

Е.Д. Григорьева, В.А. Ушаков

**МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ  
ЗАДАЧИ СВОЕВРЕМЕННОЙ ДОСТАВКИ ГРУЗОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ГРУППИРОВКИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Целью исследования является повышение качества оперативного планирования (программного управления) логистических процессов в условиях современных городских систем при взаимодействии группировки робототехнических комплексов. Качество управления в рамках данного исследования будет оцениваться по количеству доставок выполненных позже установленных директивных сроков. Поставленная в ходе исследования цель декомпозируется на следующие задачи: системный анализ современного состояния исследований в области логистики мегаполиса, выполнение содержательной и формальной постановки задачи оперативного планирования логистических процессов в мегаполисе с использованием группировки робототехнических комплексов, разработка модели и алгоритма оперативного планирования логистических процессов в мегаполисе с использованием группировки робототехнических комплексов, разработка специального модельно-алгоритмического обеспечения и его программного прототипа решения задачи оперативного планирования логистических процессов в мегаполисе с использованием группировки робототехнических комплексов. Проактивное (упреждающего) управление группировкой робототехнических комплексов при решении транспортно-логистических задач в мегаполисе в рамках концепции «Умный город» позволяет повысить экономическую эффективность доставки грузов. В рамках статьи рассматривается научно-техническая задача синтеза технологий (планов) своевременной доставки малогабаритных грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Теоретическая значимость заключается в применении концепции комплексного (системного) моделирования и проактивного (упреждающего) управления, а практическая значимость – в обеспечении своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов в условиях мегаполиса. В статье рассмотрен пример решения задачи оперативного планирования логистических процессов на примере Иннополиса с использованием характеристик роботодоставщиков компании Яндекс (в качестве робототехнических комплексов). В ходе исследования проведен анализ различных вариантов целевых функций: максимизация прибыли и минимизация времени доставки; максимизация прибыли и минимизация времени; минимизация количества робототехнических комплексов. Показателями оценки полученных результатов были выбраны: суммарная прибыль от доставок; количество доставок, доставленных не вовремя и общее количество выполненных заказов. Наиболее подходящими целевыми функциями для решения задачи являются минимизация времени или одновременная минимизация времени и максимизация прибыли. Кроме того, в заключении приведены направления дальнейших исследований.*

*Логистика; группировка РТК; группировка робототехнических комплексов; синтез технологий; статическая модель; оперативное планирование; специальное модельно-алгоритмическое обеспечение; линейное программирование; умный город; мегаполис.*

E.D. Grigorieva, V.A. Ushakov

**MODEL AND ALGORITHM OF OPERATIONAL PLANNING OF LOGISTIC  
PROCESSES OF TIMELY DELIVERY OF CARGO WITH THE INTERACTION  
OF A GROUP OF ROBOTIC COMPLEXES**

*The purpose of the study is to improve the quality of operational planning (program control) of logistics processes in the conditions of modern urban systems with the interaction of a group of robotic systems. The quality of management in this study will be assessed by the number of deliveries completed after established directive deadlines. The goal set during the study is decomposed into the following tasks: system analysis of the current state of research in the field of metropolitan logistics, implementation of a substantive and formal formulation of the problem of operational planning of logistics processes in a metropolis using a group of robotic complexes, development of a model and algorithm for operational planning of logistics processes in a metropolis using a grouping of robotic complexes, development of special model-algorithmic support and its software prototype for solving the problem of operational planning of logistics processes in a metropolis using a grouping of robotic complexes. Proactive (anticipatory) management of a group of robotic systems when solving transport and logistics problems in a metropolis with*

*in the framework of the “Smart City” concept allows increasing the economic efficiency of cargo delivery. The article examines the scientific and technical problem of synthesizing technologies (plans) for the timely delivery of small-sized cargo using a group of robotic systems. The scientific significance lies in the application of the concept of integrated (system) modeling and proactive (anticipatory) management, and the practical significance lies in ensuring timely delivery of goods using a group of robotic complexes in a metropolis. The article discusses an example of solving the problem of operational planning of logistics processes using the example of Innopolis using the characteristics of Yandex delivery robots (as robotic complexes). During the study, an analysis of various options for objective functions was carried out: maximizing profit and minimizing delivery time; profit maximization; minimizing time; minimizing the number of robotic systems. The following indicators were chosen to evaluate the results obtained: total profit from deliveries; the number of deliveries not delivered on time and the total number of completed orders. The most suitable objective functions for solving the problem are time minimization or simultaneous time minimization and profit maximization. In addition, the conclusion provides directions for further research.*

*Logistics; RTK group; grouping of robotic systems; synthesis of technologies; static model; operational planning; special model and algorithmic support; linear programming; smart city; metropolis.*

**Введение.** Цифровой транспорт – это, во-первых, объединение сферы транспорта, автомобильной промышленности, а также информационных и сетевых технологий. Во-вторых, это информационная система, которая объединяет в себе множество разных технологий и рассматривает транспорт с позиции интеллектуальных, динамических и интерактивных систем, автономных робототехнических комплексов (РТК), беспилотных транспортных средств и межавтомобильной связи. В-третьих, цифровой транспорт сочетает в себе интерактивность, управление транспортными средствами в автоматическом режиме, связь с внешними устройствами, в том числе датчиками интернета вещей (IoT) [1], искусственным интеллектом. В четвертых, это комплексный технологический продукт с разными функциями, который воплощает в себе новые формы аппаратной части автомобилей.

Согласно проведенному обзору основными направлениями развития цифрового транспорта являются объединение в сеть и интеллектуализация. Для межтранспортной сети используются информационные и сетевые технологии, которые осуществляют интернет-связь внутри транспортных средств, между транспортными средствами и человеком, между транспортными средствами, между транспортными средствами и дорогой, между транспортными средствами и обслуживающей информационной платформой.

«Ядро» цифрового транспорта – данные, которые лежат в основе управления [2, 3] и планирования движения транспортных средств и быстрых, удобных, безопасных транспортных услуг. Внедрение цифровой экономики [4–6] в жизнь населения и систему социального управления, в транспортную сферу позволяют перейти к цифровому транспорту. Оптимальное состояние системы цифрового транспорта – это многомерное объединение людей, транспортных средств, дорог и условий на основе информационных и сетевых технологий. Система состоит из множества подсистем, предназначенных для людей, транспортных средств, дорог, среды, и основные ее функции – сбор, обработка, анализ и использование данных о транспортных средствах, дорогах, услугах.

Система цифрового транспорта оказывает огромное влияние на сферу логистики и позволяет оптимизировать транспортные процессы доставки грузов [7]. Использование цифрового транспорта в сфере логистики вносит вклад в формирование передовой и технологичной городской среды будущего. Автоматизация логистических процессов, за счет использования группировок РТК, способствует улучшению экологической ситуации и рациональному использованию городского пространства.

**Анализ предметной области своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов.** В современном мире логистика играет ключевую роль в обеспечении бесперебойной работы городов и, в частности, мегаполисов. Современные мегаполисы стремятся к цифровизации и внедрению инновационных, интеллектуальных решений, направленных на повышение качества жизни населения. Концепция «Умный город» (Smart city) [8–10] – это совокупность цифровых технологий, которые автоматизировано управляют информационными и логистическими процессами. При реали-

зации логистических процессов могут использоваться различные РТК, например, грузовые беспилотные транспортные средства, беспилотные поезда, беспилотные транспортные средства, роботы-курьеры или роботы-доставщики. Поскольку доставка малогабаритных грузов на небольшие расстояния является наиболее востребованным типом доставки в мегаполисах, то в статье рассматривается решение транспортно-логистической задачи с использованием группировок РТК для доставки малогабаритных грузов.

С ростом количества транспортных средств, в том числе и РТК, задействованных в логистических процессах, увеличивается нагрузка на дорожную инфраструктуру и возрастает уровень загрязнения воздуха. В сравнении с личными транспортными средствами, грузовые транспортные средства проезжают в среднем в 1,5–2 раза больше. Это приводит к повышенному потреблению топлива и увеличению выбросов оксида азота. Внедрение роботизированных технологий в сферу логистики позволяет значительно снизить негативное воздействие на окружающую среду, делая доставку более экологичной, за счет использования электроэнергии. Однако применение РТК ведет к очевидной сложности, связанной необходимостью учета уровня заряда аккумуляторных батарей. Например, это может быть вызвано повышенным расходом электроэнергии при движении в гору и необходимостью обеспечить характеристики РТК для баланса между массой РТК и запасом его хода. Поэтому в рамках данного исследования рассматривается случай применения РТК в равнинной местности.

На данный момент на рынке существует множество компаний, занимающихся доставкой, однако использование РТК в этой сфере остается ограниченным. В России самым ярким и успешным примером использования для доставки РТК в режиме «по запросу» является Яндекс. Первые роботы-курьеры компании Яндекс появились на улицах городов России в ноябре 2019 года, и сегодня они доставляют товары в Москве (в столице их около 100 штук), в Иннополисе, в городе Мурино Ленинградской области, на курортах «Роза Хутор» и Красная Поляна в Сочи.

Для решения транспортно-логистических задач существует множество различных методов в теории расписаний [11]. Например, для нахождения первоначального опорного плана можно использовать метод двойного предпочтения, который находит близкое к оптимальному решение транспортной задачи. А использование дельта-метода вместе с методом потенциалов дает возможность найти оптимальный план с наибольшей скоростью вычислений. Однако, решаемая транспортно-логистическая задача своевременной доставки грузов в условиях мегаполиса с использованием группировок РТК для доставки [12, 13] малогабаритных грузов является сложной и многокритериальной. Существующие методы решения не учитывают необходимость своевременности доставки, использование группировки РТК с различными массогабаритными характеристиками перевозимых грузов.

Таким образом, с учетом текущих направлений развития и вызовов цифровой экономики необходимо разработать специальное модельно-алгоритмическое обеспечение [14] и его программный прототип для решения задачи оперативного планирования [15–17] своевременной доставки малогабаритных грузов в условиях мегаполиса с использованием группировки РТК.

**Содержательная и формальная постановки транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов.** Транспортно-логистическая задача своевременной доставки малогабаритных грузов с использованием группировки РТК является сложной и многокритериальной, поэтому на первом этапе будем рассматривать задачу оперативного планирования [18–20] распределения грузов по РТК, которая будет описана с помощью статической модели.

При решении транспортно-логистической задачи, описанной в предыдущем разделе, будем предполагать, что известна группировка РТК, где для каждого конкретного объекта известны: грузоподъемность РТК, объем грузового контейнера РТК, емкость аккумуляторной батареи, минимально/максимально возможные значения скорости движения. Кроме того, нам известны пункты отправки грузов; пункты доставки грузов; информация о грузах, которые необходимо доставить или вернуть на склад, средняя стоимость

одного часа зарядки аккумуляторной батареи. РТК перевозят грузы, о которых известна следующая информация: масса; объем; пункт отправки и пункт доставки груза; а также статус груза («ожидает погрузку в РТК», «в пути», «доставлен» и «возврат на склад»). Под статусом понимаем этап транспортировки, на котором находится груз в текущий момент времени. Предполагается, что каждый РТК оборудован унифицированной многофункциональной аппаратурой (аппаратно-программным комплексом). Также необходимо учитывать, что Интернет-покрытие на территории выполнения доставок не является стабильным. В некоторых зонах связь с РТК не доступна. Поэтому процесс выполнения доставок делится на временные интервалы (участки).

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

Все пункты отправки и доставки грузов обозначим, как (1):

$$O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}, \quad (1)$$

где  $n$  – количество пунктов.

Дистанции между пунктами отправки и пунктами выдачи представим в виде матрицы смежности, где 0 будет означать либо отсутствие прямого маршрута между пунктами, либо его непригодность для РТК.

Грузы, выразим (2):

$$G = \{G_1, G_2, \dots, G_g\}, \quad (2)$$

где  $g$  – количество грузов, которые необходимо доставить.

РТК обозначим (3):

$$S = \{S_1, S_2, \dots, S_s\}, \quad (3)$$

где  $s$  – количество РТК.

Все грузы необходимо доставить в указанные в исходных данных пункты. Дистанция, которую проедет РТК, будет равняться сумме расстояний из матрицы смежности между пунктами отправки и пунктами выдачи (4).

$$R = \sum_{i=1}^g r_i, \quad (4)$$

где  $i \in \{1, 2, \dots, g\}$ .

Для описания системы введем бинарную переменную – взаимосвязь груза и РТК (5). Переменная принимает значение равное 1, если связь между компонентами системы существует и 0 – если связь отсутствует.

$$x_{ij} \in \{0; 1\}, \quad (5)$$

где  $j \in \{1, 2, \dots, s\}$ .

Таким образом, была выполнена содержательная и формальная постановки транспортно-логистической задачи.

**Статическая модель решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов.** Для решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК необходимо описать статическую модель, которая будет выполнять распределение грузов по РТК и в дальнейшем будет рассчитываться прибыль от выполненных доставок. Статическая модель должна обеспечивать максимизацию прибыли от доставки грузов с учетом соблюдения временных интервалов доставки и оптимального использования РТК.

Целевая функция представлена формулой (6):

$$J = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g \left( \frac{\delta_{G_i}}{t_i - T} * x_{ij} - \left( \frac{W_{S_j}}{Q_{S_j} * R_i} * D_{S_j} \right) * x_{ij} - t_i \right) \rightarrow \max, \quad (6)$$

где  $T$  – итоговое время доставки каждого груза,  $t_i$  – время доставки груза,  $A_i$  – расходы на перевозку груза,  $\delta_{G_i}$  – доходы от доставки груза,  $Q_{S_j}$  – среднее время работы до полной разрядки батареи,  $D_{S_j}$  – средняя стоимость полной зарядки аккумулятора,  $W_{S_j}$  – средняя скорость движения РТК.

Математическая модель выражена формулами 7 и 8.

$$\sum_{a=1}^A \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g m_{Gijca} \leq \sum_{a=1}^A M_{Sja} \quad (7)$$

$$\sum_{a=1}^A \sum_{c=1}^C \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g v_{Gijca} \leq \sum_{a=1}^A V_{Sja}, \quad (8)$$

где  $m_{g_i}$  – вес груза,  $M_{S_j}$  – грузоподъемность РТК,  $v_{g_i}$  – объем груза,  $V_{S_j}$  – объем грузового отсека РТК, А – участок временного интервала, С – статус груза.

Обозначим технические ограничения на вместимость грузовых контейнеров, в которых РТК перевозят грузы (9).

$$0 \leq v_{Gica} \leq V, \quad (9)$$

где V – объем контейнера.

Также необходимо учесть технологические ограничения: каждый груз может перевозить только один РТК (10) и расчетное время доставки не должно превышать времени доставки, указанного в характеристиках груза (11).

$$\sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g x_{ij} = 1 \quad (10)$$

$$0 \leq t_i \leq T_i. \quad (11)$$

Таким образом, была разработана статическая модель транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием РТК.

**Алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов.** Алгоритм решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием РТК должен решать задачу оперативного планирования доставок грузов, стремясь найти оптимальный способ распределения грузов по РТК и получить максимальную прибыль от доставки с учетом всех ограничений. Для получения требуемого результата в алгоритме используются методы линейного программирования.

Алгоритм решения транспортно-логистической задачи включает следующие шаги:

*Шаг 1.* Задание длительности интервала планирования доставок, количества и длительности участков интервала планирования доставок;

*Шаг 2.* Задание исходных данных: матрица смежности пунктов доставки и отправки товаров; масса и габариты грузов, которые необходимо доставить в рамках текущего участка интервала планирования; характеристики РТК;

*Шаг 3.* Решение задачи линейного программирования (6)-(11);

*Шаг 4.* Если решение найдено, то выполняется визуализация распределения грузов по РТК, иначе – вывод сообщения о необходимости скорректировать исходные данные;

*Шаг 5.* Расчет дистанции, которую проедет каждый РТК (4); времени доставки, прибыли от доставки для каждого груза;

*Шаг 6.* Вывод на печать значений показателей;

*Шаг 7.* Если участок интервала планирования доставок не последний, то переход к шагу 3;

*Шаг 8.* Подготовка полученных данных к дальнейшему использованию.

Таким образом, разработан алгоритм решения транспортно-логистической задачи, который определяет оптимальное распределение грузов по РТК и рассчитывает прибыль от выполненных доставок.

**Анализ полученных результатов решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов.** Выполнена программная реализация специального модельно-алгоритмического обеспечения решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК на языке программирования высокого уровня Python, а расчет задачи линейного программирования выполнялся с помощью библиотеки PuLP.

Рассмотрим пример решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием РТК и проведем анализ полученных результатов. В качестве примера возьмем характеристики роботов-доставщиков Яндексa, и рассмотрим город Иннополис как малый мегаполис с высоким уровнем развития цифровой экономики. Поскольку задача многокритериальная, а размер статьи ограничен, то рассмотрим

интервал планирования в 24 часа, который разделен на 3 участка постоянства структуры, в рамках которого необходимо доставить 12 малогабаритных грузов с использованием четырех РТК. Все РТК обладают одинаковыми техническими характеристиками: максимальная суммарная масса грузов, доступная к перевозке в одном РТК равняется 20 кг; объем грузового отсека РТК равен 0,06 м<sup>3</sup>; среднее время работы от аккумуляторной батареи – 8 часов; средняя стоимость полной зарядки аккумулятора – 40 рублей; максимальная скорость движения – 6,5 км/ч. В табл. 1 приведена матрица смежности между пунктами отправки и доставки грузов, а в табл. 2 – информация о грузах.

Таблица 1

**Матрицы смежности между пунктами отправки и доставки малогабаритных грузов**

Пункт отправки / доставки	$O_1$	$O_2$	$O_3$	$O_4$	$O_5$	$O_6$
$O_1$	0	1	2	1,5	3	4
$O_2$	4	0	1	2	1,5	3
$O_3$	3	4	0	1	2	1,5
$O_4$	1,5	3	4	0	1	2
$O_5$	2	1,5	3	4	0	1
$O_6$	1	2	1,5	3	4	0

Таблица 2

**Информация о малогабаритных грузах**

Характеристики грузов / грузы	Масса, кг	Объем, м <sup>3</sup>	$t$ , моменты времени	№ пункта отправки	№ пункта доставки
$G_1$	6	0,01	2	1	3
$G_2$	13	0,025	4	1	4
$G_3$	2	0,04	7	2	5
$G_4$	0,5	0,01	8	1	6
$G_5$	5	0,02	8	1	7
$G_6$	6	0,01	3	2	8
$G_7$	15	0,01	5	1	9
$G_8$	7	0,03	6	1	10
$G_9$	10	0,01	2	1	11
$G_{10}$	0,3	0,01	5	2	12
$G_{11}$	0,6	0,03	6	2	13
$G_{12}$	2,5	0,025	4	1	14

В результате решения транспортно-логистической задачи был получен следующий план распределения грузов по РТК (рис. 1). Прибыль от доставки малогабаритных грузов составила 7500 рублей на первом участке, 4000 руб. на втором участке и 3000 руб. на третьем участке.

Проведем исследование влияния различных вариантов целевой функции на суммарную прибыль от доставок; количество доставок, доставленных не вовремя и общее количество выполненных заказов. Введем обозначения для используемых целевых функций:  $J_1$  – максимизация прибыли и минимизация времени от доставки грузов (6);  $J_2$  – максимизация прибыли от доставки грузов (15);  $J_3$  – минимизация времени доставки грузов (16) и  $J_4$  – минимизация количества РТК, задействованных в доставках (17).

$$J_2 = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g (\frac{\delta g_i}{\Gamma - t_i} * x_{ij} - A_i * x_{ij}) \rightarrow \max \quad (15)$$

$$J_3 = \sum_{i=1}^g t_i \rightarrow \min \quad (16)$$

$$J_4 = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^g x_{ij} \rightarrow \min. \quad (17)$$

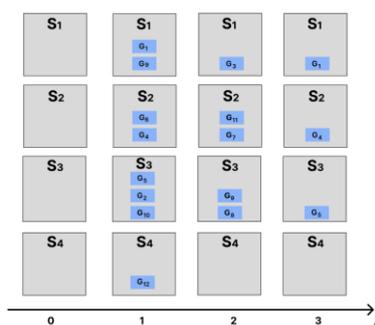


Рис. 1. Распределение грузов по РТК на каждом участке

Результаты решения транспортно-логистических задач с различными целевыми функциями и с различными исходными данными представлены в обобщенном виде на рис. 2, где нумерация графиков совпадает с введенными ранее обозначениями целевых функций.

В результате решения нескольких вариантов транспортно-логистической задачи с различными исходными данными было установлено, что с целевой функцией  $J_2$  все заказы оказываются выполненными, однако не все грузы доставлены в срок, итоговая прибыль является наибольшей. В случае решения нескольких транспортно-логистических задач с теми же исходными данными с целевыми функциями  $J_1$  и  $J_3$  результаты оказываются близкими к друг другу, и все малогабаритные грузы доставлены до пунктов выдачи в срок. При решении нескольких транспортно-логистических задач с теми же исходными данными с целевой функцией  $J_4$ , получили наибольшее количество малогабаритных грузов, доставленных не вовремя и наименьшее количество выполненных заказов, что определяет данный вариант решения задачи как наименее подходящий.

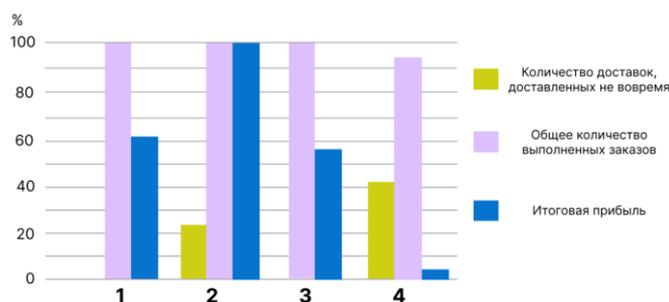


Рис. 2. Результаты решения транспортно-логистических задач с различными вариантами целевой функции

Таким образом, разработанный программный прототип специального модельно-алгоритмического обеспечения решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК подтвердил свою работоспособность. Также в статье приведен пример решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки РТК, а также проведен анализ полученных результатов по четырем различным показателям. В результате, наилучшим вариантом целевой функции для решения транспортно-логистической задачи оказалась минимизация количества РТК, а наиболее подходящим вариантом – минимизация времени или одновременная минимизация времени и максимизация прибыли доставки малогабаритных грузов.

**Заключение.** Разработано специальное-модельно-алгоритмическое обеспечение и его программный прототип для решения транспортно-логистической задачи своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. В статье реше-

на задача синтеза технологий (планов) своевременной доставки грузов с использованием группировки робототехнических комплексов. Проведенное исследование продолжает развитие основ многокритериального оперативного синтеза технологий [21, 22].

В дальнейшем следует провести следующие дополнительные исследования: разработка динамической модели программного управления логистических процессов в условиях современных городских систем при взаимодействии группировки робототехнических комплексов; согласование статической и динамической моделей [23–25]; разработка обобщенного алгоритма.

В статье рассмотрен пример решения задачи своевременной доставки малогабаритных грузов с использованием разработанного программного прототипа специального модельно-алгоритмического обеспечения для предметной области мегаполис в рамках концепции «Умный город».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Grigoreva E., Ushakov V.* Meteorological Data Monitoring, Processing and Control Based on Internet of Things Technologies // *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems* / ed. by Ilin I., Youzhong M. – Cham: Springer, 2025. – Vol. 1244. – P. 17. – DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7\_17.
2. *Nekrasov A., Sinitsyna A.* Proactive Management Transportation Logistics Infrastructure Life-Cycle (Digital Transformation) // *MATEC Web Conf.* – 2021. – 334 02019. – P. 1-6. – DOI: 10.1051/mateconf/202133402019.
3. *Ivanov D., Sokolov B., Chen W., Dolgui A., Werner F., Potryasaev S.* A control approach to scheduling flexibly configurable jobs with dynamic structural-logical constraints // *IISE Transactions.* – 2021. – Vol. 53, No. 1. – P. 21-38. – DOI: 10.1080/24725854.2020.1739787.
4. *Ватолкина Н.Ш.* Управление качеством в сфере услуг в условиях цифровой трансформации экономики. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 179 с.
5. *Липидус Л.В., Гостилевич А.О., Омарова Ш.А.* Особенности проникновения цифровых технологий в жизнь поколения Z: ценности, поведенческие паттерны и потребительские привычки интернет-поколения // *Государственное управление. Электронный вестник.* – 2020. – № 83. – С. 271-293. – DOI: 10.24411/2070-1381-2020-10119.
6. *Вишневский К.О., Гохберг Л.М., Дементьев В.В. и др.* Цифровые технологии в российской экономике / под ред. Л.М. Гохберга. – М.: НИУ ВШЭ, 2021. – 116 с. – DOI: 10.17323/978-5-7598-2199-1.
7. *Гусев Д.А., Егорова Т.В.* Проблемы планирования транспортного обеспечения поставок в условиях неопределенности // *Менеджмент сегодня.* – 2023. – Т. 1. – С. 44-54.
8. *Appio F.P., Lima M., Paroutis S.* Understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges // *Technol. Forecast. Soc. Change.* – 2019. – Vol. 142. – P. 1-14. – DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.018.
9. *Nahar P., Ghurayya A., Voronkov I.M., Kharlamov A.A.* IoT System Architecture for a Smart City // *2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT).* – Vladikavkaz, Russian Federation, 2024. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874931.
10. *Popov E., Strielkowski W., Vlasov M.* Smart cities: knowledge generation effectiveness in the digital economy // *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019).* – Paris: Atlantis Press, 2019. – DOI: 10.2991/iscde-19.2019.2.
11. *Lohmer J., Lasch R.* Production planning and scheduling in multi-factory production networks: a systematic literature review // *International Journal of Production Research.* – 2021. – Vol. 59, Issue 7. – P. 2028-2054.
12. *Maganha I., Silva C., Ferreira L.M.D.F.* The sequence of implementation of reconfigurability core characteristics in manufacturing systems // *Journal of Manufacturing Technology Management.* – 2021. – Vol. 32, No. 2. – P. 356-375.
13. *Müller T., Walth S., Jazdi N., Weyrich M.* Identification of Reconfiguration Demand and Generation of Alternative Configurations for Cyber-Physical Production Systems // *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application* / ed. by Weißgraeber P., Heieck F., Ackermann C. – Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021. – DOI: 10.1007/978-3-662-62962-8\_8.
14. *Захаров В.В., Соколов Б.В., Ушаков В.А.* Специальное модельно алгоритмическое обеспечение планирования информационных процессов при взаимодействии группировки подвижных морских объектов // *Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС-2023).* – 2023. – С. 96-103.

15. Ushakov V. Operational Planning and Scheduling of Information Processes During the Interaction of Group of an Intelligent Transport Technology Vehicle in an Airport Digital Space // *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems* / ed. by Ilin I., Youzhong M. – Cham: Springer, 2025. – Vol. 1244. – P. 16. – DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7\_16.
16. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S.P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications // *International Journal of Production Research*. – 2019. – Vol. 57, No. 2. – P. 411-432. – DOI: 10.1080/00207543.2018.1442948.
17. Sokolov B., Ushakov V., Zakharov V. Optimal planning and scheduling of information processes during interaction among mobile objects // *International Journal of Production Research*. – 2024. – Vol. 62, Issue 16. – P. 5905-5924. – DOI: 10.1080/00207543.2024.2302388.
18. Marrouche W., Harmanani H. M. Heuristic approaches for the open-shop scheduling problem // *Information Technology-New Generations: 15th International Conference on Information Technology*. – Springer International Publishing, 2018. – P. 691-699.
19. Neufeld J.S., Schulz S., Buscher U. A systematic review of multi-objective hybrid flow shop scheduling // *European Journal of Operational Research*. – 2023. – Vol. 309, Issue 1. – P. 1-23.
20. Зимин И.Н., Иванюков Ю.П. Решение задач сетевого планирования сведением их к задачам оптимального управления // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 1971. – № 3. – С. 632-641.
21. Потрысаев С.А. Синтез технологий и комплексных планов управления информационными процессами в промышленном интернете: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.01, 05.13.11. – СПб., 2020. – 312 с.
22. Охмилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов: монография. – М.: Наука, 2006. – 410 с.
23. Микони С.В., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография. – М.: РАН, 2018. – 314 с.
24. 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: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021>.
25. Мусеев Н.Н. Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.

#### REFERENCES

1. Grigoreva E., Ushakov V. Meteorological data monitoring, processing and control based on internet of things technologies, *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems*, ed. by Ilin I., Youzhong M. Cham: Springer, 2025, Vol. 1244, pp. 17. DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7\_17.
2. Nekrasov A., Sinityna A. Proactive management transportation logistics infrastructure life-cycle (Digital Transformation), *MATEC Web Conf.*, 2021, 334 02019, pp. 1-6. DOI: 10.1051/mateconf/202133402019.
3. Ivanov D., Sokolov B., Chen W., Dolgui A., Werner F., Potryasaev S. A control approach to scheduling flexibly configurable jobs with dynamic structural-logical constraints, *IIE Transactions*, 2021, Vol. 53, No. 1, pp. 21-38. DOI: 10.1080/24725854.2020.1739787.
4. Votolkina N.Sh. Upravlenie kachestvom v sfere uslug v usloviyakh tsifrovoy transformatsii ekonomiki [Quality management in the service sector in the context of digital economic transformation]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2019, 179 p.
5. Lapidus L.V., Gostilovich A.O., Omarova Sh.A. Osobennosti proniknoveniya tsifrovyykh tekhnologiy v zhizn' pokoleniya Z: tsennosti, povedencheskie patterny i potrebitel'skie privychki internet-pokoleniya [The impact of digital technologies on generation Z: values, behavioral patterns, and consumer habits of the internet generation], *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyy vestnik* [State Administration. Electronic Bulletin], 2020, No. 83, pp. 271-293. DOI: 10.24411/2070-1381-2020-10119.
6. Vishnevskiy K.O., Gokhberg L.M., Dement'ev V.V. i dr. Tsifrovyye tekhnologii v rossiyskoy ekonomike [Digital technologies in the Russian economy], ed. by L.M. Gokhberga. Moscow: NIU VShE, 2021, 116 p. DOI: 10.17323/978-5-7598-2199-1.
7. Gusev D.A., Egorova T.V. Problemy planirovaniya transportnogo obespecheniya postavok v usloviyakh neopredelennosti [Problems of transport supply planning in conditions of uncertainty], *Menedzhment segodnya* [Management Today], 2023, Vol. 1, pp. 44-54.
8. Appio F.P., Lima M., Paroutis S. Understanding Smart Cities: Innovation ecosystems, technological advancements, and societal challenges, *Technol. Forecast. Soc. Change.*, 2019, Vol. 142, pp. 1-14. DOI: 10.1016/j.techfore.2018.12.018.

9. Nahar P., Ghuraiya A., Voronkov I.M., Kharlamov A.A. IoT System architecture for a smart city, *2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. Vladikavkaz, Russian Federation, 2024, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874931.
10. Popov E., Strielkowski W., Vlasov M. Smart cities: knowledge generation effectiveness in the digital economy, *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference on Digital Economy (ISCDE 2019)*. Paris: Atlantis Press, 2019. DOI: 10.2991/iscde-19.2019.2.
11. Lohmer J., Lasch R. Production planning and scheduling in multi-factory production networks: a systematic literature review, *International Journal of Production Research*, 2021, Vol. 59, Issue 7, pp. 2028-2054.
12. Maganha I., Silva C., Ferreira L.M.D.F. The sequence of implementation of reconfigurability core characteristics in manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2021, Vol. 32, No. 2, pp. 356-375.
13. Müller T., Walth S., Jazdi N., Weyrich M. Identification of reconfiguration demand and generation of alternative configurations for cyber-physical production systems, *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application*, ed. by Weißgraeber P., Heieck F., Ackermann C. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021. DOI: 10.1007/978-3-662-62962-8\_8.
14. Zakharov V.V., Sokolov B.V., Ushakov V.A. Spetsial'noe model'noe algoritmicheskoe obespechenie planirovaniya informatsionnykh protsessov pri vzaimodeystvii gruppirovki podvizhnykh morskikh ob'ektov [Special model-algorithmic support for planning information processes in the interaction of a group of mobile maritime objects] *Sed'maya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Imitatsionnoe i kompleksnoe modelirovanie morskoy tekhniki i morskikh transportnykh sistem» (IKM MTMTS-2023)* [7th International Scientific and Practical Conference on Simulation and Complex Modeling of Marine Technology and Marine Transport Systems (IKM MTMTS-2023)], 2023, pp. 96-103.
15. Ushakov V. Operational planning and scheduling of information processes during the interaction of group of an intelligent transport technology vehicle in an airport digital space, *Digital Systems and Information Technologies in the Energy Sector: Lecture Notes in Networks and Systems*, ed. by Ilin I., Youzhong M. Cham: Springer, 2025, Vol. 1244, pp. 16. DOI: 10.1007/978-3-031-80710-7\_16.
16. Dolgui A., Ivanov D., Sethi S.P., Sokolov B. Scheduling in production, supply chain and Industry 4.0 systems by optimal control: fundamentals, state-of-the-art and applications, *International Journal of Production Research*, 2019, Vol. 57, No. 2, pp. 411-432. DOI: 10.1080/00207543.2018.1442948.
17. Sokolov B., Ushakov V., Zakharov V. Optimal planning and scheduling of information processes during interaction among mobile objects, *International Journal of Production Research*, 2024, Vol. 62, Issue 16, pp. 5905-5924. DOI: 10.1080/00207543.2024.2302388.
18. Marrouche W., Harmanani H. M. Heuristic approaches for the open-shop scheduling problem, *Information Technology-New Generations: 15th International Conference on Information Technology*. Springer International Publishing, 2018, pp. 691-699.
19. Neufeld J.S., Schulz S., Buscher U. A systematic review of multi-objective hybrid flow shop scheduling, *European Journal of Operational Research*, 2023, Vol. 309, Issue 1, pp. 1-23.
20. Zimin I.N., Ivanilov Yu.P. Reshenie zadach setevogo planirovaniya svedeniem ikh k zadacham optimal'nogo upravleniya [Solving network planning problems by reducing them to optimal control problems], *Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki* [Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics], 1971, No. 3, pp. 632-641.
21. Potryasaev S.A. Sintez tekhnologiy i kompleksnykh planov upravleniya informatsionnymi protsessami v promyshlennom internete: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Synthesis of Technologies and Comprehensive Management Plans for Information Processes in the Industrial Internet: dr. of eng. sc. diss.]: 05.13.01, 05.13.11. Saint Petersburg, 2020, 312 p.
22. Okhtilev M.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Intellektual'nye tekhnologii monitoringa i upravleniya strukturnoy dinamiko slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov: monografiya [Intelligent monitoring and management technologies for the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow: Nauka, 2006, 410 p.
23. Mikoni S.V., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Kvalimetriya modeley i polimodel'nykh kompleksov: monografiya [Qualimetry of models and multi-model complexes]. Moscow: RAN, 2018, 314 p.
24. Zakharov V.V., Baranov A.Yu., Sokolov B.V., Yusupov R.M. Modeli i algoritmy tsentralizovannogo i detsentralizovannogo planirovaniya primeneniya gruppirovki podvizhnykh ob'ektov na osnove teorii differentsial'nykh igr [Models and algorithms for centralized and decentralized scheduling of the application of grouping moving objects based on the theory of differential games], *Morskie intellektual'nye tekhnologii* [Marine Intellectual Technologies], 2023, No. 4, Part 1, pp. 171-178. DOI: <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.62.4.021>.
25. Moiseev N.N. Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza [Mathematical problems of systems analysis]. Moscow: Nauka. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981, 488 p.

**Григорьева Елизавета Дмитриевна** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: lizarapne@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 89030987631; магистрант.

**Ушаков Виталий Анатольевич** – Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; e-mail: ushakov@guar.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88124947053; к.т.н.; доцент.

**Grigoreva Elizaveta Dmitrievna** – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: lizarapne@gmail.com; St. Petersburg, Russia; phone: +79030987631; master's student.

**Ushakov Vitaly Anatolevich** – St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; e-mail: ushakov@guar.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +78124947053; associate professor, cand. of eng. sc.