

УДК 33

DOI: 10.34670/AR.2023.70.98.012

Определение оптимального местоположения множества складов в контексте зеленой цепи поставок

Бочкарев Андрей Александрович

Доктор экономических наук, доцент,
профессор кафедры логистики и управления цепями поставок,
Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30-32, А;
e-mail: andreibochkarev4@gmail.com

Фу Циаций

Аспирант,
Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
191023, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
наб. канала Грибоедова, 30-32, А;
e-mail: 5680860107@163.com

Аннотация

В статье рассматривается проблема определения оптимального местоположения множества складов в зеленой цепи поставок, т.е. такой цепи поставок, в которой минимизируются загрязнения окружающей среды. В контексте рассматриваемой проблемы наиболее актуальной задачей является снижение выбросов диоксида углерода CO_2 от автотранспорта, осуществляющего доставку товаров со складов конечным потребителям. Представлен обзор литературы по методам решения задачи определения оптимального местоположения множества складов, дана математическая постановка и представлены результаты численного решения трехкритериальной транспортно-складской задачи на примере российской компании сферы DIY-ритейла. Проведенный анализ работ по проблеме определения оптимального местоположения множества складов в контексте зеленой цепи поставок показал высокую актуальность данного направления исследований. В качестве примера дана математическая постановка и представлены результаты численного решения трехкритериальной транспортно-складской задачи на реальном примере российской компании сферы DIY-ритейла. Ввиду большой размерности данной задачи ее решение получено в системе компьютерной математики MATLAB. Показано, что в результате оптимального прикрепления регионов доставки к распределительным центрам и соответственно вследствие сокращения пробега автотранспорта эмиссия выбросов в атмосферу CO_2 может быть снижена на 30%.

Для цитирования в научных исследованиях

Бочкарев А.А., Фу Циаций. Определение оптимального местоположения множества складов в контексте зеленой цепи поставок // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2023. Том 13. № 7А. С. 110-138. DOI: 10.34670/AR.2023.70.98.012

Ключевые слова

Зеленая цепь поставок, проблема определения местоположения множества складов, смешанное целочисленное линейное программирование, оптимальность, ритейл.

Введение

Сеть цепочки поставок представляет собой интегрированную систему взаимосвязанных процессов, которые направлены на приобретение сырья для производства продуктов, их разработку и оценку, а также распространение продуктов среди клиентов и конечных пунктов назначения для потребительских товаров. Поэтому в целом компоненты сети поставок можно разделить на категории поставщиков, производителей, дистрибьюторов, посредников и розничных продавцов. Основной целью этой цепочки является снижение затрат, повышение эффективности и результативности и, в конечном итоге, увеличение прибыли для всех заинтересованных сторон. Одним из наиболее важных стратегических решений при проектировании сети цепочки поставок является расположение распределительных центров или складов. Распределительные центры или склады относятся к уровням, непосредственно связанным с конечными потребителями, и их размещение в соответствующих местах приведет к созданию эффективной цепочки поставок. При разработке классических моделей размещения складов в цепи поставок обычно стримятся размещать объекты таким образом, чтобы обеспечить наименьшие затраты. Поэтому одним из важных влияющих факторов в этом направлении являются транспортные расходы, которые будут различаться в зависимости от расстояния между объектами.

Сегодня ученые разных стран мира единодушны в том, что загрязнение окружающей среды и выброс парниковых газов, которые разрушают озоновый слой и делают климат на Земле теплее, ставят под угрозу жизнь человека. Транспорт является одним из основных источников загрязнений окружающей среды, все виды транспорта в сумме отвечают более чем за 16% всех выбросов парниковых газов в мире. Из этих транспортных выбросов основную долю составляют выбросы автомобилями – 11,9%, за ними с большим отрывом следуют авиация – 1,9%, водный транспорт – 1,7%, железные дороги – 0,4% и трубопроводный транспорт – 0,3%. Выбросы парниковых газов транспортом неуклонно растут почти во всех странах, причем значительно быстрее, чем выбросы в других секторах экономики. К 2040 году ожидается удвоение числа автомобилей в мире. Поэтому задача декарбонизации транспорта (такая трансформация транспорта, при которой выбросы углекислого газа транспортом прекращаются) является особенно актуальной. Следует отметить, что при решении проблемы декарбонизации транспорта нужно учитывать все элементы транспортной инфраструктуры и весь их жизненный цикл. По нашему мнению, для сокращения выбросов парниковых газов от автотранспорта следует активнее применять различные методы оптимизации сетевой структуры цепи поставок и, в частности, методы определения оптимального местоположения множества складов в цепи поставок.

Ниже представлен обзор литературы по методам решения задачи определения оптимального местоположения множества складов в цепи поставок, дана математическая постановка и представлены результаты численного решения трехкритериальной транспортно-складской задачи на примере российской компании сферы DIY-ритейла.

Обзор литературы по проблеме определения оптимального местоположения множества складов в контексте зеленой цепи поставок

Задача определения множества складов (англ. *multi depot location-allocation problem*) в цепи поставок, которая в российской научной литературе получила название транспортно-складской задачи, является одной из актуальных задач логистики. На самом деле имеется широкий класс задач этого типа. Классификация различных типов задач о размещении складов, связанная с накладываемыми на ее решение ограничениями, может быть представлена следующим образом:

- переменные модели: дискретные, непрерывные;
- складские затраты: фиксированные, переменные.
- метод определения количества складов: экзогенный, эндогенный.
- количества продуктов: единственный продукт, несколько продуктов.
- количества периодов: однопериодная модель, многопериодная модель.
- пропускная способность складов: неограниченная, ограниченная.
- ограничение на связи между складами и клиентами: каждый склад может обслуживать неограниченное число клиентов, каждый склад может обслуживать только ограниченное число клиентов.

Цель решения данной задачи состоит в том, чтобы минимизировать общую стоимость расположения складов в пунктах-кандидатах и минимизировать транспортные затраты путем оптимального прикрепления клиентов к складам.

В 1958 году была опубликована статья с названием «A warehouse-location problem» [William, 1958], в которой впервые была дана математическая постановка данной задачи. В предложенной авторами математической модели фиксированные затраты на открытие склада не рассматриваются и, следовательно, задача определения оптимального местоположения множества складов преобразуется в транспортную задачу линейного программирования.

В математической модели данной задачи принимаются следующие допущения: задача определения местоположения рассматривается как дискретная задача; пропускная способность складов ограниченная; каждый склад может обслуживать неограниченное число клиентов; транспортные расходы являются функцией от количества транспортируемой продукции (товаров); количество складов не должно быть больше количества пунктов-кандидатов; потребность каждого клиента должна быть известна и клиенты должны быть распределены по складам.

Исходные данные модели и переменные решения:

$i = 1, 2, \dots, m$ – индексы поставщиков (заводов);

$j = 1, 2, \dots, n$ – индексы складов;

$k = 1, 2, \dots, q$ – индексы потребителей (ритейлеров);

$c_{i,j,k}$ – стоимость отгрузки от i -го поставщика до k -го потребителя через j -й склад, включая соответствующую стоимость хранения запасов;

Q_i – предложение i -го поставщика;

R_j – вместимость j -го склада;

S_k – спрос k -го потребителя;

$x_{i,j,k}$ – переменная – количество продукции (товаров), отгруженное потребителю k с завода i через склад j .

$a_{i,j,k}$ – переменная – количество запасов, которые остались на складе j , при величине поставок $x_{i,j,k}$.

Требуется найти значения неотрицательных переменных $x_{i,j,k}$ и $a_{i,j,k}$, минимизирующих общие затраты, т.е. затраты на доставку и затраты на хранения запасов

$$Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q c_{i,j,k} x_{i,j,k} \rightarrow \min; \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q x_{i,j,k} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^q a_{i,j,k} x_{i,j,k} \leq R_j, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{i,j,k} = S_k, \quad k = 1, 2, \dots, q; \quad (4)$$

$$x_{i,j,k} \geq 0, \quad \forall i, j, k. \quad (5)$$

$$a_{i,j,k} \geq 0, \quad \forall i, j, k. \quad (6)$$

Ограничения (2) требуют, чтобы вся продукция (все товары) поставщиков были отгружены потребителям. Ограничения (3) требуют, чтобы не были превышены ограничения по вместимости складов. Ограничения (4) требуют удовлетворения потребностей всех потребителей. Ограничения (5) и (6) указывают на неотрицательность переменных $x_{i,j,k}$ и $a_{i,j,k}$.

Сходство модели (1)–(6) со стандартной транспортной задачей очевидно и отличий всего три:

возможная нелинейность целевой функции (1);

наличие ограничений по вместимости складов (3);

необходимость в трехиндексной записи для переменных $x_{i,j,k}$ и $a_{i,j,k}$.

Следует отметить, что нелинейность целевой функции при решении данной задачи может игнорироваться. Ограничения по емкости (вместимости) склада также можно игнорировать, поскольку рассматриваемая фокусная компания практически всегда может взять в аренду необходимую величину складского пространства, доступного в любом месте. Трехиндексная нотация переменных в данной задаче является тривиальным вопросом в теории линейного программирования, который решается путем преобразования ее в двухиндексную задачу.

Фиксированные складские затраты были введены в математическую модель в работе [Akinc, 1977]. Все предположения в этой задаче аналогичны предыдущему случаю; единственная разница – учет фиксированной стоимости размещения складов в конкретных пунктах-кандидатах.

В работе [Geoffrion, 2021] представлен классический пример применения смешанного целочисленного линейного программирования к проблеме определения оптимального местоположения множества складов в цепи поставок.

Содержательная постановка задачи о размещении центров распределения формулируется следующим образом: дистрибьюторская компания должна создать сеть распределительных центров, из которых она будет поставлять свою продукцию на свои рынки с целью удовлетворения прогнозируемого спроса на следующий календарный период планирования (например, год). Цель – минимизировать сумму складских и транспортных издержек при поддержании приемлемого уровня обслуживания покупателей. Несмотря на то, что данная задача является задачей стратегического планирования, предполагается, что спрос на следующий год известен и постоянен.

Рассмотрим математическую постановку задачи. Определим двоичные переменные решения y_j и положим $y_j = 1$, если склад j арендуется и $y_j = 0$ – нет, $j = 1, \dots, n$.

Введем следующие обозначения коэффициентов переменных модели линейного программирования:

R_j – ежемесячная стоимость аренды j -го склада;

$x_{i,j}$ – количество автофургонов, отправленных со склада j в регион i ;

$c_{i,j}$ – средние транспортные издержки на отправку одного автофургона со склада j в регион i ;

S_j – пропускная способность (мощность) j -го склада;

D_i – спрос i -го региона (рынка).

Теперь создадим модель, построив сначала целевую функцию. Выражение $c_{1,1}x_{1,1} + \dots + c_{m,n}x_{m,n}$ отражает полные затраты, связанные с отправкой фургонов, а $R_1y_1 + \dots + R_ny_n$ – это полная стоимость аренды складов. Таким образом, целевую функцию и ограничения можно представить следующим образом.

Найти минимум целевой функции

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{i,j}x_{i,j} + \sum_{j=1}^n R_j y_j \rightarrow \min; \quad (7)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^n x_{i,j} \leq \sum_{i=1}^n S_j y_j, j = 1, \dots, n; \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i,j} = D_i, i = 1, \dots, m; \quad (9)$$

$$x_{i,j} \geq 0, i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$x_{i,j} - \text{целое}; \quad (11)$$

$$y_j \in \{0,1\}, j = 1, \dots, n. \quad (12)$$

Ограничения вида (8) – это ограничения по пропускной способности (мощности) складов. Если $y_j = 0$, то со склада j невозможно отправить ни один автофургон. Ограничения вида (9) гарантирует удовлетворение спроса в i -м регионе. Ограничения (10) и (11) – традиционные для классической транспортной задачи ограничения на неотрицательность и целочисленность переменных $x_{i,j}$. Ограничения (12) указывают, что переменная y_j должна быть двоичной. Графически данная модель представлена на рис. 1.

Математическая модель транспортно-складской задачи относится к группе интегрированных моделей цепей поставок и содержит две подмодели: транспортную модель и складскую модель или модель выбора варианта размещения склада. Ввиду того, что переменные y_j являются булевыми переменными, а переменные $x_{i,j}$ – целочисленными, данная задача к классу задач смешанного целочисленного линейного программирования.

Проблема определения оптимального местоположения множества складов в цепи поставок в контексте зеленой логистики привлекла внимание ученых как российских, так и зарубежных только в последние 10 – 12 лет. Как правило, в контексте зеленой логистики рассматриваются работы, посвященные цепям поставок замкнутого цикла, т.е. цепям поставок, включающим как прямой, так и обратный потоки. В табл. 1 представлено краткое резюме обзора литературы по данной проблеме за период с 2019 по 2023 годы. В табл. 1 символом «✓» обозначено использование в модели соответствующих параметров, ограничений и методов решения задачи, а символом «→» – отсутствие данного параметра, ограничения или метода решения задачи в рассматриваемой работе.

Анализ работ проводился с точки зрения структуры моделей, накладываемых ограничений, интегрированности этих моделей с задачами выбора транспорта и маршрутизации, учета неопределенностей (например, возможных задержек при доставке продукции) и наличия примера численного решения задачи с использованием реальных данных.

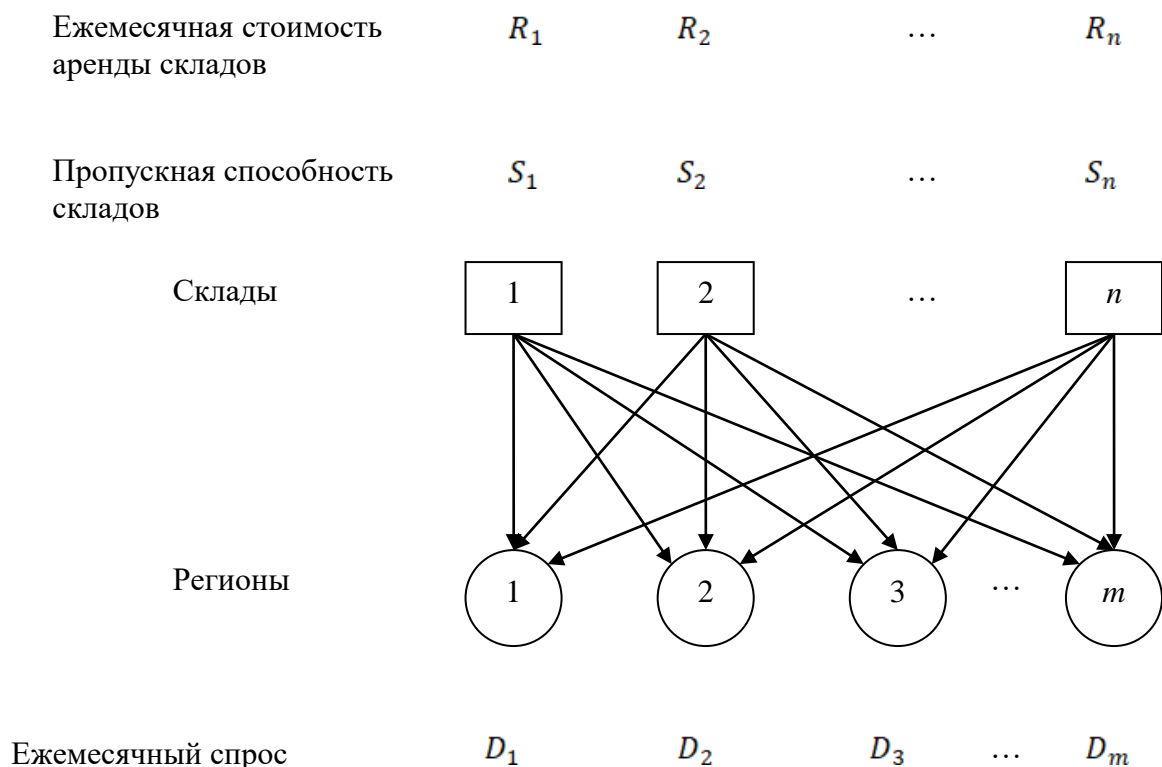


Рисунок 1 - Граф транспортно-складской задачи

Таблица 1 - Анализ статей по проблеме определения оптимального местоположения множества складов в цепи поставок в контексте зеленой логистики за период с 2019 по 2023 годы

Авторы	Структура модели			Потоки в сети		Интеграция модели с задачей маршрутизации, учет неопределенностей и метод решения задачи								Пример из практики
	Многоцелевая	Многоуровневая	Многопериодная	Прямой	Возвратный	Проблема маршрутизации	Неопределенность	МЛР	Эвристика	Метаэвристика	Симуляция	Декомпозиция	Другое	
Govindan et al. [Govindan, 2023]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	✓
Tavana et al. [Tavana, 2022]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–
Salehi-Amiri et al. [Salehi-Amiri, 2022]	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	✓	–	–	–	–	–	✓
Alp et al. [Alp, 2022]	–	–	–	✓	–	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–
Alfandari et al. [Alfandari, 2022]	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓	–	–	–	✓	–	–
Nageswara Reddy et al. [Nageswara Reddy, 2022]	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–

Авторы	Структура модели			Потоки в сети		Интеграция модели с задачей маршрутизации, учет неопределенностей и метод решения задачи								Пример из практики
	Многоцелевая	Многоуровневая	Многопериодная	Прямой	Возвратный	Проблема маршрутизации	Неопределенность	МILP	Эвристика	Метаэвристика	Симуляция	Декомпозиция	Другое	
Wang et al. [Wang, 2022]	–	✓	–	✓	–	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–
Yazdekhasti et al. [Yazdekhasti, 2022]	–	✓	–	✓	–	–	✓	–	–	✓	✓	–	–	–
Arnau et al. [Arnau, 2022]	–	✓	–	✓	–	–	✓	✓	✓	–	✓	–	–	–
Nasr et al. [Nasr, 2021]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	✓
Emamian et al. [Emamian, 2021]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	–	–	–	–	–	–
Van der Heide et al. [Van der Heide, 2021]	–	–	–	✓	–	✓	✓	–	–	–	–	–	✓	–
Frank et al. [Frank, 2021]	–	✓	–	✓	–	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–
Raa and Aouam [Raa, 2021]	–	✓	–	✓	–	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	–
Ma et al. [Ma, 2021]	✓	✓	–	✓	–	✓	✓	–	–	–	–	–	✓	–
Daroudi et al. [Daroudi, 2021]	–	–	–	✓	–	–	✓	–	–	–	✓	–	–	–
Sadeghi Ahangar et al. [Sadeghi Ahangar, 2021]	–	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	–	–	–	–	–	✓
Govindan et al. [Govindan, 2020]	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–	✓
Nayeri et al. [Nayeri, 2020]	✓	✓	–	✓	✓	–	✓	✓	–	–	–	–	–	–
Brandao [Brandao, 2020]	–	–	–	✓	–	✓	✓	–	✓	✓	–	–	–	–
Almouhanna et al. [Almouhanna, 2020]	–	✓	–	✓	–	✓	✓	–	✓	–	–	–	–	–
Mardan et al. [Mardan, 2019]	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	✓	–	–	–	–	–	✓
Zhen et al. [Zhen, 2019]	✓	✓	–	✓	✓	–	✓	✓	–	–	–	–	–	✓
Yavari and Geraeli [Yavari, 2019]	✓	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓	–	–	–	–	–	–
Reihaneh and Ghoniem [Reihaneh, 2019]	–	✓	–	✓	–	✓	✓	✓	✓	–	–	–	–	–
Rabbani et al. [Rabbani, 2019]	–	✓	–	✓	–	✓	✓	–	✓	–	✓	–	–	–
Ghasemi et al. [Ghasemi, 2019]	✓	✓	–	✓	–	✓	✓	–	✓	–	–	–	✓	–
Lin et al. [Lin, 2019]	✓	✓	–	✓	–	–	✓	–	✓	–	–	–	–	–

Анализ данных работ показывает, что с точки зрения структуры большинство из представленных в них моделей являются многоуровневыми (85,71%), т.е. включают в себя производителей, потребителей, склады, депо и прочие узлы, и примерно половина из них являются многоцелевыми (46,43%).

Менее половины рассмотренных моделей (42,86%) включают в себя как прямой, так и

возвратный материальный поток. В большинстве моделей (64,29%) вместе с проблемой определения оптимального местоположения множества складов в цепи поставок рассматривается проблема маршрутизации, т.е. рассматривается интегрированная модель цепи поставок.

Неопределенности в том или ином виде включают подавляющее большинство (85,71%) рассмотренных моделей. Чаще всего рассматриваются неопределенный спрос или неопределенное предложение, но неопределенностями также могут выступать такие характеристики как, например, бэкордера (заказы, которые невозможно выполнить в данный период в связи с отсутствием необходимого товара) и другие.

Большинство моделей, представленных табл. 1, являются моделями смешанного целочисленного линейного программирования (англ. *mixed-integer linear programming – MILP*), на их долю приходится 67,86% рассмотренных моделей. Решаются данные задачи с помощью метода отсечений Гомори. Эвристические и метаэвристические методы решения задач используются в 32,14% рассмотренных работ. Имитационное моделирование (симуляция), декомпозиция и другие методы решения задач используются в 28,57% рассмотренных работ.

Также обращает на себя внимание то обстоятельство, что только в 25% рассмотренных работ представлены примеры из практики, т.е. в большинстве работ либо отсутствует пример численного решения рассматриваемой задачи, либо используются условные данные и рассматривается предельно упрощенная цепь поставок.

Актуальность проблемы определения оптимального местоположения множества складов в зеленой цепи поставок очевидна. Рассмотрим ее на реальном примере с точки зрения оптимизации цепи поставок российской компании сферы DIY-ритейла. В работе [Бочкарев, 2022, 164-175] была дана математическая постановка двухкритериальной транспортно-складской задачи, в которой рассматривалась прямая цепь поставок, включающая распределительные центры и регионы доставки.

В математической постановке двухкритериальной транспортно-складской задачи рассматривались две целевые функции: 1) общие логистические издержки (TLC – total logistic costs) представляет собой сумму транспортных затрат (TC – transportation costs) и складских затрат (WC – warehouse costs); 2) общее время доставки (TDT – total delivery time) всех товаров на рынки. От этой математической постановки мы и будем отталкиваться при построении индивидуальной математической модели данной задачи для российской компании сферы DIY-ритейла в контексте зеленой цепи поставок.

Индивидуальная математическая постановка многокритериальной транспортно-складской задачи в контексте зеленой цепи поставок

Компания сферы DIY-ритейла, о складской системе которой пойдет речь далее, занимается производством строительных, упаковочных, канцелярских материалов и товаров для промышленных предприятий и для дома. Также компания предоставляет услуги по доставке произведенных товаров потребителям, равно как и других товаров общего потребления и товаров хозяйственного назначения для удовлетворения спроса потребителей в бытовых сферах. Доставка до конечных потребителей осуществляется автомобилями различной грузоподъемности, которая зависит от размера партии, но в основном используются автомобили «Газель» грузоподъемностью 1,5 тонны.

Рассматриваемая компания имеет складская сеть, включающую 9 распределительных

центров (РЦ), обслуживающих клиентов компании в 42 регионах европейской части Российской Федерации, представленную на рис. 2.

Поскольку мы рассматриваем данную задачу в контексте зеленой цепи поставок, очевидно, что в индивидуальную математическую постановку данной задачи необходимо включить целевую функцию, связанную с эмиссией выбросов в атмосферу диоксида углерода CO_2 от работы автотранспорта.

Введем следующие условные обозначения:

TLC – общие логистические затраты, руб.;

TC – транспортные затраты, руб.;

WC – складские затраты, руб.;

TDT – общее время доставки, дни;

ECO_2 – эмиссия выбросов CO_2 в атмосферу от работы автотранспорта, кг;

$m = 42$ – количество снабжаемых регионов;

$n = 9$ – количество мест размещения РЦ;

$k = 9$ – количество малых РЦ;

$l = 9$ – количество крупных РЦ;

I – множество индексов снабжаемых регионов, $I = \overline{1, m}$;

J – множество индексов мест размещения РЦ, $J = \overline{1, n}$;

K – множество индексов малых РЦ, $K = \overline{1, k}$;

L – множество индексов крупных РЦ, $L = \overline{1, l}$;

R_k – ежемесячные складские затраты для k -го малого РЦ, руб.;

R_l – ежемесячные складские затраты для l -го крупного РЦ, руб.;

$c_{i,j}$ – средние затраты на доставку одной партии товаров из j -го РЦ в регион i , руб.;

$t_{i,j}$ – средние затраты времени на доставку одной партии товаров из j -го РЦ в регион i , руб.;

$e_{i,j}$ – величина выбросов в атмосферу CO_2 от работы автотранспорта при доставке одной партии товаров из j -го РЦ в регион i , кг;

r_k – удельные складские затраты на грузопереработку одной партии товаров (равной грузоподъемности одного автомобиля) для k -го малого РЦ, руб.;

r_l – удельные складские затраты на грузопереработку одной партии товаров (равной грузоподъемности одного автомобиля) для l -го крупного РЦ, руб.;

S_k – пропускная способность (мощность) k -го малого РЦ, ед.;

S_l – пропускная способность (мощность) l -го крупного РЦ, ед.;

D_i – общий спрос i -го региона, ед.;

$x_{i,j}$ – переменная – количество партий товара (количество автомобилей), отправленных из j -го РЦ в регион i , ед.;

y_k – переменная – количество единиц товара (количество автомобилей), переработанных на k -м малом РЦ, ед.;

y_l – переменная – количество единиц товара (количество автомобилей), переработанных на l -м крупном РЦ, ед.;

z_k – двоичная переменная, которая принимает значение 1, если малый k -й РЦ открыт, 0 – в противном случае;

z_l – двоичная переменная, которая принимает значение 1, если крупный l -й РЦ открыт, 0 – в противном случае.



Рисунок 2 - Складская сеть и потоки в рассматриваемой компании сферы DIY-ритейла

Тогда индивидуальную математическую постановку трехкритериальной транспортно-складской задачи для рассматриваемой компании можно представить следующим образом.

Найти значения переменных $x_{i,j}$, y_k , y_l , z_k и z_k , минимизирующих значение целевых

функций (13), (14) и (15)

$$TLC = \sum_I \sum_J c_{i,j} x_{i,j} + \sum_K r_k y_k + \sum_L r_l y_l + \sum_K R_k z_k + \sum_L R_l z_l \rightarrow \min; \quad (13)$$

$$TDT = \sum_I \sum_J t_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min; \quad (14)$$

$$ECO_2 = \sum_I \sum_J e_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min; \quad (15)$$

при ограничениях (16) – (22)

$$\sum_I x_{i,j} - S_k z_k \leq 0, \quad \forall i, j, k; \quad (16)$$

$$\sum_I x_{i,j} - S_l z_l \leq 0, \quad \forall i, j, l; \quad (17)$$

$$z_k + z_l \leq 1, \quad \forall k, l; \quad (18)$$

$$\sum_J x_{i,j} - D_i = 0, \quad \forall i; \quad (19)$$

$$\sum_I x_{i,j} - y_k - y_l = 0, \quad \forall j, k, l; \quad (20)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l \geq 0, \quad \forall i, j, k, l; \quad (21)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l - \text{целое}, \quad \forall i, j, k, l. \quad (22)$$

Целевая функция (13) – общие логистические издержки (TLC – total logistic costs) представляет собой сумму транспортных затрат (TC – transportation costs) и складских затрат (WC – warehouse costs) для малых и крупных распределительных центров, которые в свою очередь, подразделяются на постоянные ежемесячные складские затраты и переменные (удельные) складские затраты на грузопереработку товаров на складе; целевая функция (14) – общее время доставки (TDT – total delivery time) всех товаров на рынки; целевая функция (15) – эмиссия выбросов CO₂ в атмосферу от работы автотранспорта (ECO₂).

В рассматриваемой системе ограничений нестрогие равенства (16) и (17) требуют, чтобы сумма поставок множеству региональных клиентов для k -го малого РЦ и для l -го крупного РЦ не превышала пропускной способности (мощности) этого склада; нестрогие равенства (18) указывают на то, что может быть открыт малый или крупный РЦ, либо не открыт никакой из них; ограничения (19) гарантируют, что спрос клиентов i -го региона будет удовлетворен в полном объеме; ограничения (20) – это уравнения баланса потоков, которые уравнивают спрос регионов и пропускную способность (мощность) РЦ; ограничения (21) требуют, чтобы все переменные были неотрицательными; ограничения (22) показывают, что все переменные являются целочисленными.

Таким образом, проблемы определения оптимального местоположения множества складов в зеленой цепи поставок компании сферы DIY-ритейла сформулирована как трехкритериальная задача смешанного целочисленного линейного программирования. В качестве метода ее решения будем использовать метод уступок.

Метод уступок основан на введении некоторого предварительного упорядочения целевых функций по степени важности и допустимых отклонений от их оптимальных значений с последующим решением однокритериальных задач оптимизации известными алгоритмическими методами, в нашем случае задача смешанного целочисленного линейного программирования решается методом Гомори.

Пример численного решения задачи в системе MATLAB

Исходные данные для решения рассматриваемой задачи представлены в табл. 2–7. Все исходные данные предоставлены менеджерами компании сферы DIY-ритейла, являющейся объектом разработки. Следует отметить, что стоимость доставки за один рейс, представленная в табл. 3, и эмиссия CO₂ за один рейс, представленная в табл. 5, являются функциями от среднего

расстояния доставки (см. табл. 2). Пропускная способность (мощность) распределительных центров, представленная в табл. 6., и величина среднего ежемесячного спроса клиентов в регионах, представленная в табл. 7, выражена в количестве полностью груженых транспортных средств, ежемесячно обрабатываемых и отправляемых из распределительных центров в соответствующие регионы.

Таблица 2 - Среднее расстояние доставки, км

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Астраханская область	425	1 018	1 436	822	1413	757	1 408	1 053	1 401
Белгородская область	831	279	1 352	958	1079	635	685	1 219	1 659
Брянская область	7 638	480	1 222	1 302	811	1 045	393	1 270	1 676
Владимирская область	1 045	623	640	1 516	234	1 246	183	963	1 159
Волгоградская область	100	582	1 065	1 817	988	492	972	854	1 294
Вологодская область	1 440	996	962	1 817	564	1 561	469	1 285	1 401
Воронежская область	1 020	100	1 057	835	742	577	536	960	1 340
Краснодарский край	5 084	847	1 766	100	1542	272	1 371	1 600	2 040
Курская область	3 499	225	1 282	1 060	940	802	534	1 185	1 565
Ленинградская область	927	1 409	1 696	2 244	1126	1 974	871	1 932	2 215
Липецкая область	1 466	128	961	950	611	693	453	838	1 244
Московская область	744	549	829	1 366	428	1 114	100	1 065	1 348
Нижегородская область	803	781	402	1 542	100	1 314	428	725	921
Новгородская область	648	1 080	1 367	1 879	950	1 645	542	1 603	1 886
Оренбургская область	1 842	1 232	718	2 003	1125	1 602	1 453	411	354
Орловская область	1 171	351	1 191	1 174	779	916	371	1 141	1 547
Пензенская область	993	512	538	1 314	423	951	627	422	828
Псковская область	3 318	1 266	1 570	2 066	1163	1 831	737	1 806	2 089
Республика Адыгея	3 678	908	1 796	135	1599	350	1 435	1 529	2 004
Республика Башкортостан	2 650	1 340	548	1 995	931	1 770	1 342	465	100
Республика Крым	715	1 193	2 266	226	1943	764	1 599	2 107	1 733
Республика Марий Эл	911	1 057	146	1 866	337	1 496	763	579	665
Республика Мордовия	610	626	431	1 442	287	1 065	625	471	806
Республика Татарстан	621	1 057	100	1 778	398	1 496	823	379	548
Ростовская область	783	577	1 496	276	1274	100	1 101	1 330	1 770
Рязанская область	854	390	803	1 224	432	955	179	870	1 276
Самарская область	1 720	960	379	1 588	721	1 330	1 049	100	465
Саратовская область	720	507	669	1 113	629	877	824	453	898
Северо-Западный федеральный округ	2 135	1 273	1 560	2 054	1126	1 838	735	1 796	2 079
Смоленская область	2 935	730	1 247	1 555	813	1 295	399	1 193	1 766
Ставропольский край	1 869	911	1 637	299	1550	331	1 435	1 426	1 866
Тамбовская область	519	233	824	1 025	515	766	470	701	1 107
Тверская область	1 164	717	1 004	1 515	588	1 282	179	1 240	1 523

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Тульская область	870	351	994	1 170	600	916	174	1 069	1 475
Тюменская область	2 152	2 198	1 406	2 831	1791	2 628	2 210	1 323	840
Удмуртская Республика	1 424	1 454	392	2 107	788	1 900	1 220	606	398
Ульяновская область	842	854	233	1 588	476	1 318	903	243	570
Центральный федеральный округ	972	536	823	1 342	428	1 101	300	1 049	1 342
Челябинская область	1 712	1 758	966	2 402	1362	2 188	1 770	883	400
Чеченская Республика	819	1 357	1 884	703	1802	770	1 791	1 519	2 113
Чувашская Республика	1 061	958	164	1 786	247	1 406	667	489	683
Ярославская область	1 245	801	767	1 616	366	1 366	274	1 090	1 286

Таблица 3 - Стоимость доставки за один рейс, руб.

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Астраханская область	19 125	45 810	64 620	36 990	63 585	34 065	63 360	47 385	63 045
Белгородская область	37 395	12 555	60 840	43 110	48 555	28 575	30 825	54 855	74 655
Брянская область	343 710	21 600	54 990	58 590	36 495	47 025	17 685	57 150	75 420
Владимирская область	47 025	28 035	28 800	68 220	10 530	56 070	8 235	43 335	52 155
Волгоградская область	4 500	26 190	47 925	81 765	44 460	22 140	43 740	38 430	58 230
Вологодская область	64 800	44 820	43 290	81 765	25 380	70 245	21 105	57 825	63 045
Воронежская область	45 900	4 500	47 565	37 575	33 390	25 965	24 120	43 200	60 300
Краснодарский край	228 780	38 115	79 470	4 500	69 390	12 240	61 695	72 000	91 800
Курская область	157 455	10 125	57 690	47 700	42 300	36 090	24 030	53 325	70 425
Ленинградская область	41 715	63 405	76 320	100 980	50 670	88 830	39 195	86 940	99 675
Липецкая область	65 970	5 760	43 245	42 750	27 495	31 185	20 385	37 710	55 980
Московская область	33 480	24 705	37 305	61 470	19 260	50 130	4 500	47 925	60 660
Нижегородская область	36 135	35 145	18 090	69 390	4 500	59 130	19 260	32 625	41 445
Новгородская область	29 160	48 600	61 515	84 555	42 750	74 025	24 390	72 135	84 870

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Оренбургская область	82 890	55 440	32 310	90 135	50 625	72 090	65 385	18 495	15 930
Орловская область	52 695	15 795	53 595	52 830	35 055	41 220	16 695	51 345	69 615
Пензенская область	44 685	23 040	24 210	59 130	19 035	42 795	28 215	18 990	37 260
Псковская область	149 310	56 970	70 650	92 970	52 335	82 395	33 165	81 270	94 005
Республика Адыгея	165 510	40 860	80 820	6 075	71 955	15 750	64 575	68 805	90 180
Республика Башкортостан	119 250	60 300	24 660	89 775	41 895	79 650	60 390	20 925	4 500
Республика Крым	32 175	53 685	101 970	10 170	87 435	34 380	71 955	94 815	77 985
Республика Марий Эл	40 995	47 565	6 570	83 970	15 165	67 320	34 335	26 055	29 925
Республика Мордовия	27 450	28 170	19 395	64 890	12 915	47 925	28 125	21 195	36 270
Республика Татарстан	27 945	47 565	4 500	80 010	17 910	67 320	37 035	17 055	24 660
Ростовская область	35 235	25 965	67 320	12 420	57 330	4 500	49 545	59 850	79 650
Рязанская область	38 430	17 550	36 135	55 080	19 440	42 975	8 055	39 150	57 420
Самарская область	77 400	43 200	17 055	71 460	32 445	59 850	47 205	4 500	20 925
Саратовская область	32 400	22 815	30 105	50 085	28 305	39 465	37 080	20 385	40 410
Северо-Западный федеральный округ	96 075	57 285	70 200	92 430	50 670	82 710	33 075	80 820	93 555
Смоленская область	132 075	32 850	56 115	69 975	36 585	58 275	17 955	53 685	79 470
Ставропольский край	84 105	40 995	73 665	13 455	69 750	14 895	64 575	64 170	83 970
Тамбовская область	23 355	10 485	37 080	46 125	23 175	34 470	21 150	31 545	49 815
Тверская область	52 380	32 265	45 180	68 175	26 460	57 690	8 055	55 800	68 535
Тульская область	39 150	15 795	44 730	52 650	27 000	41 220	7 830	48 105	66 375
Тюменская область	96 840	98 910	63 270	127 395	80 595	118 260	99 450	59 535	37 800
Удмуртская Республика	64 080	65 430	17 640	94 815	35 460	85 500	54 900	27 270	17 910
Ульяновская область	37 890	38 430	10 485	71 460	21 420	59 310	40 635	10 935	25 650

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Центральный федеральный округ	43 740	24 120	37 035	60 390	19 260	49 545	13 500	47 205	60 390
Челябинская область	77 040	79 110	43 470	108 090	61 290	98 460	79 650	39 735	18 000
Чеченская Республика	36 855	61 065	84 780	31 635	81 090	34 650	80 595	68 355	95 085
Чувашская Республика	47 745	43 110	7 380	80 370	11 115	63 270	30 015	22 005	30 735
Ярославская область	56 025	36 045	34 515	72 720	16 470	61 470	12 330	49 050	57 870

Примечание – Стоимость доставки, км = Среднее расстояние доставки, км × 45 руб./км, где 45 руб./км – тариф за один километр пробега.

Таблица 4 - Среднее время доставки, дни

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Астраханская область	3	7	7	6	6	5	5	7	6
Белгородская область	6	4	6	6	4	5	3	6	6
Брянская область	5	4	6	6	4	5	2	6	6
Владимирская область	5	4	6	7	4	5	3	6	6
Волгоградская область	1	6	5	4	6	3	4	5	4
Вологодская область	6	5	7	7	4	6	3	7	7
Воронежская область	6	1	6	5	6	4	3	6	5
Краснодарский край	6	6	8	1	7	2	4	7	6
Курская область	6	5	6	7	4	5	2	6	6
Ленинградская область	5	4	6	6	4	5	2	6	6
Липецкая область	6	2	6	6	4	6	2	6	6
Московская область	4	3	4	5	2	3	1	4	4
Нижегородская область	5	4	5	6	1	5	2	4	4
Новгородская область	5	4	6	6	4	5	3	6	6
Оренбургская область	6	6	5	8	5	7	5	4	4
Орловская область	5	5	6	6	4	5	2	7	6
Пензенская область	4	5	6	7	4	6	3	3	5
Псковская область	5	5	6	7	4	6	3	6	7
Республика Адыгея	6	6	8	2	7	5	7	8	9
Республика Башкортостан	5	5	3	6	4	5	5	3	1
Республика Крым	9	10	11	9	11	8	8	13	12

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Республика Марий Эл	6	6	7	7	5	5	4	7	6
Республика Мордовия	6	5	6	7	5	5	4	6	6
Республика Татарстан	6	5	1	7	5	6	3	4	4
Ростовская область	4	4	8	2	6	1	4	8	9
Рязанская область	5	4	4	5	3	5	2	5	6
Самарская область	3	5	4	6	4	6	3	1	3
Саратовская область	2	5	5	6	5	6	3	3	4
Северо-Западный федеральный округ	5	4	6	6	4	5	2	6	6
Смоленская область	6	5	6	6	4	5	2	5	6
Ставропольский край	5	5	8	1	7	2	4	7	7
Тамбовская область	5	4	6	6	4	5	2	6	6
Тверская область	6	4	6	5	4	5	3	6	6
Тульская область	5	4	5	6	3	5	2	5	5
Тюменская область	10	8	7	9	8	8	6	7	7
Удмуртская Республика	6	6	4	7	4	6	4	4	3
Ульяновская область	6	6	5	7	5	6	4	4	3
Центральный федеральный округ	4	3	4	5	2	3	1	4	4
Челябинская область	6	6	5	7	4	6	5	4	4
Чеченская Республика	7	6	9	6	8	4	6	9	7
Чувашская Республика	6	5	5	7	5	5	3	4	3
Ярославская область	5	5	6	7	4	5	2	6	6

Таблица 5 - Эмиссия CO₂ за один рейс, кг

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Астраханская область	176,38	422,47	595,94	341,13	586,40	314,16	584,32	437,00	581,42
Белгородская область	344,87	115,79	561,08	397,57	447,79	263,53	284,28	505,89	688,49
Брянская область	3169,77	199,20	507,13	540,33	336,57	433,68	163,10	527,05	695,54
Владимирская область	433,68	258,55	265,60	629,14	97,11	517,09	75,95	399,65	480,99
Волгоградская область	41,50	241,53	441,98	754,06	410,02	204,18	403,38	354,41	537,01

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Вологодская область	597,60	413,34	399,23	754,06	234,06	647,82	194,64	533,28	581,42
Воронежская область	423,30	41,50	438,66	346,53	307,93	239,46	222,44	398,40	556,10
Краснодарский край	2109,86	351,51	732,89	41,50	639,93	112,88	568,97	664,00	846,60
Курская область	1452,09	93,38	532,03	439,90	390,10	332,83	221,61	491,78	649,48
Ленинградская область	384,71	584,74	703,84	931,26	467,29	819,21	361,47	801,78	919,23
Липецкая область	608,39	53,12	398,82	394,25	253,57	287,60	188,00	347,77	516,26
Московская область	308,76	227,84	344,04	566,89	177,62	462,31	41,50	441,98	559,42
Нижегородская область	333,25	324,12	166,83	639,93	41,50	545,31	177,62	300,88	382,22
Новгородская область	268,92	448,20	567,31	779,79	394,25	682,68	224,93	665,25	782,69
Оренбургская область	764,43	511,28	297,97	831,25	466,88	664,83	603,00	170,57	146,91
Орловская область	485,97	145,67	494,27	487,21	323,29	380,14	153,97	473,52	642,01
Пензенская область	412,10	212,48	223,27	545,31	175,55	394,67	260,21	175,13	343,62
Псковская область	1376,97	525,39	651,55	857,39	482,65	759,87	305,86	749,49	866,94
Республика Адыгея	1526,37	376,82	745,34	56,03	663,59	145,25	595,53	634,54	831,66
Республика Башкортостан	1099,75	556,10	227,42	827,93	386,37	734,55	556,93	192,98	41,50
Республика Крым	296,73	495,10	940,39	93,79	806,35	317,06	663,59	874,41	719,20
Республика Марий Эл	378,07	438,66	60,59	774,39	139,86	620,84	316,65	240,29	275,98
Республика Мордовия	253,15	259,79	178,87	598,43	119,11	441,98	259,38	195,47	334,49
Республика Татарстан	257,72	438,66	41,50	737,87	165,17	620,84	341,55	157,29	227,42
Ростовская область	324,95	239,46	620,84	114,54	528,71	41,50	456,92	551,95	734,55
Рязанская область	354,41	161,85	333,25	507,96	179,28	396,33	74,29	361,05	529,54
Самарская область	713,80	398,40	157,29	659,02	299,22	551,95	435,34	41,50	192,98
Саратовская область	298,80	210,41	277,64	461,90	261,04	363,96	341,96	188,00	372,67

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Северо-Западный федеральный округ	886,03	528,30	647,40	852,41	467,29	762,77	305,03	745,34	862,79
Смоленская область	1218,03	302,95	517,51	645,33	337,40	537,43	165,59	495,10	732,89
Ставропольский край	775,64	378,07	679,36	124,09	643,25	137,37	595,53	591,79	774,39
Тамбовская область	215,39	96,70	341,96	425,38	213,73	317,89	195,05	290,92	459,41
Тверская область	483,06	297,56	416,66	628,73	244,02	532,03	74,29	514,60	632,05
Тульская область	361,05	145,67	412,51	485,55	249,00	380,14	72,21	443,64	612,13
Тюменская область	893,08	912,17	583,49	1174,87	743,27	1090,62	917,15	549,05	348,60
Удмуртская Республика	590,96	603,41	162,68	874,41	327,02	788,50	506,30	251,49	165,17
Ульяновская область	349,43	354,41	96,70	659,02	197,54	546,97	374,75	100,85	236,55
Центральный федеральный округ	403,38	222,44	341,55	556,93	177,62	456,92	124,50	435,34	556,93
Челябинская область	710,48	729,57	400,89	996,83	565,23	908,02	734,55	366,45	166,00
Чеченская Республика	339,89	563,16	781,86	291,75	747,83	319,55	743,27	630,39	876,90
Чувашская Республика	440,32	397,57	68,06	741,19	102,51	583,49	276,81	202,94	283,45
Ярославская область	516,68	332,42	318,31	670,64	151,89	566,89	113,71	452,35	533,69

Примечание – Эмиссия CO₂ за один рейс, кг = Среднее расстояние доставки, км × 0,415 кг/км, где 0,415 кг/км – эмиссия CO₂ за один километр пробега.

Таблица 6 - Значения показателей для распределительных центров

Показатели	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Малый РЦ									
Фиксированные издержки, руб.	282478	266061	184328	179956	186726	229679	458977	237680	201284

Determining the optimal location of multiple warehouses ...

Средние переменные издержки, руб.	1 110	690	2 250	1 500	1 080	1 050	1 665	990	1 560
Пропускная способность (мощность), ед.	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Крупный РЦ									
Фиксированные издержки, руб.	1500000	1500000	1500000	1500000	1500000	1500000	4822916	1500000	1500000
Средние переменные издержки, руб.	825	825	825	825	825	825	1 485	825	825
Пропускная способность (мощность), ед.	200	200	200	200	200	200	200	200	200

Таблица 7 - Величина среднего ежемесячного спроса клиентов в регионах

Потребители	Величина спроса, ед.
Астраханская область	7
Белгородская область	2
Брянская область	2
Владимирская область	2
Волгоградская область	12
Вологодская область	3
Воронежская область	34
Краснодарский край	13
Курская область	2
Ленинградская область	5
Липецкая область	3
Московская область	80
Нижегородская область	14
Новгородская область	3
Оренбургская область	2
Орловская область	2
Пензенская область	6
Псковская область	1
Республика Адыгея	1
Республика Башкортостан	16
Республика Крым	1
Республика Марий Эл	2
Республика Мордовия	1
Республика Татарстан	13
Ростовская область	22
Рязанская область	3
Самарская область	23

Потребители	Величина спроса, ед.
Саратовская область	4
Северо-Западный федеральный округ	77
Смоленская область	3
Ставропольский край	7
Тамбовская область	1
Тверская область	3
Тульская область	7
Тюменская область	8
Удмуртская Республика	3
Ульяновская область	2
Центральный федеральный округ	96
Челябинская область	4
Чеченская Республика	1
Чувашская Республика	2
Ярославская область	2
Сумма	495

Примечание – Величина среднего ежемесячного спроса клиентов в регионах выражена в количестве полностью груженных транспортных средств, ежемесячно обрабатываемых и отправляемых из РЦ в соответствующие регионы.

Таким образом, в данной задаче имеется 414 переменных ($m \times n + 2k + 2l = 42 \times 9 + 18 + 18 = 414$). При решении данной задачи возникают определенные вычислительные проблемы, связанные с ее большой размерностью, сложным видом целевой функции и большим количеством накладываемых ограничений. Решение этих проблем требует привлечения специализированных программ, позволяющих решать задачи большой размерности. Представим решение трехкритериальной транспортно-складской задачи в системе компьютерной математики MATLAB.

Поскольку рассматриваемая задача является трехкритериальной, то последовательность ее решения методом уступок будет следующей.

Шаг 1. Предварительное упорядочение целевых функций по степени важности и формирование исходного множества допустимых альтернатив.

Предположим, что $TLC > TDT > ECO_2$, т.е. первая целевая функция – общие логистические издержки – является наиболее важной, а третья целевая функция – эмиссия CO_2 – наименее важной, тогда мы имеем следующую однокритериальную задачу линейного программирования.

Найти минимум целевой функции (13)

$$TLC = \sum_I \sum_J c_{i,j} x_{i,j} + \sum_K r_k y_k + \sum_L r_l y_l + \sum_K R_k z_k + \sum_L R_l z_l \rightarrow \min; \quad (13)$$

при ограничениях (16) – (22)

$$\sum_I x_{i,j} - S_k z_k \leq 0, \quad \forall i, j, k; \quad (16)$$

$$\sum_I x_{i,j} - S_l z_l \leq 0, \quad \forall i, j, l; \quad (17)$$

$$z_k + z_l \leq 1, \quad \forall k, l; \quad (18)$$

$$\sum_J x_{i,j} - D_i = 0, \quad \forall i; \quad (19)$$

$$\sum_I x_{i,j} - y_k - y_l = 0, \quad \forall j, k, l; \quad (20)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l \geq 0, \quad \forall i, j, k, l; \quad (21)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l - \text{целое}, \quad \forall i, j, k, l. \quad (22)$$

Переходим к шагу 2.

Шаг 2. Решение однокритериальной задачи с первой целевой функцией.

Методом Гомори решаем однокритериальную задачу смешанного целочисленного линейного программирования с целевой функцией (13) и ограничениями (16) – (22). Найденное оптимальное значение целевой функции обозначим через $b_{m+1} = TLC_{opt}$. Переходим к шагу 3.

Шаг 3. Формирование нового множества допустимых альтернатив.

Найти минимум целевой функции

$$TDT = \sum_I \sum_J t_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min; \quad (14)$$

при ограничениях

$$\sum_I x_{i,j} - S_k z_k \leq 0, \quad \forall i, j, k; \quad (16)$$

$$\sum_I x_{i,j} - S_l z_l \leq 0, \quad \forall i, j, l; \quad (17)$$

$$z_k + z_l \leq 1, \quad \forall k, l; \quad (18)$$

$$\sum_J x_{i,j} - D_i = 0, \quad \forall i; \quad (19)$$

$$\sum_I x_{i,j} - y_k - y_l = 0, \quad \forall j, k, l; \quad (20)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l \geq 0, \quad \forall i, j, k, l; \quad (21)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l - \text{целое}, \quad \forall i, j, k, l; \quad (22)$$

$$\sum_I \sum_J c_{i,j} x_{i,j} + \sum_K r_k y_k + \sum_L r_l y_l + \sum_K R_k z_k + \sum_L R_l z_l \leq b_{m+1} + \delta_1. \quad (23)$$

Здесь мы видим, что к исходным ограничениям задачи (16) – (22) добавляется еще одно ограничение вида (23), т.е. первая целевая функция переводится в ограничения задачи, а в качестве правой части этого ограничения рассматривается оптимальное значение первой целевой функции, к которому прибавляется величина уступки по ней $b_{m+1} + \delta_1$. Переходим к шагу 4.

Шаг 4. Решение однокритериальной задачи со второй целевой функцией.

Методом Гомори решить однокритериальную задачу смешанного целочисленного линейного программирования с целевой функцией (14) и ограничениями (16) – (23) и оценить значение второй целевой функции TDT_{opt} . Если значение второй целевой функции является приемлемым, то найденное оптимальное значение целевой функции обозначим через $b_{m+2} = TDT_{opt}$. Переходим к шагу 5.

Шаг 5. Формирование нового множества допустимых альтернатив.

Найти минимум целевой функции

$$ECO_2 = \sum_I \sum_J e_{i,j} x_{i,j} \rightarrow \min; \quad (15)$$

при ограничениях

$$\sum_I x_{i,j} - S_k z_k \leq 0, \quad \forall i, j, k; \quad (16)$$

$$\sum_I x_{i,j} - S_l z_l \leq 0, \quad \forall i, j, l; \quad (17)$$

$$z_k + z_l \leq 1, \quad \forall k, l; \quad (18)$$

$$\sum_J x_{i,j} - D_i = 0, \quad \forall i; \quad (19)$$

$$\sum_I x_{i,j} - y_k - y_l = 0, \quad \forall j, k, l; \quad (20)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l \geq 0, \quad \forall i, j, k, l; \quad (21)$$

$$x_{i,j}, y_k, y_l, z_k, z_l - \text{целое}, \quad \forall i, j, k, l; \quad (22)$$

$$\sum_I \sum_J c_{i,j} x_{i,j} + \sum_K r_k y_k + \sum_L r_l y_l + \sum_K R_k z_k + \sum_L R_l z_l \leq b_{m+1} + \delta_1; \quad (23)$$

$$\sum_I \sum_J t_{i,j} x_{i,j} \leq b_{m+2} + \delta_2. \quad (24)$$

Здесь мы видим, что к исходным ограничениям задачи (16) – (22) добавляется два ограничения вида (23) и вида (24), т.е. при решении задачи с третьей целевой функцией, первая и вторая целевые функции переводятся в ограничения задачи, а в качестве правой части

ограничения (24) рассматривается оптимальное значение второй целевой функции, к которому прибавляется величина уступки по ней $b_{m+2} + \delta_2$. Переходим к шагу 6.

Шаг 6. Методом Гомори решить однокритериальную задачу смешанного целочисленного линейного программирования с целевой функцией (15) и ограничениями (16) – (24) и оценить значение третьей целевой функции ECO_{2opt} . Если значение третьей целевой функции является приемлемым, то найденное решение $x_{opt} = \{x_{1,1}^*, x_{1,2}^*, \dots, x_{m,n}^*\}$ следует принять в качестве оптимального решения задачи линейного программирования с тремя целевыми функциями и закончить выполнение алгоритма.

Если найденное значение третьей целевой функции ECO_{2opt} является неприемлемым, то следует перейти к шагу 3 и в ограничении вида (23) увеличить уступку по первой целевой функции, т.е. правая часть ограничения будет иметь вид $b_{m+1} + \delta_1'$. Затем последовательно перейти к шагам 4, 5 и 6.

Следует отметить, что на шаге 3 и на шаге 5 процедура определения величины уступки соответственно по первой целевой функции δ_1 и по второй целевой функции δ_2 имеет субъективный характер, зависящий от предпочтений лица, принимающего решение, поэтому нахождение оптимального решения задачи линейного программирования с несколькими целевыми функциями $x_{opt} = \{x_{1,1}^*, x_{1,2}^*, \dots, x_{m,n}^*\}$, как правило, требует нескольких итераций.

Решение рассматриваемой задачи линейного программирования с первой целевой функцией TLC в MATLAB может быть реализовано в виде m-файла, который представлен ниже.

```
% Проблема определения местоположения множества складов
% Шаг 3: решается однокритериальная задача, целевая функция TLC
% Считывание исходных данных из файла Excel
% Считывание матриц коэффициентов системы ограничений в виде неравенств
A = readmatrix("C:\...\Книга1.xlsx","Sheet","Лист1","Range","B57:OY83");
% Считывание вектора правой части системы ограничений в виде неравенств
b = readmatrix("C:\...\Книга1.xlsx","Sheet","Лист1","Range","PD57:PD83");
% Считывание матрицы коэффициентов системы уравнений
Aeq = readmatrix("C:\...\Книга1.xlsx","Sheet","Лист1","Range","B3:OY53");
% Считывание вектора правой части системы ограничений в виде уравнений
beq = readmatrix("C:\...\Книга1.xlsx","Sheet","Лист1","Range","PD3:PD53");
% Считывание коэффициентов целевой функции
c = readmatrix("C:\...\Книга1.xlsx","Sheet","Лист1","Range","B91:OY91");
% Все переменные с целочисленным знаком
N = 414;
intcon = 1:N;
% Задание ограничений снизу на переменные
lb = zeros(1,414);
% Решение и вывод результата в командное окно
[xmin, TLCmin] = intlinprog(c,intcon,A,b,Aeq,beq,lb)
% Запись вычисленных значений переменных xmin на рабочий лист Excel
writematrix(tranpose(xmin),"C:\...\Книга1.xlsx","Sheet","Лист1","Range","B103:OY103");
Аналогично формируются m-файлы для решения рассматриваемой задачи линейного
```

программирования со второй целевой функцией TDT и с третьей целевой функцией ECO_2 .

Результаты решения трехкритериальной транспортно-складской задачи представлены в табл. 8 и 9. Здесь мы видим, что в результате решения данной задачи методом уступок должны быть открыты семь малых РЦ в городах Волгограде, Воронеже, Казани, Краснодаре, Ростове-на-Дону и Самаре, а также два крупных РЦ в Москве и Нижнем Новгороде. Причем склады в городах Волгограде, Казани, Краснодаре, Нижнем Новгороде, Ростове-на-Дону, Самаре и Уфе будут не полностью загружены.

Анализ результатов решения трехкритериальной транспортно-складской задачи, представленный в табл. 10, показывает, что наилучшим компромиссом по всем трем критериям является решение: $TLC = 15\,596\,457$ руб., $TDT = 900$ дней и $ECO_2 = 65199,82$ кг. По сравнению с решением данной задачи по первому критерию, полученному на втором шаге алгоритма, удалось снизить общее время доставки на 29%, а эмиссию CO_2 – приблизительно на 30%, но при этом общие логистические издержки увеличились на 9%.

Таблица 8 - Результаты решения трехкритериальной транспортно-складской задачи (значения переменной $x_{i,j}$)

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Астраханская область	7	0	0	0	0	0	0	0	0
Белгородская область	0	1	0	0	0	1	0	0	0
Брянская область	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Владимирская область	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Волгоградская область	12	0	0	0	0	0	0	0	0
Вологодская область	0	0	0	0	3	0	0	0	0
Воронежская область	0	34	0	0	0	0	0	0	0
Краснодарский край	0	0	0	13	0	0	0	0	0
Курская область	0	2	0	0	0	0	0	0	0
Ленинградская область	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Липецкая область	0	3	0	0	0	0	0	0	0
Московская область	0	0	0	0	0	0	80	0	0
Нижегородская область	0	0	0	0	14	0	0	0	0
Новгородская область	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Оренбургская область	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Орловская область	0	0	0	0	0	0	2	0	0
Пензенская область	0	0	0	0	0	0	0	6	0
Псковская область	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Республика Адыгея	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Республика Башкортостан	0	0	0	0	0	0	0	0	16
Республика Крым	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Республика Марий Эл	0	0	2	0	0	0	0	0	0
Республика Мордовия	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Республика Татарстан	0	0	13	0	0	0	0	0	0

Потребители	Поставщики								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Ростовская область	0	0	0	0	0	22	0	0	0
Рязанская область	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Самарская область	0	0	0	0	0	0	0	23	0
Саратовская область	0	0	0	0	0	0	0	4	0
Северо-Западный федеральный округ	0	0	0	0	0	0	77	0	0
Смоленская область	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Ставропольский край	0	0	0	7	0	0	0	0	0
Тамбовская область	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Тверская область	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Тульская область	0	0	0	0	0	0	7	0	0
Тюменская область	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Удмуртская Республика	0	0	3	0	0	0	0	0	0
Ульяновская область	0	0	2	0	0	0	0	0	0
Центральный федеральный округ	0	0	0	0	74	0	22	0	0
Челябинская область	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Чеченская Республика	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Чувашская Республика	0	0	2	0	0	0	0	0	0
Ярославская область	0	0	0	0	2	0	0	0	0

Таблица 9 - Результаты решения трехкритериальной транспортно-складской задачи (значения переменных u_k , u_l , z_k и z_l)

Показатели	Значения для распределительных центров								
	Волгоград	Воронеж	Казань	Краснодар	Нижний Новгород	Ростов	Москва	Самара	Уфа
Малый РЦ									
Открыт малый РЦ (двоичная переменная z_k)	1	1	1	1	0	1	0	1	1
Количество единиц товара, переработанных на k -м малом РЦ u_k , ед.	27	40	22	23	0	23	0	33	30
Крупный РЦ									
Открыт крупный РЦ (двоичная переменная z_l)	0	0	0	0	1	0	1	0	0
Количество единиц товара, переработанных на l -м крупном РЦ u_l , ед.	0	0	0	0	97	0	200	0	0

Determining the optimal location of multiple warehouses ...

Таблица 10 - Анализ результатов решения трехкритериальной транспортно-складской задачи

Вариант поиска решения и ограничения	Издержки, тыс. руб.			Общее время доставки <i>TDT</i> , дни	Эмиссия CO_2 <i>ECO_2</i> , кг	Относительное снижение/увеличение издержек, %			Относительное снижение/увеличение общего времени	Относительное снижение/увеличение эмиссии CO_2 , %
	<i>TLC</i>	<i>TC</i>	<i>WC</i>			<i>TLC</i>	<i>TC</i>	<i>WC</i>		
Шаг 2. Критерий <i>TLC</i>	14298,0	10197,4	4100,6	1269	94042,7	-	-	-	-	-
Шаг 4. Критерий <i>TDT</i> , $TLC \leq 16\ 000\ 000$	15991,5	7475,1	8516,4	857	68936,9	11,8	-26,7	107,7	-32,47	-26,70
Шаг 6. Критерий ECO_2 , $TLC \leq 16\ 000\ 000$, $TDT \leq 1200$	15596,5	7069,9	8526,6	900	65199,8	9,1	-30,7	107,9	-29,08	-30,67

Заключение

Проведенный анализ работ по проблеме определения оптимального местоположения множества складов в контексте зеленой цепи поставок показал высокую актуальность данного направления исследований. Большинство рассмотренных моделей являются моделями смешанного целочисленного линейного программирования и решаются они с помощью метода отсечений Гомори. Эвристические и метаэвристические методы, имитационное моделирование (симуляция), декомпозиция и другие методы решения в рассмотренных работах используются реже.

В качестве примера нами дана математическая постановка и представлены результаты численного решения трехкритериальной транспортно-складской задачи на реальном примере российской компании сферы DIY-ритейла. Ввиду большой размерности данной задачи ее решение получено в системе компьютерной математики MATLAB. Показано, что в результате оптимального прикрепления регионов доставки к распределительным центрам и соответственно вследствие сокращения пробега автотранспорта эмиссия выбросов в атмосферу CO_2 может быть снижена на 30%.

По нашему мнению, дальнейшим направлением исследования должно быть усложнение структуры рассмотренной нами модели трехкритериальной транспортно-складской задачи, например, целесообразно было бы рассмотреть четырехуровневую сеть поставок, включающую поставщиков, распределительные центры, региональные склады и конечных потребителей, а также учет в ней различных неопределенностей, например неопределенности величины спроса конечных потребителей.

Библиография

1. Бочкарев А.А. Надежность и устойчивость цепей поставок: модели и алгоритмы. СПб.: Скифия-принт, 2022. 200 с.
2. Akinc U. An efficient branch and bound algorithm for the capacitated warehouse location problem // *Management Sciences*. 1977. № 23 (6). P. 585-594.
3. Alfandari L. A tailored Benders decomposition approach for last-mile delivery with autonomous robots // *European Journal of Operational Research*. 2022. № 299. P. 510-525.
4. Almouhanna A. The location routing problem using electric vehicles with constrained distance // *Computers and Operations Research*. 2020. № 115. P. 104864.
5. Alp O. Transitioning to sustainable freight transportation by integrating fleet replacement and charging infrastructure decisions // *Omega*. 2022. № 109. P. 102595.
6. Arnau Q. A biased-randomized discrete-event heuristic for coordinated mulei-vehicle container transport across interconnected networks // *European Journal of Operational Research*. 2022. № 302. P. 348-362.
7. Brandao J. A memory-based iterated local search algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem // *European Journal of Operational Research*. 2020. № 284. P. 559-571.
8. Daroudi S. The minimum latency in location routing fuzzy inventory problem for perishable multi-product materials // *Applied Soft Computing*. 2021. № 110. P. 107543.
9. Emamian Y. Developing and solving an integrated model for production routing in sustainable closed-loop supply // *Journal of Cleaner Production*. 2021. № 302. P. 126997.
10. Frank M. Optimizing routing and delivery patterns with multi-compartment vehicles // *European Journal of Operational Research*. 2021. № 293. P. 495-510.
11. Geoffrion A.M. Multicommodity distribution system design by benders decomposition // *Management Sciences*. 1974. № 20 (5). P. 453-466.
12. Ghasemi P. Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning // *Applied Mathematics and Computation*. 2019. № 350. P. 105-132.
13. Govindan K. A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach // *International Journal of Production Economics*. 2023. № 257. P. 108771.
14. Govindan K. An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty // *Journal of Cleaner Production*. 2020. № 242. P. 118317.
15. Lin B. The location -allocation model for multi-classification-yard location problem // *Transportation Research Part E*. 2019. № 122. P. 283-308.
16. Ma Y. A bi-level multi-objective location-routing model for municipal waste management with obnoxious effects // *Waste Management*. 2021. № 135. P. 109-121.
17. Mardan E. An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 235. P. 1499-1514.
18. Nageswara Reddy K. Multi-period green reverse logistics network design: An improved Benders-decomposition-based heuristic approach // *European Journal of Operational Research*. 2022. № 303. P. 735-752.
19. Nasr A.K. A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains // *Journal of Cleaner Production*. 2021. № 287. P. 124994.
20. Nayeri S. Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design // *Computers & Industrial Engineering*. 2020. № 148. P. 106716.
21. Raa B. Multi-vehicle stochastic cyclic inventory routing with guaranteed replenishments // *International Journal of Production Economics*. 2021. № 234. P. 108059.
22. Rabbani M. A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation // *European Journal of Operational Research*. 2019. № 272. P. 945-961.
23. Reihaneh M. A branch-and-price algorithm for a vehicle routing with demand allocation problem // *European Journal of Operational Research*. 2019. № 272. P. 523-538.
24. Sadeghi Ahangar S. Sustainable design of a municipal solid waste management system in an integrated closed-loop supply chain network using a fuzzy approach: a case study // *Journal of Industrial and Production Engineering*. 2021. № 38 (5). P. 323-340.
25. Salehi-Amiri A. Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. № 141. P. 110821.
26. Tavana M. A comprehensive framework for sustainable closed-loop supply chain network design // *Journal of Cleaner Production*. 2022. № 257. P. 129777.
27. Van der Heide G. Cross docking for libraries with a depot // *European Journal of Operational Research*. 2021. № 290. P. 749-765.
28. Wang M. A branch-and-price algorithm for location routing problems with pick-up stations in the last mile distribution

- system // *European Journal of Operational Research*. 2022. № 303. P. 1258-1276.
29. William J. A warehouse-location problem // *Operation Research*. 1958. № 6. P. 252-263.
30. Yavari M. Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 226. P. 282-305.
31. Yazdekhashti A. A two-echelon two-indenture warranty distribution network development and optimization under batch-ordering inventory policy // *International Journal of Production Economics*. 2022. № 249. P. 108508.
32. Zhen L. Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty // *Journal of Cleaner Production*. 2019. № 227. P. 1195-1209.

Determining the optimal location of multiple warehouses in the context of a green supply chain

Andrei A. Bochkarev

Doctor of Economics, Associate Professor,
Professor of the Department of Logistics and Supply Chain Management,
Saint Petersburg State University of Economics,
191023, A, 30-32, Kanala Griboedoba emb.,
Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: andreibochkarev4@gmail.com

Fu Ciaci

Postgraduate,
Saint Petersburg State University of Economics,
191023, A, 30-32, Kanala Griboedoba emb.,
Saint Petersburg, Russian Federation;
e-mail: 5680860107@163.com

Abstract

The article deals with the problem of determining the optimal location of multiple warehouses in a green supply chain, i.e. such a supply chain in which environmental pollution is minimized. In the context of the problem under consideration, the most urgent task is to reduce carbon dioxide CO₂ emissions from vehicles delivering goods from warehouses to end consumers. A review of the literature on methods for solving the problem of determining the optimal location of a set of warehouses is presented, a mathematical formulation is given, and the results of a numerical solution of a three-criteria transport and warehouse problem are presented using the example of a Russian DIY retail company. The analysis of works on the problem of determining the optimal location of multiple warehouses in the context of a green supply chain showed the high relevance of this area of research. As an example, a mathematical statement is given and the results of a numerical solution of a three-criteria transport-and-warehouse problem are presented on a real example of a Russian company in the DIY retail sector. Due to the large dimension of this problem, its solution was obtained in the MATLAB computer mathematics system. It is shown that as a result of optimal attachment of delivery regions to distribution centers and, accordingly, due to a reduction in vehicle mileage, CO₂ emissions into the atmosphere can be reduced by 30%.

For citation

Bochkarev A.A., Fu Ciaci (2023) Opredelenie optimal'nogo mestopolozheniya mnozhestva skladov v kontekste zelenoi tsepi postavok [Determining the optimal location of multiple warehouses in the context of a green supply chain]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 13 (7A), pp. 110-138. DOI: 10.34670/AR.2023.70.98.012

Keywords

Green supply chain, multiple warehouse location problem, mixed integer linear programming, optimality, retail.

References

1. Akinc U. (1977) An efficient branch and bound algorithm for the capacitated warehouse location problem. *Management Sciences*, 23 (6), pp. 585-594.
2. Alfandari L. (2022) A tailored Benders decomposition approach for last-mile delivery with autonomous robots. *European Journal of Operational Research*, 299, pp. 510-525.
3. Almouhanna A. (2020) The location routing problem using electric vehicles with constrained distance. *Computers and Operations Research*, 115, pp. 104864.
4. Alp O. (2022) Transitioning to sustainable freight transportation by integrating fleet replacement and charging infrastructure decisions. *Omega*, 109, pp. 102595.
5. Arnau Q. (2022) A biased-randomized discrete-event heuristic for coordinated mulei-vehicle container transport across interconnected networks. *European Journal of Operational Research*, 302, pp. 348-362.
6. Bochkarev A.A. (2022) *Nadezhnost' i ustoichivost' tsepei postavok: modeli i al-goritmy* [Reliability and sustainability of supply chains: models and algorithms]. St. Petersburg: Skifiya-print Publ.
7. Brandao J. (2020) A memory-based iterated local search algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 284, pp. 559-571.
8. Daroudi S. (2021) The minimum latency in location routing fuzzy inventory problem for perishable multi-product materials. *Applied Soft Computing*, 110, pp. 107543.
9. Emamian Y. (2021) Developing and solving an integrated model for production routing in sustainable closed-loop supply. *Journal of Cleaner Production*, 302, pp. 126997.
10. Frank M. (2021) Optimizing routing and delivery patterns with multi-compartment vehicles. *European Journal of Operational Research*, 293, pp. 495-510.
11. Geoffrion A.M. (1974) Multicommodity distribution system design by benders decomposition. *Management Sciences*, 20 (5), pp. 453-466.
12. Ghasemi P. (2019) Uncertain multi-objective multi-commodity multi-period multi-vehicle location-allocation model for earthquake evacuation planning. *Applied Mathematics and Computation*, 350, pp. 105-132.
13. Govindan K. (2023) A location-inventory-routing problem to design a circular closed-loop supply chain network with carbon tax policy for achieving circular economy: An augmented epsilon-constraint approach. *International Journal of Production Economics*, 257, pp. 108771.
14. Govindan K. (2020) An integrated hybrid approach for circular supplier selection and closed loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 242, pp. 118317.
15. Lin B. (2019) The location -allocation model for multi-classification-yard location problem. *Transportation Research Part E*, 122, pp. 283-308.
16. Ma Y. (2021) A bi-level multi-objective location-routing model for municipal waste management with obnoxious effects. *Waste Management*, 135, pp. 109-121.
17. Mardan E. (2019) An accelerated benders decomposition algorithm for a bi-objective green closed loop supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*, 235, pp. 1499-1514.
18. Nageswara Reddy K. (2022) Multi-period green reverse logistics network design: An improved Benders-decomposition-based heuristic approach. *European Journal of Operational Research*, 303, pp. 735-752.
19. Nasr A.K. (2021) A novel fuzzy multi-objective circular supplier selection and order allocation model for sustainable closed-loop supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 287, pp. 124994.
20. Nayeri S. (2020) Multi-objective fuzzy robust optimization approach to sustainable closed-loop supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 148, pp. 106716.
21. Raa B. (2021) Multi-vehicle stochastic cyclic inventory routing with guaranteed replenishments. *International Journal of Production Economics*, 234, pp. 108059.

22. Rabbani M. (2019) A stochastic multi-period industrial hazardous waste location-routing problem: Integrating NSGA-II and Monte Carlo simulation. *European Journal of Operational Research*, 272, pp. 945-961.
23. Reihaneh M. (2019) A branch-and-price algorithm for a vehicle routing with demand allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 272, pp. 523-538.
24. Sadeghi Ahangar S. (2021) Sustainable design of a municipal solid waste management system in an integrated closed-loop supply chain network using a fuzzy approach: a case study. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 38 (5). pp. 323-340.
25. Salehi-Amiri A. (2021) Designing a sustainable closed-loop supply chain network for walnut industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 141, pp. 110821.
26. Tavana M. (2022) A comprehensive framework for sustainable closed-loop supply chain network design. *Journal of Cleaner Production*, 257, pp. 129777.
27. Van der Heide G. (2021) Cross docking for libraries with a depot. *European Journal of Operational Research*, 290, pp. 749-765.
28. Wang M. (2022) A branch-and-price algorithm for location routing problems with pick-up stations in the last mile distribution system. *European Journal of Operational Research*, 303, pp. 1258-1276.
29. William J. (1958) A warehouse-location problem. *Operation Research*, 6, pp. 252-263.
30. Yavari M. (2019) Heuristic method for robust optimization model for green closed-loop supply chain network design of perishable goods. *Journal of Cleaner Production*, 226, pp. 282-305.
31. Yazdekhashti A. (2022) A two-echelon two-indenture warranty distribution network development and optimization under batch-ordering inventory policy. *International Journal of Production Economics*, 249, pp. 108508.
32. Zhen L. (2019) Green and sustainable closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 227, pp. 1195-1209.