

Баранов О.В.

студент

Научный руководитель: Мищенко А.В., д.э.н.

Технологический университет им. Леонова А.А.

МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕРМОДАЛЬНЫМИ ПЕРЕВОЗКАМИ

Аннотация: В условиях растущей глобализации и конкуренции на рынке, интермодальные перевозки становятся важным звеном в современных логистических системах. Управление грузоперевозками требует особого внимания к маршрутизации и распределению транспортных средств, что усложняется спецификой интермодальности. Данная работа анализирует существующие логико-математические модели маршрутизации и разрабатывает алгоритмы, ориентированные на оптимизацию интермодальной логистики. Будут рассмотрены базовые алгоритмы планирования маршрутов, а также предположены механизмы адаптации к изменениям в объёмах грузопотока. Это позволит улучшить эффективность распределения транспортных ресурсов и повысить целостность логистических операций.

Ключевые слова: интермодальные перевозки, логистика, маршрутизация, распределение транспортных средств, логико-математические модели, транспортная задача, динамическое программирование, оптимизация, грузопоток, алгоритмы планирования.

Baranov O.V.

student Scientific supervisor: Mishchenko A.V., Doctor of Economics,

Technological University named after Leonova A.A.

METHODS FOR OPTIMIZING INTERMODAL TRANSPORTATION MANAGEMENT

Abstract: In the context of growing globalization and competition in the market, intermodal transportation is becoming an important link in modern logistics systems. Cargo transportation management requires special attention to the routing and distribution of vehicles, which is complicated by the specifics of intermodality. This work analyzes existing logical and mathematical routing models and develops algorithms focused on optimizing intermodal logistics. Basic algorithms for route planning will be considered, as well as mechanisms for adapting to changes in cargo traffic volumes. This will improve the efficiency of transport resource allocation and enhance the integrity of logistics operations.

Keywords: intermodal transportation, logistics, routing, distribution of vehicles, logical and mathematical models, transport problem, dynamic programming, optimization, cargo flow, planning algorithms.

Содержание

Введение.....	3
1. Транспортная задача линейного программирования и её модификации.....	4
2. Нахождение оптимального пути методами динамического программирования.....	9
3. Динамическая модель управления транспортными ресурсами операторов интермодальной перевозки.....	10
4. Разработка алгоритма решения поставленной задачи.....	11
Заключение.....	15
Список источников.....	16

Введение

В условиях современного рынка и глобализации экономики интермодальные перевозки становятся ключевым элементом логистических систем, обеспечивая эффективное перемещение грузов с использованием различных видов транспорта.

В управлении грузоперевозками основополагающее значение имеет маршрутизация и рациональное распределение транспортных средств по маршрутам. Специфика интермодальности накладывает на базовую задачу маршрутизации ряд ограничений и дополнительных факторов. В данной работе будет произведён анализ существующих логико-математических моделей маршрутизации и распределение транспортных средств, а также адаптация этих моделей к условиям интермодальной перевозки с целью создать алгоритм, позволяющий рационально управлять интермодальной перевозкой.

В данной работе будут рассмотрены базовые алгоритмы планирования маршрутов транспортных средств без учёта интермодальных переходов и специфики интермодальной логистики. В их числе будут проанализированы следующие задачи:

1. Транспортная задача линейного программирования, в рамках которой приводится алгоритм нахождения пути по сети при условии минимизации определённого критерия (стоимости, длительности или расстояния);

2. Динамическая транспортная задача, в рамках которой будет проанализирован ряд подходов динамического программирования, позволяющих рассчитать оптимальный маршрут для единичных заказов из одного пункта отправления в один пункт назначения, пролегающий через сеть промежуточных узлов.

В данной работе будет составлен логико-математический алгоритм, для нахождения оптимального варианта распределения транспортных средств по ряду маршрутов и разработан механизм компенсационного распределения транспортных средств в случаях колебания объёма грузопотока.

1. Транспортная задача линейного программирования и её модификации

В своём базовом варианте транспортная задача линейного программирования (ЗЛП) состоит в нахождении оптимального маршрута перевозки продукта из пункта отправки в пункт назначения. Формулируется она следующим образом: имеется m пунктов отправки $A_1, A_2, \dots, A_m$, количество которых равно m , из которых однородный продукт должен быть перевезён в пункты назначения $B_1, B_2, \dots, B_n$, количество которых равно n . В пунктах отправки имеется различное количество произведённого продукта, равное соответственно, $a_1, a_2, \dots, a_m$, потребность в этом продукте в пунктах назначения равна, соответственно, $b_1, b_2, \dots, b_n$. Транспортные издержки на перевозку единицы груза из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения составляют c_{ij} ; $c = (c_{ij}, i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$. Через x_{ij} обозначим объём грузов, перевозимый из i -го пункта отправления в j -ый пункт назначения или план перевозок: $x = (x_{ij}, i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$.

Решение выполняется только в «замкнутой» задаче, в которой сумма произведённой продукции в пунктах $A_1, A_2, \dots, A_m$, равна сумме потребностей в пунктах $B_1, B_2, \dots, B_n$:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j. \quad (1)$$

В условиях практики данное условие не может быть выполнено. Поэтому любая «открытая» задача, в которой сумма произведённой продукции больше или меньше спроса, приводится к форме закрытой задачи. Авторы рассмотренных работ [1] предлагают сделать это путём добавления фиктивного потребителя или поставщика x_m с требуемым объёмом ввоза, составляющим

$b_{n+1} = \sum_{i=1}^m a_i - \sum_{j=1}^n b_j$ и нулевыми стоимостями перевозок в этот пункт. В случае превышения суммарных запросов пунктов назначения

над запасами в пунктах отправления, то добавляется фиктивный пункт отправления A_{m+1} с требуемой величиной ввоза $a_{m+1} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i$ и нулевыми

стоимостями перевозок из этого пункта. Возможен также вариант введения переменных Δ_{am} для выражения остатка на складе в точке отправления и Δ_{bm} для выражения объёма превышения спроса над предложением.

Добавив новые неотрицательные переменные типа x_{m+1} , приходим к замкнутой модели транспортной задачи с ограничениями в виде неравенств (2–4). Также параметры задачи можно отобразить в виде базового варианта плана транспортной задачи (Таблица 1).

Таблица 1 – Базовый вариант плана транспортной задачи

Пункты отправления	Пункты назначения				Объём запасы в пункте
	B_1	B_2	...	B_n	
A_1	c_{11}	c_{12}	...	c_{1n}	a_1
A_2	c_{21}	c_{22}	...	c_{2n}	a_2
...	...	...	...	...	...
A_m	c_{m1}	c_{m2}	...	c_{mn}	a_m
	b_1	b_2	...	b_n	

Задача состоит в том, чтобы найти такую комбинацию m и n , при которых функция принимает минимальное значение [1, 2]:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; x_{ij} \geq 0, i=1, \dots, m, j=1, \dots, n; (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq a_i, i=1, \dots, m; (3)$$

$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq b_j, i=1, \dots, n.$ (4) При этом система линейных уравнений должна иметь

решение, число которых равно $m+n$:

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} + \Delta_{a1} = a_1 \\ x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2n} + \Delta_{a2} = a_2 \\ \dots \\ x_{m1} + x_{m2} + \dots + x_{mn} + \Delta_{am} = a_m \\ x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1} + \Delta_{b1} = b_1 \\ x_{12} + x_{22} + \dots + x_{m2} + \Delta_{b2} = b_2 \\ \dots \\ x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn} + \Delta_{bn} = b_n \end{cases} \quad (5)$$

В первой половине системы суммируются объёмы грузов, вывозимых из одной точки отправления в направлении каждой точки назначения. При этом объём вывезенных грузов в направлениях $j=1, 2, \dots, n$ должен соответствовать объёму запасов на каждой из точек отправки $i=1, 2, \dots, m$. Во второй части системы происходит сложение объёма товаров, привозимых в точку $j=1, 2, \dots, n$ из точек $i=1, 2, \dots, m$, при этом объём привозимых товаров должен соответствовать потребности.

Данная задача решается методом нахождения начальной крайней точки. Этот метод предполагает вычисление трёх базовых алгоритмов развоза груза и сравнение их методом потенциалов. Наиболее простой метод построения опорного плана – «метод северо-западного угла».

Этап 1. В рамках первого этапа берётся вышеописанная матрица, а также пустая матрица, клетки которой можно обозначить K_{mn} . Заполнение пустых клеток начинается с левой верхней, которая соответствует первому поставщику и первому потребителю. Если $a_1 \geq b_1$, в клетку записывают число, равное b_1 . Если $a_1 < b_1$, то первый потребитель удовлетворён, и первый столбец исключается из алгоритма. Далее алгоритм переходит к клетке K_{12} , то есть первому поставщику и второму потребителю. Если $a_1 - b_1 - b_2 > 0$, в клетку записывается число, равное $a_1 - b_1$. После этого деактивируется второй столбец. Алгоритм следует до истощения запасов во всех отправных точках, либо до удовлетворения потребности всех точек назначения. Заполненная таблица содержит $m+n-1$ занятых клеток,

поскольку любое введённое значение деактивирует либо столбец, либо строку, за исключением последнего при введении которого деактивируется как столбец, так и строка.

Этап 2 (минимум по строке). В рамках данного этапа в первой строке платёжной матрицы берётся минимальный по величине элемент. Для данного элемента назначается максимально допустимая перевозка, определяемая либо потребностью точки спроса, либо запасом – точки предложения. Строка (или столбец), израсходовавшие свой потенциал, вычеркиваются.

Данный алгоритм выдаёт лишь объём перевозки между точками, без учёта расстояний, стоимости и времени. Эта проблема устраняется на следующем этапе метода, называемом «минимум по матрице». В качестве «стоимости» ячеек матрицы записывается один из необходимых параметров – стоимость перевозки, расстояние или время.

Этап 3 (минимум по матрице). В матрице выбираем минимальный элемент. Пусть $\min c_{ij} = c_{i_0 j_0}$. Для этого элемента назначается максимально возможный объём перевозки из пункта A_{i_0} в пункт B_{j_0} . Если одна и та же стоимость перевозки достигается на двух элементах и более, из них выбирается любой. Таким образом полностью обслуживается один (или несколько) пунктов назначения. Аналогично этапу 1, столбцы и строки, израсходовавшие свой запас, или удовлетворившие свой спрос, вычёркиваются. Отличие заключается лишь в том, что каждое последующее значение берётся исходя из минимума по всей матрице.

На завершающем этапе алгоритма происходит анализ результатов предыдущих этапов, и построение матрицы потенциалов.

Этап 4 (метод потенциалов). Данный метод выполняется по следующим шагам:

1. Приведение задачи к замкнутой модели.
2. Построение базового плана, состоящего из $m+n-1$ элементов.
3. Для элементов базисного плана определяется система потенциалов $\alpha_i (i=1, 2, \dots, m)$ и $\beta_j (j=1, 2, \dots, n)$ при условии, что $c_{ij} = \alpha_i + \beta_j$. Значению фиктивного

поставщика или потребителя присваивается значение потенциала, равное 0.

4. Исследование системы потенциалов на оптимальность. Систему можно считать оптимальной, если для незанятых ячеек выполняется условие $c_{ij} - (\alpha_i + \beta_j) \geq 0$. Разность $c_{ij} - (\alpha_i + \beta_j)$ обозначается как l_{ij} и вычисляется для всех свободных клеток. Находится клетка с наибольшим абсолютным значением, то есть с наибольшим нарушением «оптимальности».

5. Построение замкнутого маршрута по занятым ячейкам начиная с ячейки с наибольшим нарушением оптимальности. Переход к следующей клетке осуществляется только по вертикали и горизонтали.

6. В каждом из углов построенного маршрута (или его участка) проставляются знаки «+» или «-», начиная с ячейки с наибольшим нарушением оптимальности, которой присваивается «+». Из ячеек со знаком «-» находится наименьшая поставка.

7. Найденная наименьшая поставка прибавляется в ячейки, помеченные знаком «+» и вычитается из ячеек со знаком «-». Таким образом создаётся очередной вариант плана.

8. Новый вариант плана снова проверяется на оптимальность. Этот процесс продолжается до тех пор, пока все клетки не будут удовлетворять условию $c_{ij} - (\alpha_i + \beta_j) \geq 0$.

На выходе описанного алгоритма будет комбинация A и B , образующие маршрут, для которого издержки перевозки минимальны. Практические примеры применения этого алгоритма присутствуют в работах Бартеньева, Кошарова, Байкалова [2, 3].

Развитием идеи базового варианта транспортной задачи является задача нахождения максимального потока минимальной стоимости в транспортных сетях [4]. В литературе подобные задачи широко освещены такими авторами, как Форд, Крисофидес, Майника [5-7]. Однако эти авторы рассматривали задачу в статистическом виде, что неприменимо к условиям современного рынка. На параметры, учитываемые в задаче, могут влиять ремонтные работы на пути, колебания цен на топливо, пробки и иные эндогенные и экзогенные факторы.

Поэтому возникла необходимость рассмотрения задачи в динамическом варианте, что и было сделано такими авторами, как Розенберг, Мищенко и Косоруков [8, 9].

2. Нахождение оптимального пути методами динамического программирования

В предыдущем пункте рассмотрены методы линейного программирования, позволяющие найти оптимальный маршрут развоза гомогенных заказов по сети, состоящей из нескольких пунктов отправления и нескольких пунктов назначения. В данной части будет проанализирован ряд подходов динамического программирования, позволяющих рассчитать оптимальный маршрут для единичных заказов из одного пункта отправления в один пункт назначения, пролегающий через сеть промежуточных узлов, что более актуально для интермодальной логистики. Материалы по динамическому программированию взяты в трудах Косорукова, Мищенко, Александрова, Якушева [9, 10].

Динамическое программирование является подходом, позволяющим решить многие оптимизационные задачи. В большинстве приложений динамическое программирование получает оптимальное решение путём движения в обратном направлении – от конца к началу. Суть метода заключается в замещении задачи большой размерности серией задач меньшей размерности.

Основная рекуррентная формула метода динамического программирования может быть записана следующим образом:

$$f_t(i) = \min \left\{ \begin{array}{l} (\text{стоимость шага } t) + f_{t+1} \\ (\text{новое состояние перед шагом } t+1) \end{array} \right\}, \quad (6)$$

где минимальное значение берётся по всем возможным решениям в ситуации, когда система на шаге t находится в состоянии i . Таким образом, соотношение (6) отражает тот факт, что затраты, необходимые, чтобы от шага t дойти до конца задачи, минимальны при минимизации суммы затрат самого шага t и минимальных затрат, необходимых для того, чтобы от шага $t+1$ дойти до конца задачи.

Корректность соотношения (6) зависит от трёх обстоятельств:

1. Корректной спецификации набора шагов на этапе t из состояний.
2. Корректного определения зависимости текущих затрат на этапе t от значения t , текущего состояния и решения, принятого на этапе t .
3. Верного определения зависимости состояния на этапе $t+1$ от значения t , решения, принятого на этапе t и состояния на этапе t .

На выходе приведённого алгоритма формируется маршрут доставки грузовой единицы. На практике грузовые единицы, чаще всего, стандартизируемы, что означает, что полученный маршрут будет равнооптимален также и для других грузовых единиц. Сформированная группа грузовых единиц называется партией. Передвижение партией может происходить по нескольким маршрутам одновременно, учитывая характеристики товара и требования к перевозке, касающиеся времени, стоимости и расстояния.

3. Динамическая модель управления транспортными ресурсами операторов интермодальной перевозки

Динамическая модель управления транспортными ресурсами заключается в задаче нахождения оптимального варианта распределения ограниченного парка транспортных средств по конечному числу маршрутов, минимизируя при этом общие времени на обслуживание и минимизируя объём запасов в каждом из узлов, в которых может производиться дозагрузка и частичная выгрузка единиц. Необходимость решения данной задачи обусловлена ростом времени ожидания грузов на станциях вычисленного маршрута, который носит

нелинейный характер в случае, если количество свободных мест на прибывающих транспортных средствах меньше, чем количество грузовых единиц, готовых к перевозке. Это, в свою очередь, вызывает рост затрат на их хранение и повышенную нагрузку на иные звенья цепи поставок, эффект от которой растёт. Избежать этого позволяет организация системы быстрого реагирования на изменения объёма грузовых потоков и рациональное перераспределение транспортных средств. Таким образом, в следующем разделе будет решена задача по разработке логико-математического аппарата для нахождения оптимального варианта распределения транспортных средств по ряду маршрутов.

4. Разработка алгоритма решения поставленной задачи

В данной части рассматривается задача, целью которой является нахождение оптимального варианта распределения транспортных средств в количестве n единиц, имеющих в распоряжении оператора интермодальной перевозки по конечному числу маршрутов m . Предполагается, что количество транспортных средств n больше, чем количество маршрутов m . Алгоритм основывается на трудах Мищенко А.В. и Ивановой А.В. [11].

Через $U_{ab}^i(t)$ обозначается интенсивность поступления грузовых единиц на станцию загрузки-выгрузки a , следующих до станции b маршрута i), где m_i – число остановок на маршруте i . Через $q_a^i(t)$ обозначается интенсивность обслуживания грузовых единиц на станции a маршрута i в момент времени t . Под интенсивностью обслуживания понимается число грузовых единиц, забранных со станции в единицу времени.

Так как данная задача является динамической, то состояние системы должны быть описано во все моменты времени. Так, параметр интенсивности обслуживания $q_a^i(t)$:

- равен 0, если транспортное средство отсутствует на станции;
- равен числу погруженных на транспортное средство грузовых единиц, поделённому на время нахождения транспортного средства на станции.

В свою очередь при условии отсутствия технических, временных и иных

ситуационных ограничений, количество грузовых единиц, погруженных на транспортное средство:

- равно числу грузовых единиц, ожидавших погрузки;
- равно числу свободных мест в транспортном средстве, освободившихся после выгрузки груза на станции.

Исходя из вышеизложенного, интенсивность обслуживания грузопотока определяется по формуле:

$$q_a^i(t) = \begin{cases} 0, \text{ если } t \in [t_{ai}^{j1}; t_{ai}^{j2}] \\ \frac{1}{t_{ai}^{j2} - t_{ai}^{j1}} \min \{ V_a^i(t_{ai}^{j2}); B_a^i(t_{ai}^{j2}) \}, \text{ если } t \in [t_{ai}^{j1}; t_{ai}^{j2}], \\ j = 1, \dots, M \end{cases} \quad (7)$$

где M – число транспортных средств, проходящих через станцию a маршрута i на исследуемом моменте времени; t_{ai}^{j1} – момент прибытия транспортного средства j на станцию a маршрута i ; t_{ai}^{j2} – момент отправления транспортного средства j со станции a маршрута i ; $V_a^i(t_{ai}^{j2})$ – количество грузовых единиц, ожидающих отправление на станцию a маршрута i в момент времени $t \in (0; T)$.

$V_a^i(t)$ – количество грузовых единиц, ожидающих отправления на станцию a маршрута i в момент времени $t \in (0; T)$. Параметр $V_a^i(t)$ в любой момент времени определяется разностью между интенсивностью поступления грузовых единиц и интенсивностью обслуживания:

$$\frac{dV_a^i(t)}{dt} = U_a^i(t) - q_a^i(t), a = 1, \dots, m_i; i = 1, \dots, m, \quad (8)$$

где $U_a^i(t)$ – интенсивность поступления грузовых единиц на станцию a маршрута i , вычисляемая посредством суммирования грузовых единиц, поступающих на эту станцию в направлении всех прочих станций:

$$U_a(t) = \sum U_{\alpha\beta}(t). \quad (9)$$

$B_a^i(t_{ai}^{j2})$ – количество грузовых мест в транспортном средстве j маршрута i , прибывшего на станцию a после выгрузки грузовых единиц на данной станции. Его можно получить, если из вместимости судна вычесть число грузовых единиц, загруженных в него на всех предыдущих станциях. Сумма интегралов интенсивности обслуживания грузов на предыдущих остановках умножается на долю грузов, пунктом назначения которых являлась остановка a в общем объёме грузов, которые были готовы к отгрузке на всех станциях маршрута, предшествующих a .

$$B_a^i(t_{ai}^{j2}) = W_{\text{судна}} - \sum_{k=1}^{n_{i,j}} \frac{V_{k,i}}{V_{i,j}} \times \int_0^{t_{ai}^{j2}} a_k^i(t) dt. (1)$$

где W_{TC} – вместимость транспортного средства; $V^{ji}(t_{ki}^{j1})$ – количество грузовых единиц, готовых к отправке со станции k маршрута i , маршрут которой заканчивается складом a в момент прибытия транспортного средства j на эту станцию, при котором $k=1, \dots, a-1$. $V_k^i(t_{ki}^{j1})$ – количество грузовых единиц, готовых к отгрузке на станции k маршрута i в момент прибытия на них транспортного средства j ; $[t_{ki}^{j1}; t_{ki}^{j2}]$ – интервал времени пребывания транспортного средства j на остановке k маршрута i .

В основе задачи лежит условие, что первый груз, сформированный на станции комплектации, обслуживается (то есть, загружается) на транспортное средство в первую очередь, то есть, по дисциплине FIFO. Время ожидания для каждого контейнера, сформированного на остановке a маршрута i обозначается как $T_a^i(t)$. Следует отметить, что $T_a^i(t)$ равен разности времени отправления транспортного средства j и времени отправления предыдущего транспортного средства $(j-1)$: $T_a^i(t) = t_{ki}^{j2} - t_{ki}^{(j-1)2}$. При условии соблюдения дисциплины FIFO.

Далее с учётом выведенных ранее зависимостей следует сформулировать задачу оптимального распределения транспортных средств. Она состоит в том, чтобы распределить транспортные средства по вычисленным маршрутам таким образом, чтобы минимизировать общее время ожидания грузов на станциях, а также свести к минимуму количество грузовых единиц, время ожидания погрузки которых превышает некоторое критическое значение $\tau_{\text{пр}}$.

Данная задача включает в себя два критерия оптимизации – время ожидания и количество грузовых единиц. Для начала следует описать задачу минимизации времени ожидания. В её рамках необходимо минимизировать:

$$\min \sum_{a \in A} \sum_{i=1}^{m_i} T_a^i(a_i, t) \times U_a^i dt, (11)$$

где A – число возможных вариантов распределения транспортных средств по маршрутам; $T_a^i(a_i, t)$ – время нахождения готовых к отгрузке грузовых единиц на станции a при условии, что на маршрут i выделено a_i транспортных средств; $U_a^i(t)$ – интенсивность поступления грузовых единиц на станцию a маршрута i .

При ограничениях:

$$\sum_{i=1}^m a_i = n; a_i \geq 1; i = 1, \dots, m, (12)$$

$$\int_0^T q'_n(a_i, t) dt = \int_0^T U'_n(t) dt; i =$$

Грузовая единица поступает на остановку a маршрута i в момент времени t , при условии, что распределение транспортных средств задано вектором $a = (a_1, \dots, a_m)$; t_0, T – интервал, в течение которого планируется распределения транспортных средств для перевозки грузов; интенсивность погрузки грузовых единиц на транспортное средство на станции a маршрута i , при условии, что на маршрут i выделено a_i транспортных средств.

Таким образом, целевая функция (9) в рассматриваемой модели задаёт суммарное время ожидания грузовых единиц на всех остановках всех маршрутов на интервале времени $(0; T)$. При этом различные допустимые варианты распределения транспортных средств по маршрутам заданы множеством A . Условие (10) означает, что число всех распределяемых по маршрутам транспортных средств ограничено и равно m .

Заключение

Анализ существующих логико-математических моделей маршрутизации показал, что стандартные подходы, такие как транспортная задача линейного программирования и динамическая транспортная задача, требуют адаптации для учета специфики интермодальной логистики. Разработанный в работе алгоритм оптимального распределения транспортных средств позволяет эффективно управлять грузоперевозками с учетом динамики объемов грузопотока. Включение механизмов компенсационного распределения позволяет снизить риски, связанные с колебаниями в спросе и предложении. Использование предложенных моделей может значительно повысить эффективность логистических процессов, что крайне актуально в условиях глобализации экономики. Результаты работы могут стать основой для практического внедрения адаптированных алгоритмов в систему управления грузоперевозками и способствовать снижению издержек на логистику в целом.

Список источников

1. Бартеньев А.П., Кошаров Н.Н. Транспортная задача линейного программирования. Мичуринск: Мичуринск-наукоград РФ, 2006.
2. Галеев Э.М., Тихомиров В.М. Оптимизация: теория, примеры, задачи. Москва: Элиториал УРСС, 2012.
3. Байкалов В.В. Организация работы речного флота в транспортной системе «Енисей – Северный Морской путь». – Новосибирск: Новосибирская государственная академия водного транспорта, 2006.
4. Боженюк А.В., Герасименко Е.М. Разработка алгоритма нахождения максимального потока минимальной стоимости в нечёткой динамической транспортной сети. Москва: Научный мир, 2012.
5. Форд Л.Р., Фалкерсон Д.Р. Потoki в сетях. Москва: Мир, 1966.
6. Крисофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. Москва: Мир, 1978.
7. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. Москва: Мир, 1981.
8. Боженюк А., Герасименко Е., Розенберг И. Задача нахождения потока с минимальными затратами в транспортных сетях в нечётких условиях. Москва: Мир, 2007.
9. Косоруков О.А., Мищенко А.В. Исследование операций. Москва: Экзамен, 2012.
10. Александров А.Э., Якушев Н.В. Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом случайного разброса времени доставки и времени потребления. Москва: ИПУ РАН, 2006.
11. Мищенко А.В., Иванова А.В. Оптимизационные модели управления ресурсами в логистике. Москва: ИНФРА-М, 2023.