

Е.Д. Григорьева¹, В.А. Ушаков²

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУЗОВ ПО РАЗНОТИПНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВАМ



¹ Елизавета Дмитриевна Григорьева,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (903)098-76-31, E-mail: lizarapne@gmail.com.



² Виталий Анатольевич Ушаков,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)775-05-30, E-mail: ushakov_va@spbstu.ru.

Аннотация

В работе рассмотрена задача распределения грузов по разнотипным транспортным средствам, решаемая с помощью статической модели и алгоритма. Исследованы изменения показателей распределения грузов в зависимости от имеющихся ресурсов, транспортных средств, а также от изменения количества пунктов доставки и отправки. Обсуждаются перспективы использования статической модели для решения транспортно-логистических задач. Предложены практические рекомендации для оптимального распределения грузов с использованием разнотипных транспортных средств.

Ключевые слова: транспортно-логистическая задача, моделирование, принятие решений, статическая модель, разнотипные транспортные средства, распределение грузов.

Введение

В условиях роста глобализации, цифровизации и усиления конкуренции в логистике повышается спрос на эффективные методы

организации транспортно-логистических процессов. Оптимизация таких процессов позволяет сократить издержки, повысить скорость доставки и минимизировать ресурсные затраты.

Несмотря на существующие методы оптимизации логистических процессов, остается актуальной задача адаптивного распределения грузов при изменяющихся условиях: вариативности парка транспортных средств (ТС), динамики пунктов отправки и доставки, а также ограниченности ресурсов.

Моделирование играет ключевую роль в решении транспортно-логистических задач, поскольку позволяет анализировать сложные системы, прогнозировать их поведение и находить оптимальные решения. Современные исследования в области моделирования логистических процессов охватывают широкий спектр методов, включая линейное программирование [1-3], имитационное моделирование [4-8] и методы многокритериальной оптимизации [9,10]. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов [11-13], как инструмент оценки качества систем, применяется в логистике для сравнения альтернативных решений. Применение методов квалиметрии дает возможность количественно оценивать качество различных вариантов распределения. В сочетании с теорией принятия решений [14-16], обеспечивающей научный подход к выбору наилучшей стратегии, она позволяет формализовать процесс выбора оптимальной стратегии распределения.

В [17] была разработана статическая модель, позволяющая решать задачу оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС.

Целью данной статьи является разработка практических рекомендаций для оптимального распределения грузов с использованием разнотипных транспортных средств.

В статье решается задача исследования изменения показателей распределения грузов в зависимости от имеющихся ресурсов, типов ТС, а также от изменения количества пунктов доставки и отправки.

Методы

При решении задачи оптимального планирования доставки грузов с использованием разнотипных ТС будем предполагать, что нам известны группировки разнотипных ТС, где для каждого конкретного объекта известны: грузоподъемность ТС, объем грузового контейнера ТС, объем бензобака, минимально/максимально возможные значения скорости движения ТС, а также начальный пункт отправки ТС. ТС бывают следующих видов: большое грузовое ТС (например, седельный тягач), среднее грузовое ТС (например, фургон), малое грузовое ТС (например,

грузовой микроавтобус), мини грузовое ТС (например, пикап), микро грузовое ТС (например, ровер).

ТС обозначим (1):

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_s\}, \quad (1)$$

где s – количество ТС.

Кроме того, нам известна информация о местоположении склада; пунктов выдачи грузов, промежуточных складов и об адресах, на которые необходимо выполнить доставку «на дом», а также информация о грузах, которые находятся в указанных точках.

Все пункты обозначим, как (2):

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}, \quad (2)$$

где n – суммарное количество складов, пунктов выдачи грузов, промежуточных складов и адресов, на которые необходимо выполнить доставку «на дом».

Дистанции между пунктами представим в виде матрицы смежности, где 0 будет означать отсутствие прямого маршрута.

В зависимости от вида ТС могут осуществлять доставки только в определенные пункты (Таблица 1).

Таблица 1. Доступные пункты для различных видов ТС

Вид ТС	Доступные виды пунктов
Большое грузовое ТС	Склад, промежуточный склад
Среднее грузовое ТС	Склад, промежуточный склад, пункт выдачи, доставка «на дом»
Малое грузовое ТС	Склад, промежуточный склад, пункт выдачи, доставка «на дом»
Мини грузовое ТС	Промежуточный склад, пункт выдачи, доставка «на дом»
Микро грузовое ТС	Доставка «на дом»

ТС перевозят грузы, о которых известна следующая информация: категория массы груза (Таблица 2); категория объема груза (Таблица 3); начальный пункт местонахождения груза и пункт, в который необходимо выполнить доставку; а также статус груза («ожидает погрузку в ТС», «в пути», «доставлен» и «возврат на склад»). Под статусом понимаем этап транспортировки, на котором находится груз в текущий момент времени.

Грузы, выразим (3):

$$G = \{G_1, G_2, \dots, G_g\}, \quad (3)$$

где g – количество грузов, которые необходимо доставить.

Таблица 2. Категории массы грузов

Категория	XS	S	M	L	XL	XXL
Диапазон значений массы груза, кг	0 – 0,5	0,5 - 1	1 - 5	5 - 10	10 – 50	50 – 100

Таблица 3. Категории объема грузов

Категория	XS	S	M	L	XL	XXL
Диапазон значений объема груза, м ³	0 – 0,1	0,1 – 0,3	0,3 – 0,5	0,5 – 1	1 – 2	2 – 3

В зависимости от категории массы и объема доставка груза может выполняться на определенных видах транспортных средств (Таблица 4).

Таблица 4. Доступные к перевозке категории грузов по массе и объему для различных видов ТС

Вид ТС	Категории массы груза	Категории объема груза
Большое грузовое ТС	M, L, XL, XXL	L, XL, XXL
Среднее грузовое ТС	S, M, L, XL, XXL	M, L, XL
Малое грузовое ТС	XS, S, M, L, XL	S, M, L
Мини грузовое ТС	XS, S, M, L	XS, S, M
Микро грузовое ТС	XS, S, M	XS, S

Для описания статической модели были введены следующие множества и ограничения. Во-первых, ограничение на вместимость грузового отсека ТС. Во-вторых, на грузоподъемность ТС. В-третьих, необходимо учитывать время доставки груза и не выходить за поставленные сроки. В-четвертых, ограниченный объем бензобака.

Статическая модель выполняет распределение грузов по ТС и рассчитывать прибыль от выполненных доставок, обеспечивая максимизацию прибыли от доставки грузов с учетом соблюдения временных интервалов доставки и оптимального использования ТС.

Целевая функция представлена формулой (4):

$$J = \sum_{l=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g \left(\frac{\delta_{G_i}}{t_i - T} * x_{ij} - \left(\frac{W_{S_j}}{Q_{S_j} * R_l} * D_{S_j} \right) * x_{ij} - t_i \right) \rightarrow \max \quad (4)$$

, где T – итоговое время доставки каждого груза, t_i – время доставки груза, A_i – расходы на перевозку груза, δ_{G_i} – доходы от доставки груза, Q_{S_j} – среднее время движения ТС, D_{S_j} – средняя стоимость заправки. W_{S_j} – средняя скорость движения ТС.

Решаемая задача оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС является сложной и многокритериальной. Существующие методы решения не учитывают необходимость своевременности доставки, использование группировки ТС с различными массогабаритными характеристиками перевозимых грузов.

Исходя из этого необходимо разработать специальное программное модельно-алгоритмическое обеспечение для решения данной задачи [14-16].

Алгоритм решения задачи оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС представлен на рисунке 1. Алгоритм описывает последовательность действий для решения задачи оптимального планирования доставок грузов, стремясь найти оптимальный способ распределения грузов по ТС и получить максимальную прибыль от доставки с учетом всех ограничений. Для получения требуемого результата используются методы линейного программирования.

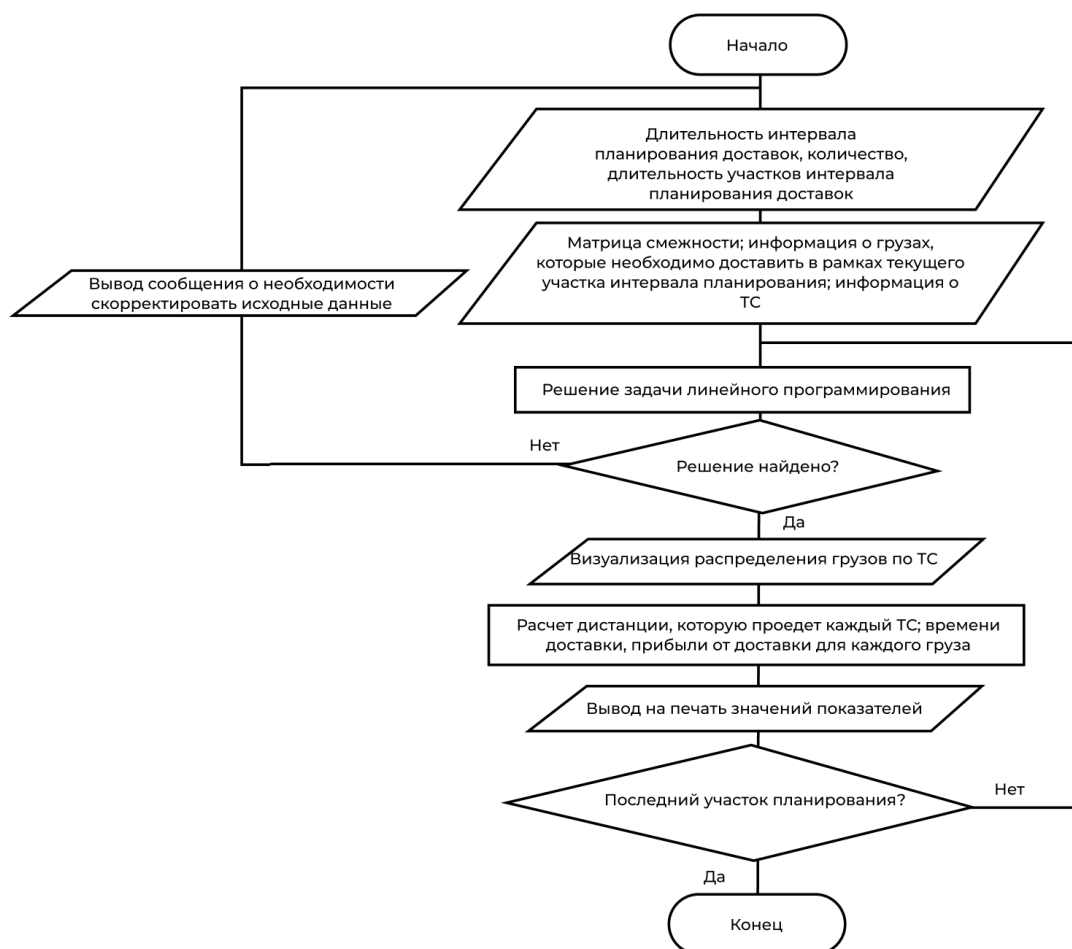


Рис. 1. Алгоритм решения задачи оптимального распределения грузов с использованием разнотипных ТС

При исследовании статической модели будем изменять количество пунктов, ТС и их начальное распределение по «точкам». Полученные результаты будем сравнивать по основным критериям: прибыль от доставки, количество ТС, используемых для доставки, количество грузов, доставленных с опозданием, общее время выполнения доставок. На основе сравнения данных показателей выявим закономерности и разработаем

практические рекомендации для получения оптимального плана доставок в рамках поставленной транспортно-логистической задачи.

Результаты

В качестве примера рассмотрим интервал планирования в 24 часа, в рамках которого необходимо доставить 240 грузов с использованием трех больших грузовых ТС, пяти средних грузовых ТС, пяти малых грузовых ТС, десяти мини грузовых ТС и десяти микро грузовых ТС. Первоначально все грузы находятся на складе, к каждой категории массы и объема относится по 40 грузов. 220 грузов необходимо доставить на пункты выдачи, а 20 - «на дом». Для выполнения доставок мы имеем 1 склад, 10 промежуточных складов, 20 пунктов выдачи и 20 адресов, а также нам известна информация о расстоянии между ними. Выполнено разделение территории выполнения доставок на 3 зоны.

Рассмотрим решение задачи при различном начальном распределении ТС. На рисунке 2 представлено примерное расположение пунктов относительно друг друга. В нулевой момент времени для первого варианта распределения ТС расположены следующим образом: большие грузовые ТС, средние грузовые ТС и малые грузовые ТС находятся на складе, мини и микро грузовые ТС находятся на промежуточных складах.

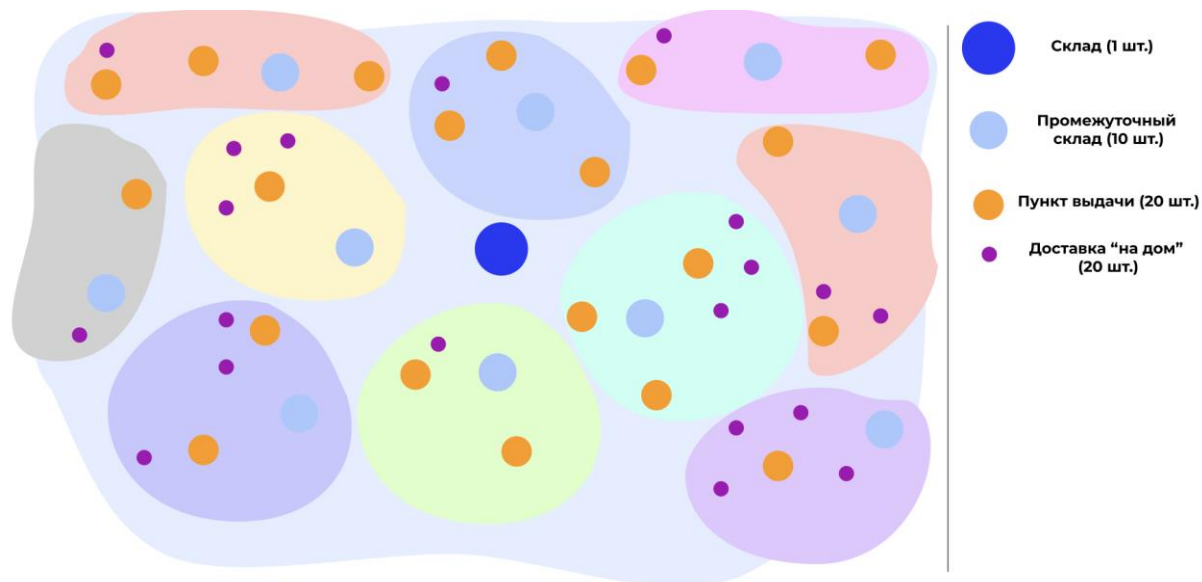


Рис. 2. Расположение пунктов в нулевой момент времени для первого варианта распределения

В результате были получены следующие значения показателей: прибыль от доставок составила 63665 рублей, для выполнения доставок было задействовано 28 ТС, с опозданием было доставлено 0 грузов, общее время выполнения доставок составило 22 часа.

Рассмотрим несколько различных ситуаций, изменяя первоначальное расположение ТС:

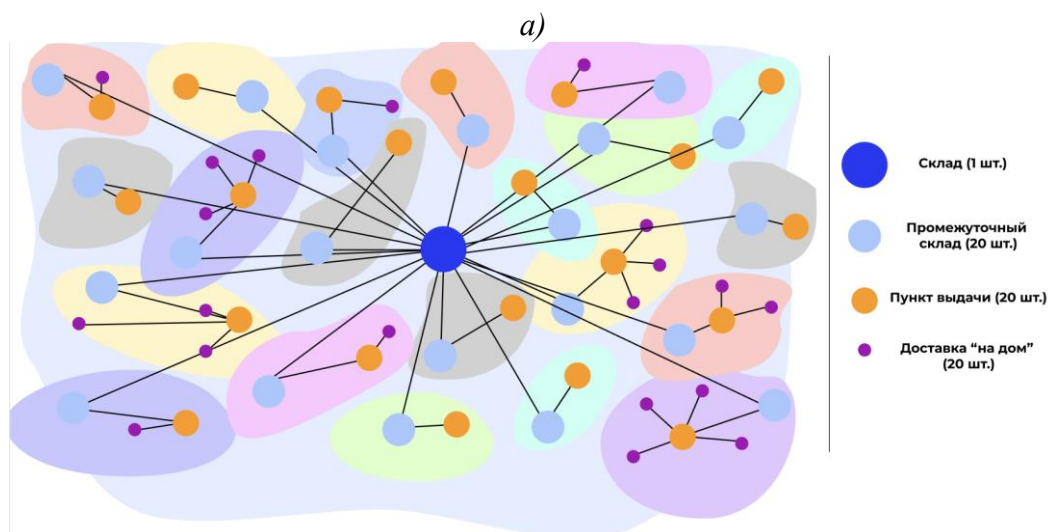
- большие грузовые ТС, средние грузовые ТС находятся на складе, малые, мини и микро грузовые ТС равномерно распределены по промежуточными складам (вариант 2);
- большие, средние, малые и мини грузовые ТС находятся на складе, микро грузовые ТС находятся на промежуточных складах (вариант 3);

В таблице 5 представлены полученные значения показателей для каждого варианта распределения.

Таблица 5. Значения показателей для каждого варианта первоначального распределения ТС

	Прибыль от доставки, руб.	Количество грузов, доставленных с опозданием, шт.	Количество ТС, используемых для доставки, шт.	Общее время выполнения доставок, часы
Вариант 1	63665	0	28	22
Вариант 2	60380	3	31	23
Вариант 3	59754	0	30	24

Изменим количество промежуточных складов и рассчитаем показатели для каждого варианта распределения ТС. На рисунке 3 представлены расположения пунктов для трех различных ситуаций.



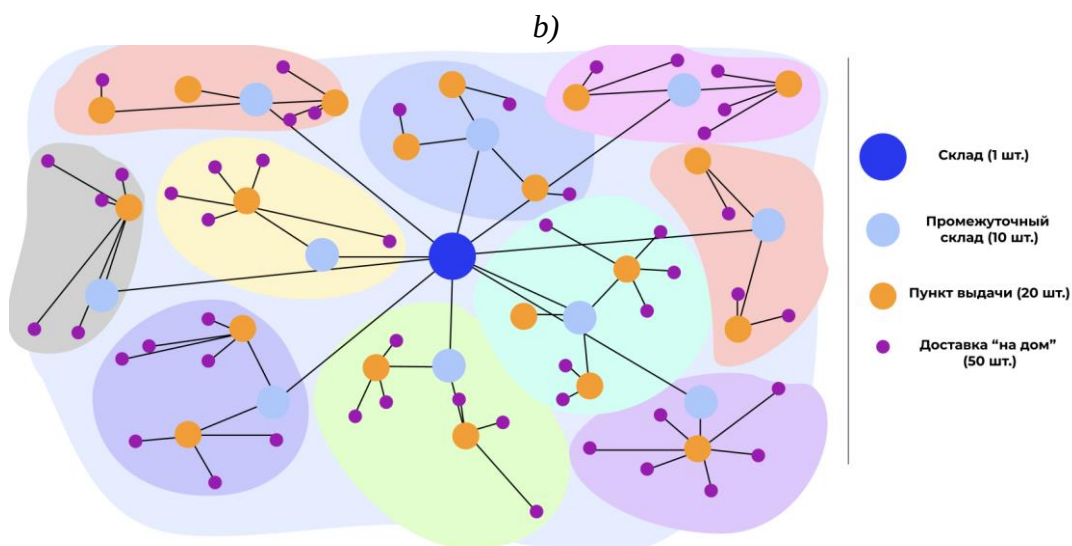
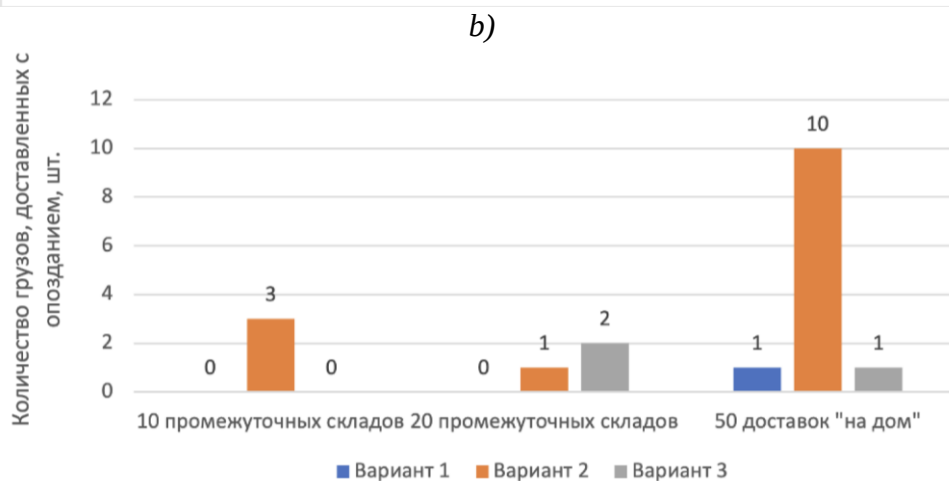
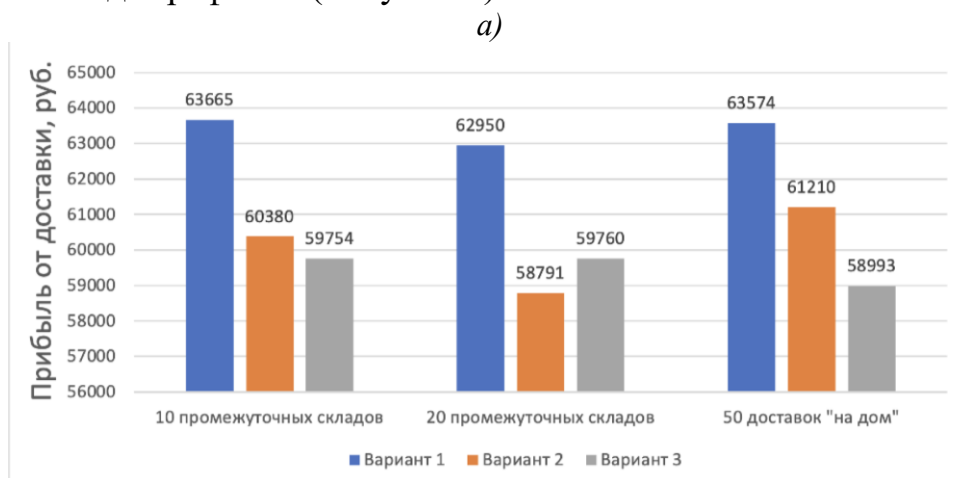


Рис. 3. Расположение пунктов в нулевой момент времени *a)* при наличии 20 промежуточных складов; *b)* при наличии 50 доставок «на дом»

Обсуждение

Представим полученные значения показателей для каждой из ситуаций в виде графиков (Рисунок 4).



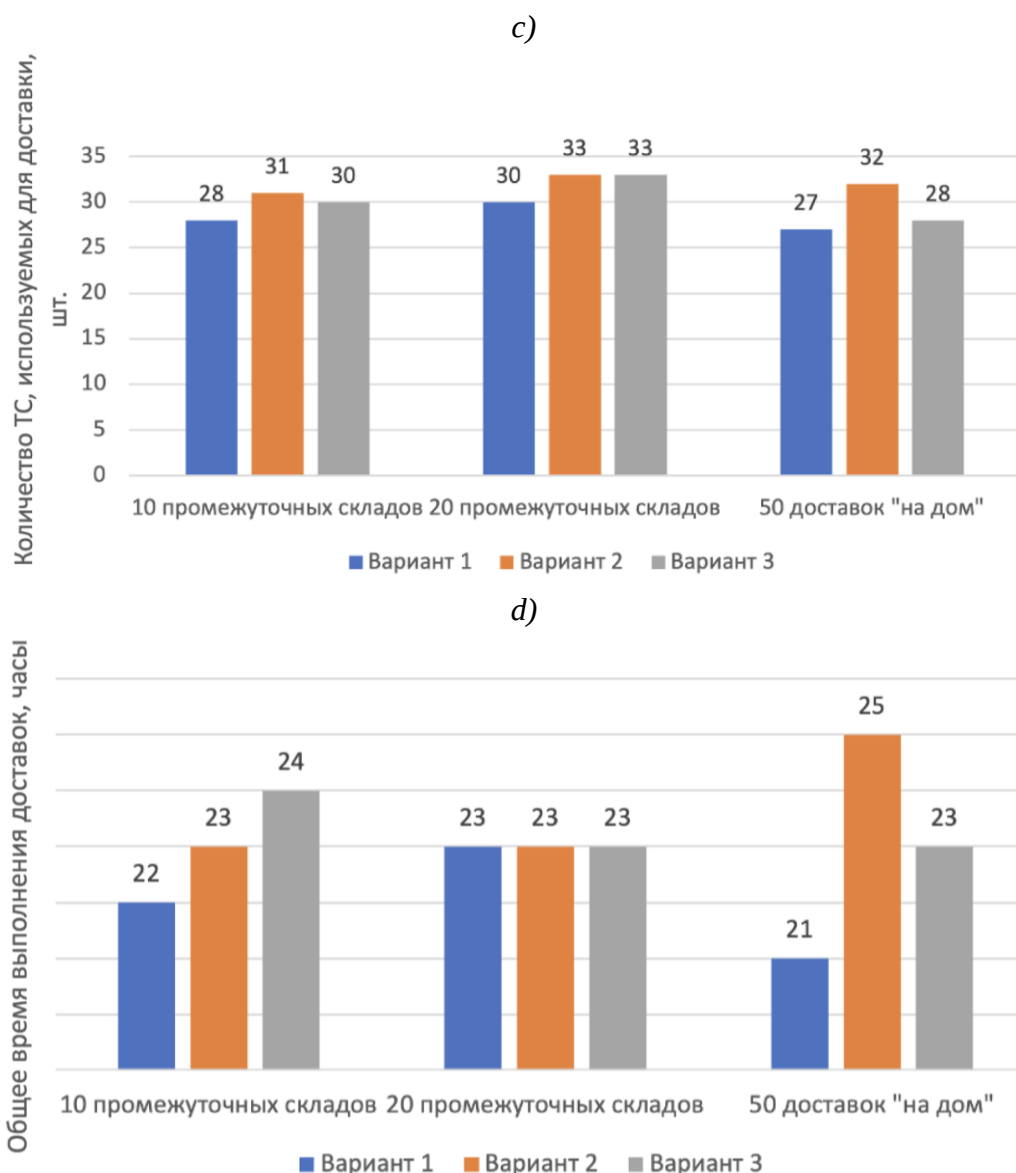


Рис. 4. Значения показателей для каждой из ситуаций расположения пунктов *a)* прибыль от доставки; *b)* количество грузов, доставленных с опозданием; *c)* количество ТС, используемых для доставки; *d)* общее время выполнения доставки

Исходя из графиков можно выявить следующие закономерности:

- чем больше ТС находится на главном складе, тем выше значения показателей прибыли и ниже общее время выполнения доставки;
- наличие мини грузовых ТС на промежуточных складах положительно влияет на прибыль и время и сокращает количество задействованных в доставках ТС;
- с увеличением количества промежуточных складов уменьшается общее время доставки;
- в случае, когда количество промежуточных складов сравнивается с количеством пунктов выдачи увеличивается количество

задействованных в доставках ТС и общее время выполнения доставок;

- большое количество «доставок на дом» не сказывается на времени выполнения доставок и общем времени выполнения в том случае, если на промежуточных складах находится большое количество мини транспортных средств.

Таким образом, для получения оптимального плана распределения грузов по ТС необходимо стараться максимизировать количество ТС на складе – начальной точке хранения грузов; располагать некоторое количество мини грузовых ТС на промежуточных складах для выполнения доставок грузов «на дом», а также предполагать наличие промежуточных складов, стремящееся к количеству пунктов выдачи.

Заключение

В данной статье была исследована статическая модель распределения грузов по разнотипным ТС с учетом их технических характеристик, ограничений по грузоподъемности, объему и времени доставки. Разработанный подход позволяет оптимизировать логистические процессы, максимизировать прибыль и минимизировать временные затраты за счет рационального использования ТС и наличия промежуточных складов.

Предложенная модель и алгоритмы могут быть использованы в логистических компаниях, службах доставки и складских системах для повышения эффективности транспортных операций. Дальнейшее развитие работы предполагает адаптацию модели к реальным условиям с учетом динамически меняющейся среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Григорьева Е.Д., Ушаков В.А. Анализ программных продуктов для решения задач линейного программирования // Фундаментальные и прикладные исследования в области управления, экономики и торговли : Сборник трудов Всероссийской научно-практической и учебно-методической конференции. (СПб, 13–16 мая 2025 года). СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025.
- [2] Головачева М.И. Анализ программных продуктов для решения задач линейного программирования. Форум молодых ученых. 2017. № 2(6). С. 38-44. EDN: YGJOLP.
- [3] Леонова Н.Л. Задачи линейного программирования и методы их решения: учебно-методическое пособие. ВШТЭ СПбГУПТД. СПб., 2017. – 75 с.

- [4] Балухто А.Н. Соколов Б.В., Карсаев О.В. Облачная платформа iwebsim как средство имитационного моделирования космических систем. Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021) : Труды конференции (СПб, 20–22 октября 2021 года). СПб: АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», 2021. С. 95-104. EDN: SYMFNM.
- [5] Perl J., Memmert D. Modeling. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 57–64. DOI: [10.1007/978-3-662-68313-2_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-68313-2_8).
- [6] Perl J., Memmert D. Simulation. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 81–88. DOI: [10.1007/978-3-662-68313-2_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-68313-2_11).
- [7] Calixto W.P., Araújo W.R.H., Morais L.D.S., Reis M.R.C. System, Modeling, Simulation, and Optimization. In: Control and Tracking Techniques for Switched Reluctance Machines. Power Systems. Springer, Cham. 2025. Pp. 37–56. DOI: [10.1007/978-3-031-86727-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-86727-9_3).
- [8] Xue D., Pan F. Modeling and Simulation with Simulink. In: MATLAB and Simulink in Action. Springer, Singapore. 2024. Pp. 387–419. DOI: [10.1007/978-981-99-1176-9_13](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1176-9_13).
- [9] Гусев Д.А., Егорова Т.В. Проблемы планирования транспортного обеспечения поставок в условиях неопределенности. Менеджмент сегодня. 2023. Т. 1. С. 44-54. DOI: [10.36627/2304-6473-2023-1-1-44-54](https://doi.org/10.36627/2304-6473-2023-1-1-44-54). EDN: VZMWLM.
- [10] Зимин И.Н., Иванилов Ю.П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления. Журнал вычислительной математики и математической физики. 1971. №3. С. 632 – 641.
- [11] Микони С. В. Теория принятия управленческих решений : учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. СПб : Лань, 2022. 384 с.
- [12] Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов. М.: РАН, 2018. 314 с. DOI: [10.31857/S9785907036321000001](https://doi.org/10.31857/S9785907036321000001). EDN: VVUKQW.
- [13] Захаров В.В., Баранов А.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Модели и алгоритмы централизованного и децентрализованного планирования применения группировки подвижных объектов на основе теории дифференциальных игр // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4. Ч. 1. С. 171-178. DOI: [10.37220/MIT.2023.62.4.021](https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021). EDN: MFSVBZ.

- [14] Poler R., Mula J., Díaz-Madroñero M., Sanchis R. Decision Theory. In: Operations Research Problems. Springer, London. 2025. Pp. 235–322. DOI: [10.1007/978-1-4471-7546-9_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7546-9_7).
- [15] Bartholomae F., Wiens M. Decision Theory. In: Game Theory and Applications. Classroom Companion: Economics. Springer, Wiesbaden. 2024. Pp. 3–31. DOI: [10.1007/978-3-658-44608-6_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-44608-6_1).
- [16] Ilin I.: Integration of information and management technologies. 2022. Vol. 1. No. 1. Pp. 24–32. DOI: [10.57809/2022.1.1.2](https://doi.org/10.57809/2022.1.1.2). EDN: HHZYBY.
- [17] Григорьева Е.Д. Ушаков В.А. Модель и алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Известия ЮФУ. Технические науки. 2025. № 2(244). С. 151-161. DOI: [10.18522/2311-3103-2025-2-151-161](https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-151-161).

E.D. Grigoreva ¹, V.A. Ushakov ²

RESEARCH OF A STATIC MODEL FOR LOAD DISTRIBUTION AMONG TRANSPORT VEHICLES DIFFERENT TYPES

¹ Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia.

Abstract

The paper considers the problem of cargo distribution among different types of transport vehicles, solved using a static model and algorithm. Changes in cargo distribution indicators are studied depending on available resources, transport vehicles, as well as on changes in the number of delivery and dispatch points. The prospects of using a static model to solve transport and logistics problems are discussed. Practical recommendations for optimal distribution of cargo using different types of transport vehicles are proposed.

Key words: transport and logistics problem, modeling, decision making, static model, different types of transport vehicles, cargo distribution.

REFERENCES

- [1] Grigoreva E.D., Ushakov V.A. Analysis of software tools for solving linear programming problems. Fundamental and applied research in the field of management, economics, and trade: Proceedings of the All-Russian Scientific-Practical and Educational-Methodological Conference. (St. Petersburg, May 13–16, 2025). St. Petersburg: POLYTECH-PRESS, 2025. (rus.)

- [2] Golovacheva M.I. Analysis of software tools for solving linear programming problems. Forum of Young Scientists. 2017. No. 2(6). Pp. 38-44. (rus.)
- [3] Leonova N.L. Linear programming problems and methods for their solution: a teaching aid. VSHTe SPbSUPTD. St. Petersburg, 2017. 75 p. (rus.)
- [4] Balukhto A.N., Sokolov B.V., Karsaev O.V. The iwebsim cloud platform as a tool for simulation modeling of space systems. Tenth All-Russian Scientific-Practical Conference on Simulation Modeling and Its Applications in Science and Industry "Simulation Modeling. Theory and Practice" (IMMOD-2021): Conference Proceedings (St. Petersburg, October 20–22, 2021). St. Petersburg: JSC "Shipbuilding and Ship Repair Technology Center," 2021. Pp. 95-104. (rus.)
- [5] Perl J., Memmert D. Modeling. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 57–64. DOI: [10.1007/978-3-662-68313-2_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-68313-2_8).
- [6] Perl J., Memmert D. Simulation. In: Memmert D. (eds) Computer Science in Sport. Springer, Berlin, Heidelberg. 2024. Pp. 81–88. DOI: [10.1007/978-3-662-68313-2_11](https://doi.org/10.1007/978-3-662-68313-2_11).
- [7] Calixto W.P., Araújo W.R.H., Morais L.D.S., Reis M.R.C. System, Modeling, Simulation, and Optimization. In: Control and Tracking Techniques for Switched Reluctance Machines. Power Systems. Springer, Cham. 2025. Pp. 37–56. DOI: [10.1007/978-3-031-86727-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-86727-9_3).
- [8] Xue D., Pan F. Modeling and Simulation with Simulink. In: MATLAB and Simulink in Action. Springer, Singapore. 2024. Pp. 387–419. DOI: [10.1007/978-981-99-1176-9_13](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1176-9_13).
- [9] Gusev D.A., Egorova T.V. Problems of transport supply planning under uncertainty. Management Today. 2023. Vol. 1. Pp. 44-54. DOI: [10.36627/2304-6473-2023-1-1-44-54](https://doi.org/10.36627/2304-6473-2023-1-1-44-54). (rus.)
- [10] Zimin I.N., Ivanilov Yu.P. Solving network planning problems by reducing them to optimal control problems. Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. 1971. No. 3. Pp. 632–641. (rus.)
- [11] Mikoni S.V. Theory of managerial decision-making: a textbook for universities. 2nd ed., rev. and exp. St. Petersburg: Lan, 2022. 384 p. (rus.)
- [12] Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Qualimetry of models and polymodel complexes. Moscow: RAS, 2018. 314 p. DOI: [10.31857/S9785907036321000001](https://doi.org/10.31857/S9785907036321000001). (rus.)
- [13] Zakharov V.V., Baranov A.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Models and algorithms for centralized and decentralized planning of mobile object group applications based on differential game theory. Marine Intelligent Technologies. 2023. No. 4. Part 1. Pp. 171-178. DOI: [10.37220/MIT.2023.62.4.021](https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021). (rus.)

- [14] Poler R., Mula J., Díaz-Madroñero M., Sanchis R. Decision Theory. In: Operations Research Problems. Springer, London. 2025. Pp. 235–322. DOI: [10.1007/978-1-4471-7546-9_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-7546-9_7).
- [15] Bartholomae F., Wiens M. Decision Theory. In: Game Theory and Applications. Classroom Companion: Economics. Springer, Wiesbaden. 2024. Pp. 3–31. DOI: [10.1007/978-3-658-44608-6_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-44608-6_1).
- [16] Ilin I.: Integration of information and management technologies. 2022. Vol. 1. No. 1. Pp. 24–32. DOI: [10.57809/2022.1.1.2](https://doi.org/10.57809/2022.1.1.2).
- [17] Grigoreva E.D., Ushakov V.A. Model and algorithm for solving a transport-logistics problem of timely cargo delivery using a group of robotic complexes. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2025. No. 2(244). Pp. 151-161. DOI: [10.18522/2311-3103-2025-2-151-161](https://doi.org/10.18522/2311-3103-2025-2-151-161). (rus.)