференцированной ценности грузов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 3 (80). С. 23–29. DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_23.

Original article

A methodology for routing material flows in logistics under node load constraints and differentiated cargo value

Roman Yu. Upyr

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia, roman.upyr@gmail.com

Abstract. This article examines approaches to developing an effective universal methodology for operational route planning and material flow processing in various logistics networks with limited node processing capacity, enabling economically justified rejection of low-profitability cargo shipments when bottlenecks occur. A mathematical model is proposed in the form of an integer optimization problem with an objective function that includes costs of accumulating transport batches, node processing costs (with a nonlinear penalty for exceeding capacity), savings from transit without processing, as well as the opportunity cost of rejecting transportation. An iterative heuristic algorithm (dynamic stabilization method) is used for solution, fixing load coefficients at each step and redistributing flows until convergence. The model developed by the author uniquely combines a nonlinear penalty for node overloading (incorporated directly into the objective function) with the possibility of selectively excluding low-profitability shipments. The methodology is invariant to the mode of transport and can be used for planning operations at classification yards, warehouses, ports, and terminals, as well as for justifying investments in expanding infrastructure processing capacity. In contrast to the current regulatory documents of Russian Railways, where the overload penalty is introduced only as a temporary computational device and excluded from the final assessment, while all flows are considered mandatory for handling, the proposed methodology

allows ranking cargo flows by value and making economically justified decisions to reject transportation under resource scarcity conditions, which is particularly relevant during peak periods

Keywords: material flow logistics, cargo routing, transport nodes, processing capacity, train formation plan

For citation: Upyr R. Yu. A methodology for routing material flows in logistics under node load constraints and differentiated cargo value. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(80):23–29. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_80_23.

Введение

Эффективность функционирования транспортно-логистических сетей напрямую зависит от рациональной организации материальных потоков: выбора маршрутов следования грузовых партий, определения пунктов их накопления и переработки, а также распределения ограниченных ресурсов узлов инфраструктуры. Классические методики маршрутизации обычно стремятся минимизировать сумму операционных затрат при фиксированном объеме перевозок [1–3], предполагая неограниченную пропускную и перерабатывающую способность узловых элементов. Однако на практике сортировочные центры, склады, порты и терминалы обладают конечной перерабатывающей способностью. В пиковые периоды превышение этой способности ведет к сверхнормативным простоям и росту удельных издержек на обработку [4]. Кроме того, разные составляющие грузопотока обладают неодинаковой экономической ценностью – при возникновении узких мест в сети разумным управленческим решением может стать отказ от перевозки наименее доходных или наименее критичных партий груза, даже если это сопряжено с уплатой штрафных санкций или альтернативными потерями.

Следует отметить, что фундаментальные исследования в области организации материальных потоков нашли отражение и в организации железнодорожных перевозок, которые традиционно фокусируются на проблеме выбора расчетных значений транспортных потоков для составления плана формирования поездов (ПФП), в частности в работах [5–11]. Авторы статьи [6] убедительно доказывают вероятностную природу колебаний объемов перевозок и предлагают перейти от детерминированного использования средних суточных величин к расчетам на основе математического ожидания струи вагонопотока с учетом законов распределения и рода груза. Такой подход позволяет существенно повысить точность прогнозирования необходимых ресурсов для освоения перевозок. Однако в рамках данной методологии все прогнозируемые вагонопотоки рассматриваются

как обязательные к освоению; вопрос о возможности экономически обоснованного отказа от перевозки части грузов в условиях дефицита перерабатывающих мощностей не ставится. Кроме того, в указанных моделях не учитывается обратное влияние перегрузки станций на рост удельных затрат по обработке вагонов и, как следствие, на экономическую эффективность выбранного варианта ПФП.

Анализ методических основ, заложенных в действующих нормативных документах и учебных пособиях, в частности в фундаментальном труде [7], показывает, что именно там сформулированы базовые принципы, получившие развитие в настоящей статье. В пособии [7] детально описаны экономические критерии организации вагонопотоков: затраты на накопление составов, расходы на переработку вагонов на технических станциях и экономия от их проследования без переработки. Там же вводится понятие технически допустимых размеров переработки станций и рекомендуется использовать штрафные функции при превышении этих лимитов в ходе автоматизированных расчетов плана формирования по методу МИИТ – ВНИИАС. Указанные положения послужили отправной точкой для построения целевой функции и ограничений предлагаемой модели.

Базовым нормативным документом, регламентирующим технологию организации вагонопотоков и составления плана формирования грузовых поездов на сети железных дорог России, являются «Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД»» [8]. В нем детально изложены экономические критерии эффективности организации вагонопотоков, базирующиеся на сопоставлении затрат на накопление составов на станциях формирования с экономией от проследования попутных технических станций без переработки, а также на учете расходов на перемещение вагонов по участкам. Ключевым принципом, заложенным в указаниях, является поиск такого распределения вагонопотоков по сети допустимых назначений, при котором суммарные стоимостные оценки накопления, перера-

ботки и продвижения вагонов минимальны при соблюдении заданных ограничений по пропускным и перерабатывающим способностям станций и участков.

Фундаментальная методика, лежащая в основе [8], исходит из безусловной необходимости освоения всего предъявленного к перевозке вагонопотока. Задача сводится к поиску оптимального варианта организации поездов при фиксированном объеме работы, а вопрос об экономически обоснованном отказе от перевозки части грузопотока в условиях пиковых нагрузок, когда стоимость обработки сверхнормативных объемов начинает лавинообразно расти, а сам отказ может быть экономически эффективнее принудительного продвижения, не ставится.

В отличие от классической постановки, закрепленной в распоряжении [8], где штраф за перегрузку станций вводится лишь как временный вычислительный прием и исключается из итоговой оценки, предлагаемая автором методика включает нелинейный штраф f_s непосредственно в целевую функцию и позволяет экономически обоснованно отказываться от перевозки низкорентабельных грузов при дефиците пропускной способности. При этом авторская методика разделяет с нормативным документом базовые принципы учета затрат на накопление, переработку и экономии от транзита, однако для практической реализации на железнодорожной сети требует калибровки обобщенных параметров A , B , E на основе поучастковых расходных

ставок, а также пересмотра положения об обязательности освоения всего вагонопотока.

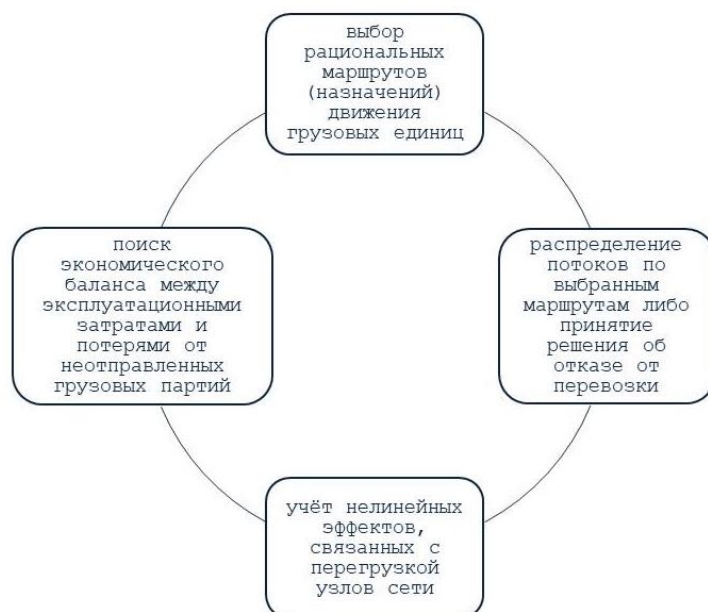
Вместе с тем классическая методика, изложенная в работах [5–7, 9–15], исходит из безусловной необходимости освоения всего предъявленного вагонопотока. Задача сводится к поиску такого распределения потоков по сети допустимых назначений, чтобы суммарные затраты на накопление и переработку были минимальны, а ограничения по перерабатывающей способности станций соблюдались за счет перераспределения потоков на менее загруженные узлы.

В отличие от упомянутых подходов, в настоящей работе предлагается расширенная экономико-математическая модель, которая на примере плана формирования поездов, с одной стороны, опирается на классические принципы минимизации затрат на накопление и переработку вагонов, а с другой – вводит два принципиально новых элемента:

- нелинейный штраф за превышение перерабатывающей способности станций, что отражает реальный рост издержек при возникновении очередей и сверхурочных работ;

- альтернативную стоимость отказа от перевозки (ценность вагона), позволяющую в автоматизированном режиме отсеивать наименее доходные потоки при возникновении узких мест в инфраструктуре.

Рассматриваемый автором подход позволяет решить комплекс задач оптимизации материальных потоков в обобщенной постановке (рисунок).



Комплекс задач оптимизации материальных потоков в обобщенной постановке

Методика предназначена для включения в системы поддержки принятия решений диспетчерского и логистического персонала [16] и может быть адаптирована под различные конфигурации транспортных сетей и виды транспорта.

Теоретические исследования

Рассмотрим упорядоченную по направлению движения линейную сеть, содержащую n узлов обработки (логистических центров, сортировочных пунктов, станций): $S = \{1, 2, \dots, n\}$. Индексы узлов возрастают вдоль основного направления следования материального потока. Множество грузопотоков (отправок) обозначим $F = \{1, 2, \dots, m\}$. Для каждого потока $i \in F$ задаются следующие параметры:

- узел зарождения $o_i \in S$;
- узел погашения (назначения) $d_i \in S$ (при этом $o_i < d_i$);
- суточный объем $v_i \in Z_+$ (в условных грузовых единицах, например вагонах, контейнерах, паллетах);
- ценность одной грузовой единицы $w_i \in R_+$ (ден. ед. / ед. груза).

Под ценностью одной грузовой единицы будем понимать альтернативные издержки, возникающие при отказе от транспортировки данного потока (недополученная выручка, штрафные санкции, стоимость груза, репутационные потери).

Для каждого узла s задается его перерабатывающая способность C_s (ед. груза / сут) – это максимальный объем материального потока, который узел может обработать в штатном режиме за единицу времени.

Зададим общие для сети экономические параметры: p – коэффициент штрафного удорожания обработки при превышении C_s ; T – вместимость одной транспортной единицы (поезда, грузовика, контейнеровоза), усл. ед. груза; A – удельные затраты на формирование (накопление) одной транспортной единицы на маршрут, ден. ед. / трансп. ед.; B – базовая стоимость обработки одной грузовой единицы в узле, ден. ед. / ед. груза; E – удельная экономия от проследования одной грузовой единицы промежуточного узла без обработки, ден. ед. / ед. груза на узел.

В общем случае мы закладываем обобщенную методику расчетов, но финальные параметры будут гибко масштабироваться под конкретный вид транспорта.

Для любой пары узлов $a < b$ введем понятие *прямого маршрута (назначения)* P_{ab} при котором грузовые единицы следуют от узла a до узла b без обработки (переформирования, перевалки) в промежуточных узлах.

В модели используем три группы бинарных переменных:

- $x_{ab} \in \{0,1\}$ – индикатор того, что маршрут P_{ab} действительно используется (формируется);
- $y_{i,ab} \in \{0,1\}$ – индикатор включения потока i в маршрут P_{ab} ;
- $z_i \in \{0,1\}$ – индикатор отказа от перевозки потока i .

Введем систему ограничений для задачи:

1. *Целостность выбора* – каждый грузопоток либо включается ровно в один прямой маршрут, либо отклоняется:

$$\sum_{a < b} y_{i,ab} + z_i = 1, \quad \forall i \in F. \quad (1)$$

2. *Согласованность маршрута* – поток i может быть включен в маршрут P_{ab} , только если он начинается в узле a и следует не далее узла b , причем b не должно превышать узел его конечного назначения:

$$y_{i,ab} \leq 1[a = o_i, b \leq d_i], \quad \forall i \in F, \quad \forall a < b. \quad (2)$$

3. *Активация маршрута* – если хотя бы один поток включен в P_{ab} , то этот маршрут должен быть сформирован (т. е. $x_{ab} = 1$):

$$y_{i,ab} \leq x_{ab}, \quad \forall i \in F, \quad \forall a < b. \quad (3)$$

4. *Загрузка узла обработки* – суммарный объем грузовых единиц, в операциях с которыми участвует узел s (отправление или прибытие), вычисляется как

$$L_s = \sum_{\substack{a < b \\ i: o_i=s \text{ или } d_i=s}} v_i y_{i,ab}, \quad \forall s \in S. \quad (4)$$

5. *Коэффициент загруженности* – кусочно-линейный множитель, увеличивающий удельные затраты на обработку при превышении штатной мощности узла:

$$f_s = \begin{cases} 1, & \text{если } L_s \leq C_s, \\ 1 + p \left(\frac{L_s}{C_s} - 1 \right), & \text{если } L_s > C_s. \end{cases} \quad (5)$$

6. *Объем маршрута и потребное количество транспортных единиц*

$$V_{ab} = \sum_{i \in F} v_i y_{i,ab}, \quad K_{ab} = \left\lceil \frac{V_{ab}}{T} \right\rceil. \quad (6)$$

Минимизируя суммарные суточные издержки (ден. ед. / сут), которые включают затраты на формирование транспортных партий, обработку в узлах, экономию от транзита и аль-

тернативные потери, составим целевую функцию задачи:

$$\min \left(A \sum_{a < b} K_{ab} + B \sum_{a < b} V_{ab} \frac{f_a + f_b}{2} - E \sum_{i \in F} \sum_{a < b} v_i y_{i,ab} (d_i - o_i - 1) + \sum_{i \in F} w_i v_i z_i \right), \quad (7)$$

где $A \sum_{a < b} K_{ab}$ – затраты на формирование (накопление) транспортных единиц; $B \sum_{a < b} V_{ab} \frac{f_a + f_b}{2}$ – расходы на обработку в узлах отправления и назначения, скорректированные с учетом их текущей загрузки; $E \sum_{i \in F} \sum_{a < b} v_i y_{i,ab} (d_i - o_i - 1)$ – экономия, возникающая при проследовании груза через промежуточные узлы без переработки (входит со знаком «минус»); $\sum_{i \in F} w_i v_i z_i$ – альтернативные потери от неотправленных потоков.

Ввиду нелинейности, вносимой коэффициентами f_s и операцией округления, конкретная реализация алгоритма может варьироваться. В качестве примера решающего алгоритма рассмотрим применение эвристического итеративного алгоритма для рассматриваемой задачи.

Шаг 0. Инициализация. Принимаем начальные коэффициенты загрузки $f_s^{(0)} = 1$ для всех узлов. Формируем начальное множество маршрутов (например, все прямые корреспонденции $o_i \rightarrow d_i$).

Шаг 1. Основной цикл (итерация $k = 1, 2, \dots$).

1.1. Фиксация коэффициентов. Используем значения $f_s^{(k-1)}$. Для упрощения временно линеаризуем количество транспортных единиц: $K_{ab} \approx V_{ab}/T$ (точное значение будет восстановлено на этапе постобработки).

1.2. Решение подзадачи выбора маршрутов. При фиксированных f_s решаем целочисленную линейную задачу относительно переменных $y_{i,ab}, x_{ab}, z_i$. Для сетей реальной размерности (десятки узлов, сотни потоков) в качестве исходного будем рассматривать жадный алгоритм: потоки упорядочиваются по убыванию ценности w_i и последовательно назначаются на маршрут, дающий минимальное приращение целевой функции (включая виртуальный вариант «отказ от перевозки»).

1.3. Пересчет загрузок и коэффициентов. По найденному распределению $y_{i,ab}$ вычис-

ляем объемы $L_s^{(k)}$ и новые значения $f_s^{(k)}$ по формуле (5).

1.4. Проверка сходимости. Если

$$\max_s |f_s^{(k)} - f_s^{(k-1)}| < \varepsilon, \quad (8)$$

где $\varepsilon = 0,01$ и множество активных маршрутов стабилизировалось, выходим из цикла. Иначе переходим к итерации $k + 1$.

Шаг 2. Постобработка. Для каждого маршрута P_{ab} , у которого объем перевозок $V_{ab} > 0$, вычисляется точное количество транспортных единиц $K_{ab} = [V_{ab}/T]$. Определяем итоговое значение целевой функции. Формируем выходной отчет: перечень сформированных маршрутов с указанием потребного количества рейсов, распределение грузопотоков по маршрутам, список отклоненных отправок, фактические загрузки узлов L_s и соответствующие коэффициенты f_s .

Предлагаемый алгоритм обладает следующими преимуществами, хотя и не гарантирует глобального оптимума из-за невыпуклости исходной задачи:

1) вычислительная эффективность, связанная с тем, что на каждой итерации решается задача, близкая к транспортной с бинарными решениями;

2) принятие во внимание эффекта обратной связи. Перегрузка транспортных узлов (например, железнодорожных станций) ведет к росту f_s , что на следующей итерации делает переработку на этих станциях более дорогой, и потоки перераспределяются на менее загруженные узлы или отклоняются.

Результаты исследования и их обсуждение

Предложенная методика инвариантна к физической природе грузовой единицы и транспортного средства. Под узлом обработки может пониматься участковая или сортировочная станция, распределительный склад, транспортный терминал, порт перевалки и др. Вместимость транспортной единицы T может соответствовать вагону, контейнеру, контейнеровозу, поезду или партии груза на паллетах. Экономические параметры A, B, E калибруются в соответствии с тарифной политикой и себестоимостью операций в конкретной логистической системе.

Параметр w_i играет ключевую роль в принятии решений об отказе от перевозки в условиях дефицита ресурсов. Поток i включается в план только в том случае, если расчетные затраты на

его транспортировку и обработку оказываются меньше альтернативной стоимости отказа $w_i v_i$. Для служебных, порожних или балансировочных перемещений можно задать $w_i = 0$, что приведет к их автоматическому отклонению при любой положительной стоимости перевозки.

Если загрузка узла L_s превышает его штатную мощность C_s , коэффициент f_s становится больше единицы. На следующей итерации это повышает стоимость обработки в данном узле, что стимулирует алгоритм либо перераспределять потоки на альтернативные, менее загруженные узлы, либо отказываться от низкоценных отправок. Такой подход позволяет имитировать влияние заторов и деградацию производительности сети при пиковых нагрузках.

Выводы

Разработанная методика представляет собой универсальный инструмент оптимизации маршрутизации материальных потоков в логистических сетях с ограниченными ресурсами узлов. Основные научные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. Разработана экономико-математическая модель маршрутизации материальных потоков, отличающаяся от классических постановок (в том числе закрепленных в нормативных документах ОАО «РЖД») одновременным учетом двух факторов: нелинейного роста удельных затрат на обработку при превышении перерабатывающей способности узлов и возможности экономически обоснованного отказа от перевозки низкорентабельных грузовых партий. Это позволяет формировать план перевозок, адекват-

ный реальным условиям возникновения узких мест в инфраструктуре.

2. Предложен итеративный эвристический алгоритм (метод динамической стабилизации), обеспечивающий сходимость решения при нелинейной целевой функции. Алгоритм имитирует обратную связь между загрузкой узлов и стоимостью обработки, что приводит к автоматическому перераспределению потоков на менее загруженные элементы сети или к отсеку наименее ценных грузов.

3. Предложенная методика инвариантна к виду транспорта и типу грузовых единиц, что позволяет применять ее для оперативного планирования в мультимодальных логистических сетях, включающих сортировочные станции, порты, склады и транспортные терминалы. Параметры модели (A, B, E, T) калибруются под конкретную технологию и тарифную политику, а вычислительная схема может быть интегрирована в системы поддержки принятия решений диспетчерского персонала.

4. Практическая значимость работы заключается в создании инструментария, который, в отличие от действующих инструктивных указаний, позволяет не только распределять потоки по сети, но и оценивать экономическую целесообразность освоения всего предъявленного объема перевозок в пиковые периоды. Это дает возможность снизить непроизводительные потери от сверхурочных работ и очередей, а также обосновать инвестиции в расширение перерабатывающей способности инфраструктурных объектов на основе количественного анализа дефицита ресурсов.

Список источников

1. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. New Jersey : Prentice Hall, 1993. 846 p.
2. The Vehicle Routing Problem. Philadelphia : Society for Industrial and Applied Mathematics. 2002. 367 p.
3. Зак Ю. А. Математические модели и алгоритмы построения эффективных маршрутов доставки грузов. Москва : Русайнс, 2024. 304 с.
4. Кочнева Д. И., Высотский С. В. Оценка и прогнозирование потерь в логистической цепи железнодорожных контейнерных перевозок // Известия Транссиба. 2025. № 2 (62). С. 59–66.
5. Правдин Н. В., Дыканюк М. Л., Негрей В. Я. Прогнозирование грузовых потоков. Москва: Транспорт, 1987. 247 с.
6. Правдин Н. В., Дорошко С. В. Расчетные вагонопотоки для разработки плана формирования поездов // Вестник Белорусского государственного университета транспорта : Наука и транспорт. 2016. № 2 (33). С. 26–31.
7. Бородин А. Ф., Батурин А. П., Панин В. В. Организация вагонопотоков. Москва : МИИТ, 2008. 192 с.
8. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах ОАО «РЖД» : утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 2872/р от 29.12.2018. Москва, 2018. 548 с.
9. Шапкин И. Н., Юсипов Р. А., Кожанов Е. М. Нормирование и прогнозирование на железных дорогах (методы, алгоритмы, технологии, расчеты). Москва : ИСПИ РАН, 2007. 255 с.
10. Акулиничев В. М. Организация вагонопотоков. Москва : Транспорт, 1979. 223 с.

11. Иванков А. Н. Совершенствование методов расчета плана формирования поездов : специальность 05.22.08 «Управление процессами перевозок» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Иванков Алексей Николаевич. Москва, 2002. 165 с.
12. Ковалев В. И. Организация вагонопотоков на сети железных дорог России в условиях реформирования отрасли. Санкт-Петербург : Выбор, 2002. 144 с.
13. Порядок применения экономической оценки для автоматизированного расчета плана формирования грузовых поездов : утвержден распоряжением ОАО «РЖД» № 1825/р от 26.08.2020. Москва, 2020. 548 с.
14. Powell W. B. Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality. New York : John Wiley & Sons, 2011. 627 p.
15. Никифорова А. А., Дудакова А. В., Упырь Р. Ю. Параметрическая оценка затрат на накопление состава грузового поезда // Молодая наука Сибири. 2026. № 1 (31). С. 43–48.
16. Упырь Р. Ю., Дудакова А. В. Моделирование работы сервиса быстрого реагирования для обеспечения работы терминально-складских комплексов // Известия Транссиба. 2024. № 2 (58). С. 72–81.

References

1. Ahuja R. K., Magnanti T. L., Orlin J. B. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. New Jersey: Prentice Hall; 1993. 846 p.
2. The Vehicle Routing Problem. Ed. by P. Toth, D. Vigo. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics; 2002. 367 p.
3. Zak Yu. A. Mathematical models and algorithms for constructing efficient cargo delivery routes: textbook. Moscow: Rusains; 2024. 304 p. (In Russ.).
4. Kochneva D. I., Vysotsky S. V. Assessment and forecasting of losses in the logistics chain of railway container transportation. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2025;(62):59–66. (In Russ.).
5. Pravdin N. V., Dykanyuk M. L., Negrey V. Ya. Forecasting freight flows. Moscow: Transport; 1987. 247 p. (In Russ.).
6. Pravdin N. V., Doroshko S. V. Estimated car flows for developing a train formation plan. *Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport*. 2016;(33):26–31. (In Russ.).
7. Borodin A. F., Baturin A. P., Panin V. V. Organization of car flows: textbook. Moscow: MIIT; 2008. 192 p. (In Russ.).
8. Instructional guidelines on the organization of car flows on the railways of Russian Railways. Approved by Order of Russian Railways No. 2872/r dated 29.12.2018. (In Russ.).
9. Shapkin I. N., Yusipov R. A., Kozhanov E. M. Regulation and forecasting on railways (methods, algorithms, technologies, calculations). Moscow: ISPI RAS; 2007. 255 p. (In Russ.).
10. Akulinichev V. M. Organization of car flows. Moscow: Transport; 1979. 223 p. (In Russ.).
11. Ivankov A. N. Improving methods for calculating train formation plans. Specialty 05.22.08 ‘Transportation process managements’: dissertation for the degree of Candidate of Engineering. Moscow; 2002. 165 p. (In Russ.).
12. Kovalev V. I. Organization of car flows on the Russian railway network under industry reform conditions. St. Petersburg: Vybor; 2002. 144 p. (In Russ.).
13. Procedure for applying economic assessment for automated calculation of the freight train formation plan. Approved by Order of Russian Railways No. 1825/r dated 26.08.2020. (In Russ.).
14. Powell W. B. Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality. New York: John Wiley & Sons; 2011. 627 p.
15. Nikiforova A. A., Dudakova A. V., Upyr R. Yu. Parametric assessment of costs for accumulating a freight train composition. *Young Science of Siberia*. 2026;(31):43–48. (In Russ.).
16. Upyr R. Yu., Dudakova, A. V. Modeling the operation of a rapid response service to support terminal and warehouse complexes. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2024;(58):72–81. (In Russ.).

Информация об авторе

Р. Ю. Упырь – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Управление эксплуатационной работой» Иркутского государственного университета путей сообщения.

Information about the author

R. Yu. Upyr – Candidate of Engineering, Associate Professor of the Operational Work Department, Irkutsk State Transport University.

Статья поступила в редакцию 16.04.2026; одобрена после рецензирования 25.05.2026; принята к публикации 05.06.2026.

The article was submitted 16.04.2026; approved after reviewing 25.05.2026; accepted for publication 05.06.2026.