

Научная статья / Research Article

УДК 656.025

DOI: 10.36718/2500-1825-2025-4-39-51

Владимир Анатольевич Глинский¹, Юлия Витальевна Верченева²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

¹ vglinskiy@yandex.ru

² yvercheneva@mail.ru

СПЕЦИФИКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИНХРОМОДАЛЬНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ ГРУЗОВ В ТРАНСПОРТНО-ТЕРМИНАЛЬНОЙ СЕТИ

Цель исследования – сравнительный анализ методов формализации экспертной информации при выборе ситуационной модели доставки грузов во взаимосвязанных терминальных мультимодальных системах. Объектом исследования является поиск оптимального маршрута в синхромодальной транспортно-терминальной сети с учетом ее реальной организации и топологии. К методам исследования относят классические (линейное программирование, динамическое программирование, метод коммивояжера), эвристические (жадные алгоритмы, генетические, имитация отжига, эвристики поиска кратчайших путей), методы формализации экспертной оценки и агентно-ориентированное моделирование. В статье рассмотрена программа MultiTransGlobal. Предложена обобщенная таблица параметров формализации экспертной информации узловых терминалов мультимодальной сети. Проанализированы методы линейного и динамического программирования, метод локального поиска, жадные и генетические алгоритмы, имитация отжига. В работе предложено определение синхромодальных перевозок ST (Sychromodal transportation). Данные перевозки представляют собой новый этап развития мультимодальных перевозок, который формулирует новые требования по модернизации функционала цифровой логистической платформы ST-сети, в частности совершенствование маршрутов, расширение функционала для оптимального выбора в реальном режиме времени и увеличение вычислительных мощностей для работы с базами данных. Показано, что в условиях многокритериальности транспортной среды ST-сети оптимальность выбора в ней маршрута связана с применением эвристических методов и элиминированием параметров сети при сохранении информативности значимых показателей.

Ключевые слова: методы поиска оптимального маршрута, классический комбинаторный метод, метод математического моделирования мультимодальных систем, мультиагентные технологии, методы линейного и динамического программирования, метод локального поиска, жадные и генетические алгоритмы, имитация отжига, синхромодальные перевозки, агентно-ориентированные технологии

Для цитирования: Глинский В.А., Верченева Ю.В. Специфика многокритериальной оптимизации синхромодальной маршрутизации грузов в транспортно-терминальной сети// Социально-экономический и гуманитарный журнал. 2025. № 4. С. 39–51. DOI: 10.36718/2500-1825-2025-4-39-51.

Vladimir Anatolyevich Glinsky¹, Yulia Vitalievna Vercheneva²

¹ Saint Petersburg University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, Saint Petersburg, Russia

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

¹ vglinskiy@yandex.ru

² yvercheneva@mail.ru

SPECIFICITY OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION OF SYNCHROMODAL CARGO ROUTING IN THE TRANSPORT AND TERMINAL NETWORK

The aim of the work is a comparative analysis of methods for formalizing expert information when choosing a situational model for cargo delivery in interconnected terminal multimodal systems. The object of the study is the search for an optimal route in a synchromodal transport and terminal network, taking into account its actual organization and topology. The research methods include classical (linear programming, dynamic programming, traveling salesman method), heuristics (greedy algorithms, genetic algorithms, simulated annealing, shortest path heuristics), methods for formalizing expert assessment, and agent-based modeling. The paper considers the MultiTransGlobal program. A generalized table of parameters for formalizing expert information of nodal terminals of a multimodal network is proposed. The methods of linear and dynamic programming, the local search method, greedy and genetic algorithms, and simulated annealing are analyzed. This paper proposes a definition of synchromodal transportation (ST). These shipments represent a new stage in the development of multimodal transportation, which sets new requirements for modernizing the functionality of the ST-network's digital logistics platform, specifically improving routes, expanding functionality for optimal real-time selection, and increasing computing power for database processing. It is shown that, given the multi-criteria nature of the ST-network's transport environment, optimal route selection is associated with the use of heuristic methods and the elimination of network parameters while maintaining the information content of significant indicators.

Keywords: optimal route search methods, classical combinatorial method, mathematical modeling method for multimodal systems, multi-agent technologies, linear and dynamic programming methods, local search method, greedy and genetic algorithms, simulated annealing, synchromodal transportation, agent-based technologies.

For citation: Glinskiy V.A., Vercheneva J.V. Specificity of multicriteria optimization of synchromodal cargo routing in the transport and terminal network // Socio-economic and humanitarian journal. 2025. № 4. P. 39–51. (In Russ.). DOI: 10.36718/2500-1825-2025-4-39-51.



Введение. Период 2022–2025 гг. оказал влияние на глобальный рынок логистических услуг, производя кардинальную переориентацию направлений и маршрутов на рынке перевозок грузов. Появились новые перспективные регионы, началась ориентация рынка на восточные направления, возникают новые альтернативные маршруты и наблюдается развитие узловых терминалов логи-

стических сетей МТК (международных транспортных коридоров). Транспортно-терминальные сети (ТТС) МТК формируют единое информационное пространство (ЕИП) синергии коалиции интеллектуальных узловых агентов взаимосвязанной ТТС, закладывая основу для новых функционалов цифровых логистических платформ (ЦЛП) и экосистем мультимодальных альянсов перевозчиков.

К примеру, расширение цифрового платформенного функционала на функции аналитики в реальном масштабе времени (Control Tower) и на функции смарт-контрактов для мониторинга цепей поставок и взаиморасчетов, несомненно, позволят автоматизировать процессы, сделать их точными и прозрачными, сформировать единую базу данных и автоматизировать передачу и согласование информации, улучшить систему безопасности. оптимизировать контроль над передвижением активов.

Цель исследования – изучение и оценка основных методов поиска оптимальных маршрутов путем формализации экспертной информации при выборе ситуационной модели доставки грузов с учетом трех взаимосвязанных элементов качества терминальной сети: сетевой организации, маршрутизации во взаимосвязанной сети и топологии сети.

Новизна исследования заключается в предложении элиминированного набора наиболее информативных параметров для количественной (балльной) системы оперативного оценивания терминально-сетевых маршрутов, что позволяет корректировать поведение интеллектуальных узловых агентов ТТС в режиме реального времени. Проведенное исследование позволило помимо этого сформулировать новое расширенное определение синхромодальных перевозок (ST – Synchromodal transportation), которые представляют собой этап развития концепции мультимодальных перевозок, требующий модернизации функционала цифровой логистической платформы ST-сети в отношении увеличения вычислительных мощностей для применения больших баз и маршрутизации грузов в реальном режиме времени.

Объекты и методы. Объектом исследования являются методы поиска оптимального маршрута в транспортно-терминальной сети. К методам исследования относят классические (линейное программирование, динамическое про-

граммирование, метод коммивояжера), эвристические методы (жадные алгоритмы, генетические, имитация отжига) формализации экспертной оценки и дополнительные методы (агентно-ориентированное моделирование, когда выполнение программы определяется взаимодействием агентов ТТС).

Результаты и их обсуждение.

Интегрируемая логистика ST сосредоточена на синхронизации и интеграции участников цепочки поставок. Взаимосвязанная логистика ST подчеркивает важность сотрудничества и взаимодействия между участниками. Интегрируемая и взаимосвязанная логистика и ST представляют собой новые подходы к логистике, с акцентом на сотрудничество и гибкость или использование сетевых принципов. При синхромодальных перевозках (ST – Synchromodal transportation) выбор транспорта осуществляется в режиме реального времени, акцентируя внимание на актуальных рыночных условиях и параметрах логистических цепей [1]. Переключение между различными видами транспорта на любом из возможных этапов логистической цепи позволяет повысить уровень и эффективность логистических операций [2] (минимизация логистических издержек за счет оптимизации сетевой доставки). Ключевым фактором успеха становится развитая терминальная сеть с интеллектуальными транспортными узлами и инструментами для оптимизации маршрутов [3]. Сетевая организация, маршрутизация и топология сети являются ключевыми элементами, на которых базируется оценка качества терминальной сети (рис. 1).

ST – перевозка реализуется в ЕИП мультимодального альянса перевозчиков на основе принципов сетецентрического управления (СЦУ) в полносвязной терминальной сети (сетевая организация и топология).



Рис. 1. Элементы качества транспортно-терминальной ST сети (TTC) [4]

Второй элемент оценки качества, определяющий внешний признак ST (свобода выбора маршрута), представляет собой динамическую маршрутизацию.

Принцип полносвязной сети основан на топологии Mesh-графа [5], где каждый узел взаимодействует с некоторым количеством других без централи-

зованной иерархии. Метод достаточно сложен в настройке, но высокоустойчив, гарантирует широкий выбор трафика внутри TTC из-за многовариантности межтерминальных связей.

Пример оценки качества TTC формата ST иллюстрирует таблица 1.

Таблица 1

Взаимосвязанные элементы сетевой организации TTC формата ST

Сетевая организация	Маршрутизация во взаимосвязанной сети	Топологии сети
Перевозка, организуемая в ЕИП мультимодального альянса перевозчиков, – с расширением мультимодального формата на основе принципов сетецентрического управления (СЦУ) в терминальной сети	Переключение работы TTC в режиме реального времени, когда параметры оптимальной перевозки определяются в оперативном режиме (динамическая маршрутизация во взаимосвязанной сети). Параметры оптимальной перевозки определяются в оперативном режиме	Ячеистая топология Mesh-сеть – альтернатива матричной структуре TTC. Гибкость и отказоустойчивость. Терминалы сети соединяются друг с другом и способны принимать на себя роль дублиров-коммутаторов

Таблица 1 позволяет сформулировать новое определение ST: ST – транспортно-логистическая модель, реализуемая в ЕИП (едином информационном пространстве) мультимодального альянса перевозчиков, с отличительной чертой расширения мультимодального формата за счет сетецентрического управления (СЦУ) во взаимосвязанной терминальной сети (сетевая организация) с топологией класса Mesh для оперативной работы в реальном времени, когда параметры

оптимальной перевозки определяются в оперативном режиме (динамическая маршрутизации сети).

Транспортно-терминальная ST-сеть представляет собой совокупность узлов (терминалов) и маршрутов, связывающих данные узлы в ЕИП.

От правильности выбора маршрутов в конкретных условиях ST зависят многие коммерческие параметры, такие как уровень издержек, скорость доставки и транспортная составляющая в цене то-

вара и пр. Большое внимание уделяется не только поиску оптимального маршрута, но и устойчивости терминальной сети [6], для чего чаще всего привлекается инструментарий классического комбинаторного метода, метода математического моделирования мультимодальных сетей и мультиагентные технологии [7].

Классический комбинаторный метод – задача коммивояжера, в условии которой поиск кратчайшего маршрута берет в расчет все заданные промежуточные пункты транспортно-терминальной сети [8]. Расчет оптимального маршрута сводится к поиску маршрута, проходящего через все заданные точки.

Математическое моделирование мультимодальных сетей – поиск маршрута с использованием метода расчета L-кратчайших маршрутов [9]. Мультиагентные технологии – технологии взаимодействия агенты-заказы, агенты-грузовики и агенты-склады, позволяющие выстраивать расписание доставки, быстрое реагирование, добавление или отмену заказа [10]. В системе изначально каждый преследует свою цель, но в процессе переговоров образуется совместное решение, позволяющее обеспечить сокращение издержек и эффективность загрузки транспортных средств, предназначенных для связи точек транспортно-терминальной сети [11].

Агентно-ориентированные методы включают в рассмотрение различные типы агентов. Это могут быть склады, транспортные средства различных мод.

Предусматривается активный информационный обмен и получение согласованных решений, что и обеспечивает распределенное управление. Данные методы создают базу для развития синхромодальных перевозок, включая возможность создания виртуального пространства для тестирования работоспособности ST-систем.

Поиск оптимального маршрута является сложной и трудоемкой задачей. Более подробно описание перечисленных методов представлено в таблице 2. В основе преимуществ и ограничений каждого метода помимо математической основы лежит учет их конкретной триединой организационно-технологической специфики торгово-транспортной операции (см. рис. 1).

Решения данных задач очень вариативны, в них рассматриваются условия ограничения ресурсов, вместимости и грузоподъемности транспортного средства, наличие начальных и конечных точек маршрута, а также условие возврата в исходную точку [12–14]. В упрощенном случае для задачи маршрутизации существует целевая функция

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

где c_{ij} – стоимость (или время) перемещения между пунктами i и j , а x_{ij} – бинарная переменная, равная 1, если движение осуществляется по дуге (i, j) [15].

В маршрутах с различным видом транспорта применим метод L-кратчайших маршрутов, который позволяет учесть несколько критериев: стоимости, протяженности маршрута, пробега, времени доставки и пр. Данные уравнения позволяют рассчитать маршруты с ограничением на количество узлов, а также привязать их к расписанию, выделив день недели и точное время. Так, $d_k(v)$ – длина кратчайшего пути до вершины v , которая содержит не более k промежуточных узлов:

$$d_k(v) = \min\{d_{k-1}(u) + w(u, v)\}, \quad (2)$$

где $w(u, v)$ – стоимость, время или расстояние дуги [16].

Таблица 2

Сравнительный анализ методов выбора оптимальных маршрутов

Метод	Математическая основа	Основные принципы	Преимущества	Ограничения	Область применения	Практическая реализация
Классические комбинаторные методы [12]	Задача коммивояжера, линейное и целочисленное программирование	Поиск кратчайшего пути через все заданные точки с учетом ограничений	Точное решение задачи. Учет множества параметров. Возможность оптимизации ресурсов	Высокая вычислительная сложность. Сложность масштабирования	Городские доставки. Маршрутизация транспорта. Логистика последней мили	Алгоритмы ветвей и границ, жадные алгоритмы, эвристики
Математическое моделирование мультимодальных сетей [9]	Теория графов, рекуррентные уравнения	Формирование маршрутов с учетом разных видов транспорта	Комплексный подход. Учет расписания перевозок. Оптимизация по нескольким критериям	Сложность моделирования. Необходимость актуальных данных	Международные перевозки. Комбинированные доставки. Межрегиональные маршруты	Системы расчета L-кратчайших маршрутов, специализированное ПО
Мультиагентные технологии [11]	Теория распределенных систем	Взаимодействие агентов-заказов, агентов-транспорта и агентов-складов	Высокая скорость принятия решений. Адаптивность к изменениям. Реальное время обработки	Сложность настройки взаимодействия. Высокие требования к инфраструктуре	Динамичные системы доставки. Срочные перевозки. Гибкие логистические схемы	Распределенные системы управления, специализированные платформы

Методы поиска оптимального маршрута для доставки грузов представляют собой совокупность из двух групп: классические методы и эвристические методы. Хотя с развитием агентно-ориентированных методов данная классификация становится весьма условной.

К первой группе относится линейное и динамическое программирование. Математический подход оптимизации, используемый для нахождения оптимального решения задач с линейной це-

левой функцией и линейных ограничений, применяется в линейном программировании [17]. Применим он для минимизации протяженности маршрута и его стоимости.

Вторая группа альтернативных методов оптимизации маршрутов, они же по-другому именуются эвристическими, используется в решениях, где классические методы становятся слишком затратными по временным ресурсам. Вместо слепого перебора всех возможностей

эвристические методы подразумевают выбор наиболее перспективных путей исследования на каждом этапе, когда алгоритм (в лице узлового интеллектуального агента) направляет свои усилия туда, где с наибольшей вероятностью может находиться оптимальное решение.

Эвристические методы позволяют найти приемлемое решение за ограниченное время. Наиболее популярные эвристические методы представлены на рисунке 2.

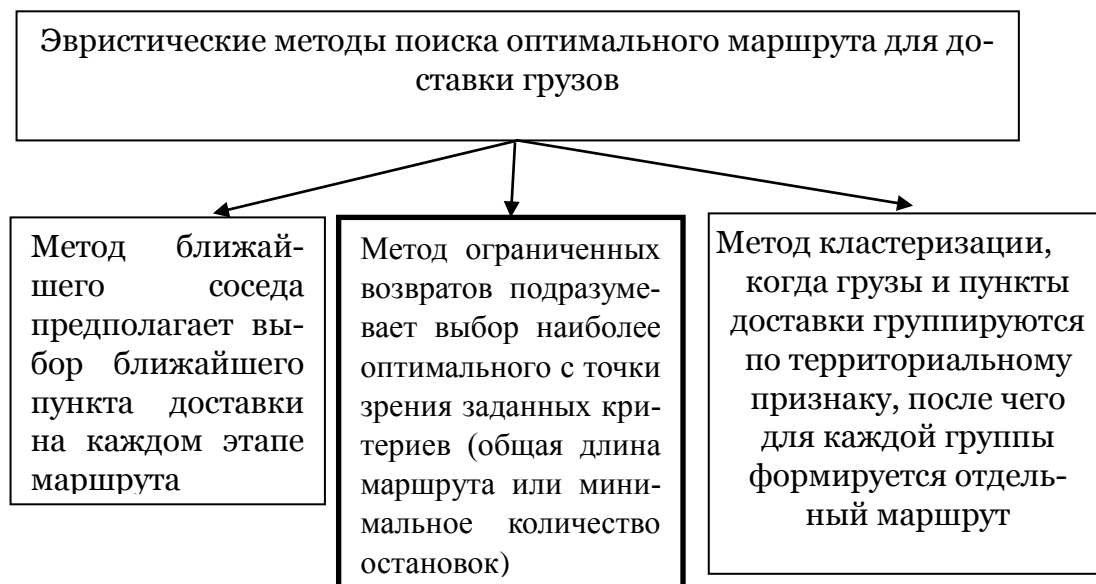


Рис. 2. Наиболее популярные эвристические методы [18]

Специфика проактивности интеллектуальных агентов терминального узла ТТС подразумевает не только реакцию на события, но и возможность генерировать новые цели. Агент может генерировать сообщения и отправлять их другим агентам. Каждый объект сети имеет своего агента, управляющего поведением программных компонентов, представляя параметры своего узла.

Рассмотрим вариант поиска оптимальных маршрутов путем формализации экспертной информации при выборе ситуационной модели доставки грузов с учетом трех взаимосвязанных групп элементов качества терминальной сети: сетевой организации, маршрутизации во взаимосвязанной сети и топологии сети. Для этого введем в рассмотрение десять параметров сети, характеризующих определяющие свойства как сетевой ор-

ганизации, так и маршрутизации во взаимосвязанной топологии ST-сети

В таблице 3 представлены критерии интеллектуального агента терминального узла, его значимые признаки (вес) в системе синхромодальной сети [19–21]. Для определения удельного веса каждого критерия составим таблицу 4, которая указывает на важность одного критерия при сравнении с другим – a_{ij} .

Шкала коэффициентов:

1 – равная значимость; 3 – среднее превосходство одного над другим; 5 – подавляющее превосходство; 7 – значительное превосходство; 9 – абсолютное превосходство; 2, 4, 6, 8 – промежуточные значения.

Отметим, что в таблице 4 коэффициенты относительной важности a_{ij} имеют свойство обратной симметричности.

Таблица 3

Признаки интеллектуального агента терминального узла сети

Номер параметра	Критерий	Признаки интеллектуального агента терминального узла сети	Вес в системе критериев
1	K_1	Стоимость услуги	$\gamma_1=0,29$
2	K_2	Время перемещения груза	$\gamma_2=0,13$
3	K_3	Возможность консолидации	$\gamma_3=0,07$
4	K_4	Интероперабельность	$\gamma_4=0,21$
5	K_5	Проактивность интеллектуального агента терминального узла сети	$\gamma_5=0,12$
6	K_6	Автономность узлового агента	$\gamma_6=0,05$
7	K_7	Адаптивность гибкости переключения между различными видами транспорта	$\gamma_7=,04$
8	K_8	Клиенто-ориентированность	$\gamma_8=0,03$
9	K_9	Мотивированность	$\gamma_9=0,03$
10	K_{10}	Принципы субсидиарности	$\gamma_{10}=0,03$

Таблица 4

Коэффициенты относительной важности a_{ij}

	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	K10
K1	1	5	3	3	3	5	7	7	5	7
K2	1/5	1	2	1/3	1/3	7	7	5	3	2
K3	1/3	1/2	1	1/5	1/3	1/4	3	1/4	3	2
K4	1/3	3	5	1	3	9	8	3	5	9
K5	1/3	3	3	1/3	1	5	7	3	5	4
K6	1/5	1/7	4	1/9	1/5	1	2	3	1/3	1/4
K7	1/7	1/7	1/3	1/8	1/7	1/2	1	1/3	1/2	1/6
K8	1/7	1/5	4	1/3	1/3	1/3	3	1	3	4
K9	1/5	1/3	1/3	1/5	1/5	3	2	1/3	1	3
K10	1/7	1/2	1/2	1/9	1/4	4	6	1/4	1/3	1

Выполним расчет искомых весов критериев на основе проведенного сравнения. Первоначально определим среднюю геометрическую из чисел, записанных в строках

$$\gamma_i = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i}, i = 1, n. \quad (4)$$

$$b_i = \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot \dots \cdot a_{in}}, i = 1, n, \quad (3)$$

где n – количество критериев.

Вторым шагом вычисляем удельные веса по формуле

Расчет рейтингов потенциальных узловых терминалов осуществляем по формуле

$$R_k = \sum_i \gamma_i \cdot z_{ik}, k=1, K, \quad (5)$$

где R_k – рейтинг k -го терминала;

z_{ik} – значение i -го критериального показателя для k -го терминала.

Значения нормированных натуральных критериальных показателей z_{ik}

для четырех терминальных узлов Санкт-Петербурга представлены в таблице 5.

Таблица 5

Нормированные величины критериальных показателей z_{ik}

Компания	Стоимость услуги	Время	Возможность консолидации	Интероперабельность	Проактивность интеллектуального агента	Автономность узлового агента	Адаптивность	Клиент-ориентированность	Мотивированность	Принципы субсидиарности
«РИК-Контейнеры»	1,0	1,0	0,841	1,0	1,0	1,0	1,0	0,3	0,826	0,9
«Юконт»	0,883	0,997	0,775	0,250	0,168	0,497	0,732	1,0	0,826	1,0
«Контейнер Лизинг»	0,885	0,958	0,669	0,271	0,179	0,570	0,371	0,2	0,524	0,9
«Марконт»	0,813	0,858	1,0	0,426	0,291	0,299	0,307	0,3	1,0	1,0

В итоге получаем, что первый критерий, который указывает на стоимость услуг, имеет максимальный вес $\gamma_1 (= 0,29)$. Отметим, что данный показатель один из важных, так как цена товара – это ключевой критерий в условиях жесткой индивидуальной и коалиционной конкуренции узлового агента в борьбе за потребителя. Достаточно отстали от этого критерия интероперабельность $\gamma_4 = 0,21$ (способность информационных систем к обмену информацией и к использованию информации, полученной в результате обмена), и проактивность – $\gamma_5 = 0,12$ (способность действовать в упреждающей манере, генерировать новые цели и рационально их достигать). Время перемещения груза $\gamma_2 = 0,13$ и возможность консолидации $\gamma_3 = 0,07$ уступают критерию стоимости услуг, однако также являются немаловажными критериями, так как, ориентируясь на них, покупатель делает свой выбор в

пользу определенного терминала. Информативность первых пяти взаимосвязанных параметров составляет более 80 %. Прочие критерии незначительны, так как влияют на терминал косвенно. Тем не менее их стоит учитывать для получения более полной картины и правильного выбора терминала при влиянии критериев. Рейтинги всех компаний представлены в таблице 6. Конечные результаты указывают, что наивысший рейтинг получило предприятие ООО «РИК-Контейнеры» – 0,944.

Это значит, что предприятие «РИК-Контейнеры» является наилучшим и именно через него будет реализован первый шаг маршрута фирмой-отправителем из Санкт-Петербурга.

Второе место среди претендентов заняла «Юконт». Лидерство данной компании по таким показателям, как адаптивность (и гибкость переключения между различными видами транспорта), рациональное распределение полномо-

чий (субсидиарность), упрочняет позиции «Юконт», но настораживает очень низкая способность взаимодействия внутри сети (интероперабельность).

Таким образом, рассматриваемая логистическая система ТТС предполагает текущую оценку рейтингов узловых агентов с выделением рекомендуемых зон их взаимодействия, внутри которых максимальный рейтинг узла определяет «оптимальный шаг» перемещения груза в данном направлении. Зональная структура ТТС устанавливается экспертным

органом ST-сети типа Control Tower, способным к принятию аналитических решений в реальном масштабе времени (не ниже уровня СТ 2,0) [22]. Описанная эвристическая процедура представляется продуктивной при реализации метода территориально-функционального зонирования (метод кластеризации, – рис.2) ST-сети, когда грузы и пункты доставки группируются по признаку специализации, после чего для каждой группы формируется отдельный маршрут.

Таблица 6

Рейтинги компаний (в порядке убывания)

Компания	Рейтинг R_i
«РИК-Контейнеры»	0,944
«Юконт»	0,612
«Марконт»	0,600
«Контейнер Лизинг»	0,543

Заключение

1. Учет многокритериальных параметров трех взаимосвязанных элементов ТТС ST (сетевая организация, динамическая маршрутизация, топология сети класса Mesh) позволил сформулировать в статье новое расширенное определение синхромодальных перевозок. ST – это перевозка, организуемая в едином информационном пространстве мультимодального альянса перевозчиков, когда расширение мультимодального формата осуществляется на базе сетецентрического управления (СЦУ) в терминальной сети (сетевая организация), что обеспечивает переход к работе в режиме реального времени, при котором параметры оптимальной перевозки рассчитываются в оперативном режиме (динамическая маршрутизация во взаимосвязанной сети) – с топологией сети класса Mesh.

2. Отмечено, что при обозначенном 3-элементном подходе принципы

сетецентрического управления ST-сети представляют собой базовые части модели ST. Модель ST-сети, безусловно, нуждается в инновационном решении нескольких вопросов, к примеру, в конкретизации цифровых форматов документооборота и взаиморасчетов. Пополнение функционала ЦЛП смарт-контрактом упростит процесс обработки больших объемов многокритериальной информации при оптимизации ST-маршрутов, автоматизирует платежи участников терминальной коалиции, усилит синергетические эффекты транспортно-терминальной сети (ТТС) [21]. Пополнение функционала ЦЛП сети ST видится также в формировании в ТТС функций и алгоритмов транспортной биржи (коалиции) интеллектуальных узловых агентов – цифрового регламента торгов, клиринга и т. п.

3. Специфика ST определяет процедуру выбора оптимального маршрута ТТС, который представляет собой слож-

ную задачу, в большинстве случаев подразумевающую совместное использование нескольких различных методов, включая эвристические. В работе составлена обобщенная таблица сравнительного анализа известных методов выбора оптимальных маршрутов.

4. В статье представлен эвристический способ многокритериального выбора оптимального маршрута, основанный на упрощенных правилах рейтинговых оценок узлов терминальной сети. Предложенный алгоритм относится к варианту реализации «эвристик для поиска кратчайших путей» применительно для ST-сети. Рассмотрен пример выбора оптимального узла ТТС.

5. Элиминирование параметров ST-сети с сохранением достаточной информативности итогового набора показателей (не прибегая при этом к полному детальному анализу всех возможных вариантов) выявляет преимущество эвристических методов. Предложенный алгоритм не исключает введения в его состав дополнительной экспертной программной структуры типа Control Tower, предусматривающей создание корпоративного централизованного центра ТТС для принятия корректирующих аналитических решений в реальном масштабе времени и формирования прогнозов (предиктивная аналитика).

Список источников

1. Куренков П.В., Преображенский Д.А. Экономика и логистика синхромодальных перевозок // Транспорт в интеграционных процессах мировой экономики: мат-лы Междунар. науч.-практ. онлайн-конф. / под ред. В.Г. Гизатуллиной. Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2020. С. 172–174.
2. Дыбская В.В. Логистика. Интегрированная цепь поставок. М.: Альпина Паблишер, 2020. 722 с.
3. Булатова Н.Н., Перминов Н.Н., Якимов А.И. Исследование синхромодальности в транспортной логистике региона // Экономика и бизнес: теория и практика. 2025. № 5 (123). С. 61–66.
4. Куренков П.В., Глинский В.А., Баранова А.В. Структуризация топологии мультимодальных терминально-сетевых способов доставки // Логистика – Евразийский мост: мат-лы XIX Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2024. С. 126–131. EDN: ZEAFQQ.
5. Лупан М.В., Нужнов Е.В. Использование интеллектуальных агентов на автоматизированном грузовом терминале // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2012. № 7. С. 174–180.
6. Габдулхаков А.А., Завалицин Д.С. Динамическая оптимизация сложных маршрутов в транспортной логистике // Современные наукоемкие технологии. 2021. №5. С. 33–38.
7. Завалицин Д.С., Тимофеева Г.А. Транспортная сеть с неопределенными параметрами: оптимизация маршрута // Транспорт Урала. 2023. № 3. С. 3–6.
8. Анализ трудоемкости различных алгоритмических подходов для решения задачи коммивояжера / С.С. Семенов [и др.] // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 116–131.
9. Палагин Ю.И., Мочалов А.И., Тимонин А.В. Математическое моделирование и расчет характеристик трехмодальных транспортно-терминальных сетей // Прикладная информатика. 2013. № 2 (44). С. 32–41.
10. Галкин С.В., Куликов А.В. Применение мультиагентных технологий в логистических системах // Логистические системы. 2019. № 2. С. 45–52.
11. Федотов А.В., Иванов С.А. Применение агентного моделирования в мультимодальной транспортной логистике // Логистические системы. 2022. № 3. С. 78–85.

12. Костюк Ю.Л. Эффективная реализация алгоритма решения задачи коммивояжера методом ветвей и границ // ПДМ. 2013. № 2 (20). С. 78–90.
13. Алгоритм Дейкстры // HexLet. URL: https://ru.hexlet.io/courses/graphs/lessons/shortest_paths/theory_unit (дата обращения: 20.09.2025).
14. Алгоритм Дейкстры // Алгоритмика/CS. URL: <https://ru.algorithmica.org/cs/shortest-paths/dijkstra> (дата обращения: 20.09.2025).
15. Палагин Ю.И. Логистика – планирование и управление материальными потоками: учеб. пособ. СПб., 2009. 284 с.
16. Палагин Ю.И. Транспортная логистика и мультимодальные перевозки. Технология. Оптимизация. Управление: учеб. пособ. СПб.: Политехника, 2017. 266 с.
17. Тюрин А.Ю. Эвристические методы решения задач доставки мелкопартионных грузов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2007. № 1. С. 51–55.
18. Глинский В.А. Ключевые элементы терминально-сетевой концепции синхромодальных перевозок // Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта. 2025. № 1. С. 52–67. EDN: VHAWON.
19. Информационно-логистическая модель выбора маршрута доставки контейнеров / С.П. Вакуленко [и др.] // Вестник транспорта Поволжья. 2022. № 6 (96). С. 73–78.
20. Концепция интеграции усиленной логистики и физического интернета / Д. Чишич [и др.] // Социально-экономический и гуманитарный журнал Красноярского ГАУ. 2020. № 2 С. 38–40.
21. Supply Chain Control towers or One Network's Cloudplatform // One Network Enterprises. 2017. URL: <https://www.onenetwork.com> (дата обращения: 12.04.2025).
22. Глинский В.А., Баранова А.В. Логистические платформенные и экосистемные решения в мультимодальных цепях поставок // Вестник СПбГУТА. 2025. №2 (47). С. 91–101.

References

1. Kurenkov P.V., Preobrazhenskii D.A. Ehkonomika i logistika sinkhromodal'nykh perevozok // Transport v integratsionnykh protsessakh mirovoi ehkonomiki: mat-ly Mezhdunar. nauch.-prakt. onlain-konf. / pod red. V.G. Gizatullinoi. Gomel': Belarus. gos. un-t transporta, 2020. S. 172–174.
2. Dybskaya V.V. Logistika. Integrirovannaya tsep' postavok. M.: Al'pina Pablisher, 2020. 722 s.
3. Bulatova N.N., Perminov N.N., Yakimov A.I. Issledovanie sinkhromodal'nosti v transportnoi logistike regiona // Ehkonomika i biznes: teoriya i praktika. 2025. № 5 (123). S. 61–66.
4. Kurenkov P.V., Glinskii V.A., Baranova A.V. Strukturizatsiya topologii mul'timodal'nykh terminal'no-setevykh sposobov dostavki// Logistika – Evraziiskii most: mat-ly XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Krasnoyarsk, 2024. S. 126–131. EDN: ZEAFQQ.
5. Lupan M.V., Nuzhnov E.V. Ispol'zovanie intellektual'nykh agentov na avtomatizirovannom gruzovom terminale // Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2012. № 7. S. 174–180.
6. Gabdulkhakov A.A., Zavalishchin D.S. Dinamicheskaya optimizatsiya slozhnykh marshrutov v transportnoi logistike // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2021. №5. S. 33–38.
7. Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. Transportnaya set' s neopredelennymi parametrami: optimizatsiya marshruta // Transport Urala. 2023. № 3. S. 3–6.

8. Analiz trudoemkosti razlichnykh algoritmicheskikh podkhodov dlya resheniya zadachi kommivoyazhera / S.S. Semenov [i dr.] // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. 2017. № 1. S. 116–131.
9. Palagin YU.I., Mochalov A.I., Timonin A.V. Matematicheskoe modelirovanie i raschet kharakteristik trekhmodal'nykh transportno-terminal'nykh setei // Prikladnaya informatika. 2013. № 2 (44). S. 32–41.
10. Galkin S.V., Kulikov A.V. Primenenie mul'tiagentnykh tekhnologii v logisticheskikh sistemakh // Logisticheskie sistemy. 2019. № 2. S. 45–52.
11. Fedotov A.V., Ivanov S.A. Primenenie agentnogo modelirovaniya v mul'timodal'noi transportnoi logistike // Logisticheskie sistemy. 2022. № 3. S. 78–85.
12. Kostyuk YU.L. Ehffektivnaya realizatsiya algoritma resheniya zadachi kommivoyazhera metodom vetvei i granits // PDM. 2013. № 2 (20). S. 78–90.
13. Algoritm Deikstry // HexLet. URL: https://ru.hexlet.io/courses/graphs/lessons/shortest_paths/theory_unit (data obrashcheniya: 20.09.2025).
14. Algoritm Deikstry // Algoritmika/CS. URL: <https://ru.algorithmica.org/cs/shortest-paths/dijkstra> (data obrashcheniya: 20.09.2025).
15. Palagin YU.I. Logistika – planirovanie i upravlenie material'nymi potokami: ucheb. posob. SPb., 2009. 284 s.
16. Palagin YU.I. Transportnaya logistika i mul'timodal'nye perevozki. Tekhnologiya. Optimizatsiya. Upravlenie: ucheb. posob. SPb.: Poli tekhnika, 2017. 266 s.
17. Tyurin A.YU. Ehvrsticheskie metody resheniya zadach dostavki melkopartionnykh грузов // Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2007. № 1. S. 51–55.
18. Glinskii V.A. Klyuchevye ehlementy terminal'no-setevoi kontseptsii sinkhromodal'nykh perevozok // Vestnik Donetskoi akademii avtomobil'nogo transporta. 2025. № 1. S. 52–67. EDN: VHAWON.
19. Informatsionno-logisticheskaya model' vybora marshruta dostavki konteinerov / S.P. Vakulenko [i dr.] // Vestnik transporta Povolzh'ya. 2022. № 6 (96). S. 73–78.
20. Kontseptsiya integratsii usilennoi logistiki i fizicheskogo interneta / D. Chishich [i dr.] // Sotsial'no-ehkonomicheskii i humanitarnyi zhurnal Krasnoyarskogo GAU. 2020. № 2 S. 38–40.
21. Supply Chain Control towers or One Network's Cloudplatform // One Network Enterprises. 2017. URL: <https://www.onenetwork.com> (data obrashcheniya: 12.04.2025).
22. Glinskii V.A., Baranova A.V. Logisticheskie platformennye i ehkosistemnye resheniya v mul'timodal'nykh tsepyakh postavok // Vestnik SPBGUGA. 2025. № 2 (47). S. 91–101.

Статья принята к публикации 06.08.2025/
The article has been accepted for publication 06.08.2025.

Информация об авторе:

Владимир Анатольевич Глинский, доцент кафедры «Интермодальные перевозки и логистика», кандидат технических наук, доцент

Юлия Витальевна Верченева, студентка 2-го курса магистратуры

Information about the authors:

Vladimir Anatolyevich Glinsky, Associate Professor at the Department of Intermodal Transportation and Logistics, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Yulia Vitalievna Vercheneva, second-year Master's student

