



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 656.02+06
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-7>

Анализ конкурентоспособности малых портов Азово-Черноморского бассейна в мультимодальных перевозках: технологические аспекты, оптимизационная задача транспортного типа



Максим КОЛЕСНИКОВ



Виктор БОГАЧЕВ



Вячеслав ЗАДРОЖНИЙ



Максим БАКАЛОВ

*Максим Владимирович Колесников*¹, *Виктор Алексеевич Богачев*²,
*Вячеслав Михайлович Задорожний*³, *Максим Владимирович Бакалов*⁴

^{1, 3, 3, 4} Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия.

✉ ¹ kmv-d@list.ru.

✉ ² bogachev-va@yandex.ru.

✉ ³ zadorozniy91@mail.ru.

✉ ⁴ Maxim_bmw@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Предложен оригинальный подход к исследованию функционирования связующего и преобразующего звена мультимодальной транспортно-логистической системы, реализуемого железнодорожными грузоперевозками. Методологическую основу исследований составляют классические принципы эгалитаризма в теории благосостояния, позволяющие на основе оценки транспортно-технологической инфраструктуры полигона и тарифных ставок строить математические модели, являющиеся экономически обоснованными, клиентоориентированными и востребованными в управлении процессами грузоперевозок.

В среде системы аналитических вычислений разработан алгоритм решения многокритериальной и многоэкстремальной задачи целочисленного линейного программирования

с набором стоимостных целевых функций. Вычислительный эксперимент используется в качестве направляющего эвристического инструмента при нахождении оптимального уровня организации и экономической эффективности процесса грузоперевозок. С помощью критерия Парето найдены оптимальные сочетания распределений числа отправительских маршрутов по станциям погрузки и относящихся к ним планов перевозок в адрес станций перегрузки. Найденные значения стоимостных показателей предоставляют участникам перевозочного процесса возможность выбора конкурентоспособных вариантов в схемах перевозок, использующих малые припортовые станции перегрузки Азово-Черноморского бассейна.

Ключевые слова: мультимодальные грузовые перевозки, стоимостные показатели, оптимизация, критерий Парето, «ступени» в «оптимизационной лестнице», «области влияния» станций погрузки, припортовые станции перегрузки.

Для цитирования: Колесников М. В., Богачев В. А., Задорожний В. М., Бакалов М. В. Анализ конкурентоспособности малых портов Азово-Черноморского бассейна в мультимодальных перевозках: технологические аспекты, оптимизационная задача транспортного типа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 3 (106). С. 74–84. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-3-7>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении функционирования железнодорожного транспорта, представляющего собой связующее и преобразующее звено в логистической цепи мультимодальных грузоперевозок, актуальным и целесообразным являются развитие существующих и разработка новых подходов к оптимизации транспортно-логистических процессов с целью повышения их эффективности и экономии ресурсов.

В общем, оптимизация в транспортных задачах – это процесс поиска наилучшего решения для перевозки грузов или пассажиров на транспорте [1].

Один из методов решения оптимизационных задач, относящихся к железнодорожному транспорту, – оптимизация маршрутов и графиков движения поездов [2–5]. Это может включать изменение расписания движения поездов для увеличения количества грузовых и пассажирских поездов в пиковые часы, а также более равномерное распределение нагрузки. Указанные меры позволяют сократить время простоя поездов на станциях, снизить затраты на их эксплуатацию.

Ещё один метод решения указанных задач – оптимизация весовых характеристик поездов [6].

Интеграция информационных технологий и цифровых систем позволяет повысить эффективность функционирования железнодорожного транспорта, снизить затраты на его эксплуатацию и обслуживание, а также улучшить качество обслуживания грузовых клиентов [7]. Кроме того, должны учитываться экологические аспекты грузоперевозок [8].

На основе обзора работ, посвящённых анализу рынка зерновых перевозок, отметим, что значительное внимание уделяется анализу инфраструктуры и логистики, включая проблемы доступности, эффективности и конкурентоспособности транспортной инфраструктуры [9].

Также в литературе можно найти исследования, посвящённые отдельным аспектам рынка зерновых перевозок. Например, некоторые исследования анализируют влияние изменений климата на зерновые перевозки [10], включая изменение транспортных маршрутов и увеличение затрат на транспортировку зерна. Другие исследования фокусируются на анализе изменений тарифов на перевозку зерна, включая влияние изменения спроса и предложения на цены [11].

В целом, прогнозирование тарифов при эксплуатации грузовых вагонов является важным инструментом, используемым железнодорожными компаниями и их клиентами, при управлении транспортными расходами и эффективном планировании своей деятельности [12; 13].

В ряде исследований анализируются технологические аспекты зерновых перевозок, включающие в себя разработку новых технологий и инновационных решений для улучшения эффективности перевозок и снижения затрат [14; 15].

Цель исследования – разработка новых подходов в оптимизации транспортно-логистических процессов для повышения их эффективности и экономии ресурсов.

Методологическую основу исследований составляют классические принципы эгалитаризма в теории благосостояния, позволяющие на основе оценки транспортно-технологической инфраструктуры полигона и тарифных ставок строить математические модели, являющиеся экономически обоснованными, клиентоориентированными и востребованными в управлении процессами грузоперевозок.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Анализ рынка зерновых перевозок

Рынок зерновых грузоперевозок играет весьма значимую роль в мировой экономике. Последние годы экспорт зерна из Российской Федерации характеризуется существенным ростом (хотя и подверженным колебаниям). При этом почти 90 % зерна проходит через морские порты и почти 81 % – через порты Азово-Черноморского бассейна (АЧБ). Отметим, что в июле–декабре 2019 г. существенно сократились отгрузки в портах Балтики, а также в таких портах АЧБ, как Кавказ и Тамань. При этом был отмечен рост отгрузки в порту Туапсе (+37 %), в малых портах АЧБ (+24 %), а также в портах Каспия (+27 %). Данные в отношении основных направлений экспорта российского зерна представлены на рис. 1.

В транспортной системе, обеспечивающей мультимодальные перевозки зерна на юге России, выделим следующие узловые составляющие: глубоководные порты: Новороссийск, Тамань и Туапсе (позволяющие принимать суда типоразмера Handysize, Suezmax, Rapamax); малые порты Азовского моря; речные порты Волги и Дона.



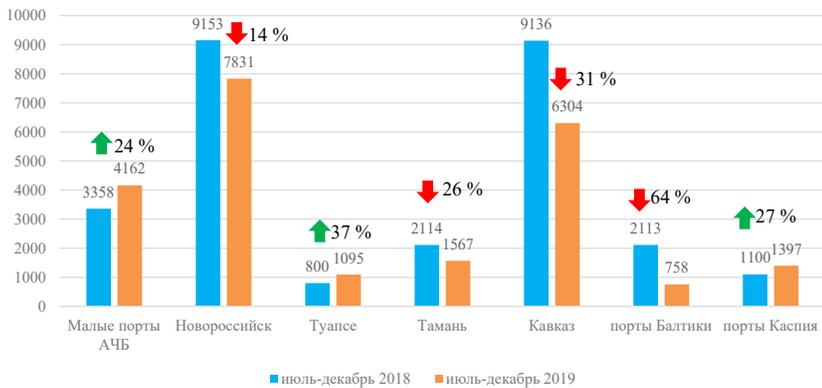


Рис. 1. Основные направления экспорта зерновых грузов. Источник: данные Русагротранс [rusagrotrans.ru/upload/Русагротранс ГЗА 2020.pdf. Доступ 15.01.2023].

2. Постановка задачи и математическая модель преобразующего звена логистической системы

В общую методологическую основу исследований положены эгалитарные принципы теории благосостояния [16]. К решению транспортно-логистических задач мы подходим с позиции одного из основных правил эгалитаризма – принципа единогласия в отношении всех рассматриваемых участников перевозочного процесса (следуя терминологии [16], именуем их агентами). Для мульти-модальных систем грузоперевозок координация действий кооперированных агентов, а также уровень взаимного делового доверия имеют особое значение. Поэтому в каждом звене логистической системы реализация интересов любого агента не должна происходить путём прямого или косвенного ущемления интересов других агентов.

Разработанная методика оптимизационного моделирования процесса грузоперевозок на транспортном полигоне не имеет непосредственного отношения к теории игр (как известно, эта теория математических моделей посвящена нахождению оптимальных решений в условиях конфликтов [17]). Мы не рассматриваем стратегий игроков, а их взаимоотношения не представляются антагонистическими, поскольку инструментом оптимизации распределений грузопотоков, так или иначе, является критерий Парето.

Перейдём к постановке задачи, в которой рассматривается ключевое преобразующее звено мультимодальной логистической системы, представленное железнодорожными грузоперевозками. Имеются m станций погрузки и n припортовых станций перегрузки. На каждой станции погрузки формируются

отправительские маршруты с некоторым грузом. При этом цена груза на станциях разная. Станции перегрузки таковы, что n_1 из них относятся к глубоководным портам, а n_2 – к малым портам ($n_1 + n_2 = n$). В отношении станций погрузки понадобится выполнить математические и организационные построения.

Пусть B – заданное целое положительное число. Введём множество D , элементы которого представляют собой всевозможные упорядоченные наборы $(a_i)_{i=1}^m$, где a_i – целые неотрицательные числа, удовлетворяющие условию:

$$\sum_{i=1}^m a_i = B. \quad (1)$$

Множество D является подмножеством гиперплоскости, задаваемой в пространстве R^m равенством (1), точки которого имеют неотрицательные целочисленные координаты. С точки зрения комбинаторики каждый элемент множества D можно представить, как размещение B неразличимых между собой предметов по m ячейкам. В силу известной формулы [18] получаем, что число элементов D равно:

$$C_{B+m-1}^{m-1} = \frac{(B+m-1)!}{B!(m-1)!}. \quad (2)$$

Из правой части равенства (2) видно, как быстро растут значения C_{B+m-1}^{m-1} с увеличением значений каждого из параметров m и B .

Вернёмся к представленному железнодорожными грузоперевозками звену логистической цепи, предполагая, что следующее (также преобразующее звено) реализуется морским транспортом. В данной ситуации введённые выше упорядоченные наборы

$(a_i)_{i=1}^m \in D$ представляют собой всевозможные варианты распределения по m станциям погрузки числа a_i отправительских маршрутов. Эти маршруты направляются в адрес каких-либо (или какой-либо) из станций перегрузки и в общей сложности обеспечивают формирование полной судовой партии, имеющей заданный объём B .

Далее будем рассматривать множество D , в первую очередь, в связи с совокупностью n_2 станций перегрузки, относящихся к малым портам. Введём два стоимостных показателя, которые характеризуют процесс грузоперевозок непосредственным образом или косвенно и позволяют оценить соответствующую экономическую целесообразность.

Пусть p_i – стоимость груза, которым формируется один маршрут, отправляемый с i -й станции погрузки $i = 1, 2, \dots, m$. Для каждого распределения $(a_i)_{i=1}^m \in D$ числа маршрутов по m станциям погрузки положим:

$$P = \sum_{i=1}^m p_i a_i. \quad (3)$$

Значения целевой функции P представляют собой стоимость всего груза, который при распределении $(a_i)_{i=1}^m$ отправительских маршрутов по станциям погрузки будет перевезён в адрес какой-либо станции (или каких-либо станций) перегрузки. Введение показателя P обусловлено тем, что цена груза, находящегося на разных станциях погрузки, разная. Целевой функцией (3) представлен «внешний» (по отношению к бизнес-процессу грузоперевозок) коммерческий показатель, посредством которого логистическое содержание задачи транспортного типа развивается, в первую очередь, в отношении клиента.

Введём теперь набор показателей, предназначенных для того, чтобы, руководствуясь какими-либо соображениями, выделять те или иные из рассматриваемых станций перегрузки. Эти показатели являются аналогами целевой функции в классической транспортной задаче и имеют вид:

$$C_j = \sum_{i=1}^m c_{ij} a_i. \quad (4)$$

Здесь c_{ij} – стоимость перевозки одного отправительского маршрута на участке между i -й станцией погрузки ($i = 1, 2, \dots, m$) и j -й станцией перегрузки в мультимодальной транспортно-логистической цепи ($j = 1, 2, \dots, n$).

Задачей настоящих исследований является построение (в рамках указанных показателей) оптимизационной модели преобразующего звена логистической системы, а также разработка алгоритма решения соответствующей многоцелевой и многоэкстремальной задачи. Модель имеет комплексный характер и представлена взаимосвязанными «внешней» и «внутренней» частями. «Внешней» части модели соответствует оптимизационная задача нахождения распределений $(a_i)_{i=1}^m$ отправительских маршрутов по станциям погрузки, при которых достигается минимума целевая функция (3). «Внутренней» части модели соответствует оптимизационная задача (проистекающая из предыдущей), в которой для каждого распределения $(a_i)_{i=1}^m$ (варируемого во «внешней» части модели) найдутся планы перевозок, обеспечивающие минимальное значение суммарной стоимости перевозок (с целевыми функциями (4)) в адрес n_2 станций перегрузки (напомним, что рассматриваемые в совокупности n_2 станции перегрузки образуют мультимодальный транспортный узел с малыми портами). В основе многоцелевой оптимизации лежит критерий Парето, посредством различных форм которого учитываются интересы рассматриваемых агентов.

В соответствии со сказанным введём в рассмотрение планы перевозок (x_{ij}) , где x_{ij} – числа маршрутов, отправляемых с i -й станций погрузки в адрес j -й станции перегрузки, которые должны удовлетворять равенствам:

$$\sum_{j=1}^{n_2} x_{ij} = a_i \quad (i = 1, 2, \dots, m). \quad (5)$$

Напомним, что числа a_i удовлетворяют условию (1).

3. Актуальность проекта приложения разработанной методики и его характеристики

В качестве объекта приложения разработанной методики рассматривается транспортно-технологическая система (ТТС) полигона Северо-Кавказской железной дороги (СКЖД), примыкающая к глубоководным портам на побережье Чёрного моря и малым портам в Таганрогском заливе. Вследствие интенсивной эксплуатации железнодорожных и автомобильных подходов





Таблица 1

Стоимостные характеристики грузопотока зерновых [выполнено авторами]

№	Станции погрузки	Цена зерна на станциях погрузки, млн руб./марш	Стоимость перевозки, млн руб./марш					
			Тмн 1	Нврс 2	Тп 3	Ек 4	Тг 5	Аз 6
1	Тм 1	46,20	1,39	1,28	1,39	1,28	1,60	1,44
2	Ап 2	43,84	2,45	2,37	2,04	2,66	2,45	2,37
3	Зр 3	45,12	2,05	1,98	2,12	1,44	1,23	1,05
4	Сл 4	49,60	2,05	1,89	1,97	1,74	1,55	1,39
5	Тц 5	43,84	2,57	2,45	2,56	1,89	1,74	1,60
6	Рм 6	45,12	2,45	2,37	2,36	2,12	1,89	1,82

к глубоководным портам представляется весьма актуальной разработка альтернативных вариантов для преобразующих звеньев логистических цепей, которые в рассматриваемых условиях могут оказаться конкурентоспособными.

Для численной реализации построенной в статье оптимизационной модели будем исходить из следующих предположений:

- станциями погрузки зерновых являются Тимашевская (1), Аполлонская (2), Зерноград (3), Сальск (4), Тацинская (5) и Ремонтная (6); припортовыми станциями – Тамань (1), Новороссийск (2), Туапсе (3), Ейск (4), Таганрог (5) и Азов (6);
- маршрутный поезд сформирован в среднем из 50 вагонов грузоподъемностью 64 т;
- в глубоководные порты круглогодично могут заходить грузовые суда (типа Panamax) дедевейтом до 80 000 тонн.

Таким образом, для полной загрузки одной судовой партии требуется ровно $B = 25$ маршрутов.

Отметим, что политика допустимого дедевейта может изменяться со временем и в зависимости от многих факторов (глубина портов и их состояние, типы судов, правительственные нормы и указания регуляторных органов). Учитывая местоположение порта Азов, соответствующую железнодорожную инфраструктуру, а также вопросы рациональности технологий подвода поездов, предполагаем, что в рассматриваемой ситуации в указанный адрес может следовать (со всех указанных станций погрузки в совокупности) не более четырех маршрутов. Это ограничение соответствует тому, что в порт Азов могут заходить морские суда дедевейтом до семи тыс. тонн (таким образом, одно судно практически заполняется двумя отправительскими маршрутами).

Численные данные, позволяющие выполнить соответствующие расчёты оптимизационной модели грузоперевозок, приведены в табл. 1.

4. Предварительные результаты

Для программной реализации разработанного в статье оптимизационного алгоритма в логистическом моделировании процесса грузоперевозок и выполнения вычислительных процедур мы обращаемся к среде *Maxima (Free Ware)*. В данном подразделе приведём результаты соответствующих математических экспериментов, которые носят пробный характер. Исходя из соображений сбалансированности распределений числа маршрутов по станциям погрузки, а также принимая во внимание объём судовой партии (см. подраздел 3), здесь и далее предполагаем, что на каждой станции погрузки может быть сформировано не более чем десять маршрутов с зерном.

Как уже сказано, объектом приложения разработанной методики является ТТС полигона СКЖД, который включает припортовые станции Ейск, Таганрог и Азов (рассматриваемые в данном исследовании в совокупности). Введём суммарный стоимостный показатель:

$$S = P + C, \quad (6)$$

где $C = C_4 + C_5 + C_6$ (см. (4)).

Начнём с минимизации значений показателя S , наблюдая также изменения, которые происходят с другими показателями: P , C_4 , C_5 , C_6 и C . В табл. 2 приведены восемь распределений числа маршрутов по станциям погрузки, соответствующие им планы перевозок в адрес указанных трёх станций погрузки, а также значения рассматриваемых показателей. Мы остановили процесс вычислений после 40-й итерации, руководствуясь

Таблица 2

Распределения числа маршрутов, планы перевозок и значения показателей
 P , C_p , C_s , C_o , S и S [выполнены авторами]

№	Порт/ Ст. погрузки	Шахматка поездопотоков, шт.						P	C_i	C	S
		Тм 1	Ап 2	Зр 3	Сл 4	Тц 5	Рм 6				
1	Всего	0	0	0	5	10	10				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	43,41	1181,01
	Тг 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Аз 6	0	0	0	4	0	0		5,56		
Всего	0	0	1	4	10	10					
2	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1133,12	0	43,07	1176,19
	Тг 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Аз 6	0	0	1	3	0	0		5,22		
	Всего	0	0	2	3	10	10				
3	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1128,64	0	42,73	1171,37
	Тг 5	0	0	0	1	10	10		37,85		
	Аз 6	0	0	2	2	0	0		4,88		
	Всего	0	0	2	3	10	10				
...
15	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1112,64	0	40,21	1152,85
	Тг 5	0	2	5	0	10	4		36,01		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
	Всего	0	3	9	0	10	4				
16	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1112,64	0	39,75	1152,39
	Тг 5	0	0	8	0	10	3		32,91		
	Аз 6	0	2	2	0	0	0		6,84		
	Всего	0	2	10	0	10	3				
...
38	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1104,96	0	44,89	1149,85
	Тг 5	0	8	3	0	10	0		40,69		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
	Всего	0	8	7	0	10	0				
39	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1103,68	0	46,11	1149,79
	Тг 5	0	9	0	0	10	0		41,91		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
	Всего	0	9	4	0	10	0				
40	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,33	1149,73
	Тг 5	0	10	1	0	10	0		43,13		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
	Всего	0	10	5	0	10	0				

несколькими соображениями. Главная причина остановки вычислений является позитивной и заключается в том, что достигнуто минимальное значение стоимости P всего перевозимого зерна, которое равно 1102,4 млн руб. (такой вывод можно сделать непосредственно из числовых данных, содержащихся в табл. 1). При наложенных ограничениях на объемы зерна, вывозимого со станций погрузки, обеспечивающими указанное значение станциями являются Аполлонская, Тацинская и Зерноград (отметим, что вместо станции Зерноград в указанном качестве может выступать станция Ремонтная). Итак, (см. № 40 в табл. 2), на станции

Аполлонская и Тацинская приходится по десять маршрутов, а на станцию Зерноград – пять маршрутов.

Для 40-й итерации значение суммарного стоимостного показателя S оказалось равным 1149,73 млн руб. В процессе минимизации этого показателя стоимость перевозки C возросла более чем на 9 % (отметим, что соответствующие изменения не были монотонными) и достигла значения 47,73 млн руб. Полученное значение показателя S представляет интерес, в первую очередь, для клиента. Величина показателя C (как с точки зрения увеличения, так и уменьшения стоимости перевозки) представляет интерес также для





Таблица 3

Распределения числа маршрутов, планы перевозок и значения показателей P , C_p , C_s , C_6 , C и S [выполнены авторами]

№	Порт/ Ст. погрузки	Шахматка поездопотоков, шт.						P	C_i	C	S
		Тм 1	Ап 2	Зр 3	Сл 4	Тц 5	Рм 6				
1	Всего	0	10	0	0	10	5				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,35	1153,75
	Тг 5	0	10	0	0	10	5		51,35		
	Аз 6	0	0	0	0	0	0		0		
							0				
2	Всего	0	10	0	0	10	5				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,28	1153,68
	Тг 5	0	10	0	0	10	4		49,46		
	Аз 6	0	0	0	0	0	1		1,82		
3	Всего	0	10	0	0	10	5				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	51,21	1153,61
	Тг 5	0	10	0	0	10	3		47,57		
	Аз 6	0	0	0	0	0	2		3,64		
...
19	Всего	0	10	1	0	10	4				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	50,09	1152,49
	Тг 5	0	10	0	0	7	4		44,24		
	Аз 6	0	0	1	0	3	0		5,85		
20	Всего	0	10	2	0	10	3				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	39,75	1152,43
	Тг 5	0	10	2	0	10	3				
	Аз 6	0	0	0	0	0	0				
...
60	Всего	0	10	5	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,41	1149,81
	Тг 5	0	10	3	0	8	0		42,11		
	Аз 6	0	0	2	0	2	0		5,3		
61	Всего	0	10	5	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,37	1149,77
	Тг 5	0	10	2	0	9	0		42,62		
	Аз 6	0	0	3	0	1	0		4,75		
62	Всего	0	10	5	0	10	0				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1102,4	0	47,33	1149,73
	Тг 5	0	10	1	0	10	0		43,13		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		

владельца инфраструктуры и перевозчика (например, если исходить из соображений конкурентоспособности железнодорожных перевозок по отношению к автомобильным). Отметим, что во всех итерациях станция перегрузки Ейск оказалась лишённой поступающих в её адрес маршрутов, что также допускает различную интерпретацию в отношении агентов.

С целью получения предварительных результатов рассмотрим ещё процесс минимизации значений стоимостного показателя C , предполагая, что при этом значения показателя P не меняются и остаются равными минимальному значению 1102,4 млн руб. (Отметим, что можно было минимизировать

значения показателя S). Соответствующие результаты приведены в табл. 3.

Получены те же значения, что и в предыдущем эксперименте (ср. последние строки в табл. 2 и 3). Таким образом, для агентов, чьи интересы сосредоточены, в первую очередь, на минимизации суммарного стоимостного показателя S , приведённые результаты (в рамках поставленных ограничений), по-видимому, являются не улучшаемыми.

5. Вспомогательные результаты

Другой причиной остановки процесса получения предварительных результатов является большой объём вычислений, выполняемых при решении рассматриваемых опти-

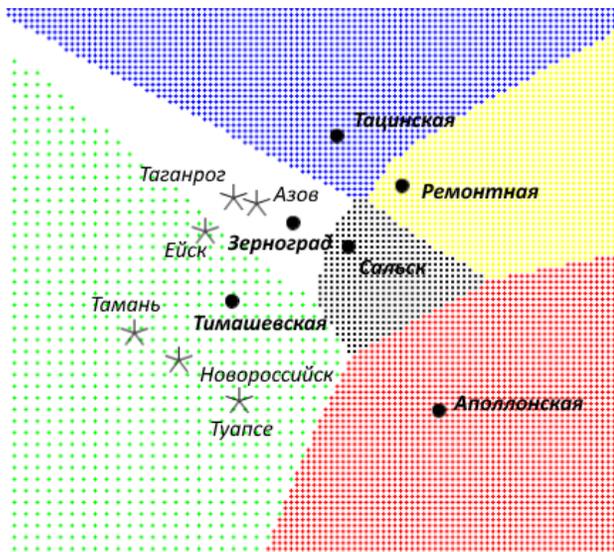


Рис. 2. Картина территориального рынка перевозок зерна [выполнено авторами].

мизационных задач. Из формулы (5) следует, что число допустимых планов перевозок (x_{ij}) в рассматриваемом проекте оценивается снизу числом:

$$C_{B+m-1}^{m-1} \cdot C_{B+n_1-1}^{n_1-1} = \frac{30! \cdot 27!}{(25!)^2 \cdot 5! \cdot 2!} = 50019606. \quad (7)$$

Чтобы найти дополнительные и являющиеся обоснованными ограничения на множества допустимых планов перевозок, обратимся к разработанной ранее авторами геометрической евклидовой модели (ГЕМ) территориального олигополистического рынка грузоперевозок, создаваемого станциями погрузки. Позволяющий построить указанную модель метод экономико-географического разграничения областей влияния станций погрузки подробно изложен в [19–21]. Здесь приводятся лишь соответствующие результаты, которые получены на основе (найденных с помощью метода наименьших квадратов) выражений зависимости стоимости c грузоперевозок для рассматриваемых станций погрузки (см. табл. 4).

В данном случае линиями, разграничивающими «области влияния» станций погрузки в дуополистических ситуациях, являются ветви гипербол (части этих ветвей изображены системой аналитических вычислений Махита на рис. 2). В «область влияния» станции Тимашевская (1) попали припортовые станции Тамань, Новороссийск, Туапсе и Ейск, а в «область влияния» станции Зерноград – станции Таганрог и Азов. Таким образом, в «области влияния» остальных

Таблица 4

Выражения зависимости стоимости перевозки [выполнено авторами]

1	Тимашевская	$c = 0,0021 + 0,819$
2	Аполлонская	$c = 0,0021 + 0,912$
3	Зерноград	$c = 0,0021 + 0,830$
4	Сальск	$c = 0,0021 + 0,892$
5	Тацинская	$c = 0,0021 + 0,833$
6	Ремонтная	$c = 0,0021 + 0,959$

четырёх станций погрузки не попала ни одна из рассматриваемых припортовых станций. Поскольку стоимости начально-конечных операций на станциях погрузки попарно различны (см. табл. 4), указанные результаты не следуют из простых географических соображений.

Отметим, что использование в прикладных исследованиях различных по математической природе методов позволяет повысить степень достоверности получаемых результатов. При этом часто удаётся существенно сократить объём вычислительных процедур, выполняемых при решении соответствующих оптимизационных задач. Опираясь на ГЕМ территориального рынка грузоперевозок, наложим на множество допустимых планов перевозок следующие ограничения. Будем предполагать, что в адрес припортовой станции Ейск со всех станций погрузки, кроме Тимашевская (1), может направляться не более трёх маршрутов. Кроме того, с указанной станции погрузки не может направляться более трёх маршрутов в адрес станции Таганрог.





Таблица 5

Распределения числа маршрутов, планы перевозок и значения показателей P, C_p, C_s, C_6, C и S [выполнены авторами]

№	Порт/ Ст. погрузки	Шахматка поездопотоков, шт.						P	C _i	C	S
		Тм1	Ап2	Зр3	Сл4	Тц5	Рм6				
1	Всего	0	10	0	5	0	10				
	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,83	1188,43
	Тг 5	0	6	0	5	0	10		41,35		
	Аз 6	0	4	0	0	0	0		9,48		
Всего	0	10	0	5	0	10					
2	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,75	1188,35
	Тг 5	0	7	0	4	0	10		42,25		
	Аз 6	0	3	0	1	0	0		8,5		
	Всего	0	10	0	5	0	10				
3	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1137,6	0	50,67	1188,27
	Тг 5	0	8	0	3	0	10		43,15		
	Аз 6	0	2	0	2	0	0		7,52		
	Всего	0	10	0	5	0	10				
...
52	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1115,2	0	45,48	1160,68
	Тг 5	0	9	5	0	1	6		41,28		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
	Всего	0	9	9	0	1	6				
53	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1113,92	0	45,48	1159,4
	Тг 5	0	9	7	0	1	4		39,96		
	Аз 6	0	1	3	0	0	0		5,52		
	Всего	0	10	10	0	1	4				
...
94	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,43	1150,23
	Тг 5	0	3	8	0	10	0		34,59		
	Аз 6	0	2	2	0	0	0		6,84		
	Всего	0	5	10	0	10	0				
95	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,33	1150,13
	Тг 5	0	4	7	0	10	0		35,81		
	Аз 6	0	1	3	0	0	0		5,52		
	Всего	0	5	10	0	10	0				
96	Ек 4	0	0	0	0	0	0	1108,8	0	41,23	1150,03
	Тг 5	0	5	6	0	10	0		37,03		
	Аз 6	0	0	4	0	0	0		4,2		
	Всего	0	5	10	0	10	0				

6. Обсуждение

Перейдём к многокритериальной оптимизации процесса грузоперевозок в адрес станций перегрузки Ейск, Таганрог и Азов, которые рассматриваются в совокупности. Оптимизация будет проводиться на основе эгалитарного подхода в теории благосостояния [16] в рамках введённых в подразделе 2 стоимостных показателей P и C . Инструментом, реализующим принцип единогласия, является критерий Парето.

Каждому распределению числа маршрутов $(a_i)_{i=1}^m \in D$ по m станциям погрузки и каждому относящемуся к нему плану перевозок (x_{ij}) в адрес рассматриваемых станций перегрузки поставим в соответствие вектор

$\{P, C\}$, называемый вектором полезностей. Оптимальным сочетанием распределения числа маршрутов и плана перевозок назовём такое сочетание $(a_i)_{i=1}^m$ и (x_{ij}) с вектором полезностей $\{P^*, C^*\}$, что не существует сочетания $(a_i)_{i=1}^m$ и (x_{ij}) , координаты вектора полезностей $\{P, C\}$ которого удовлетворяют условию $(P < P^*, C \leq C^*)$ или условию $(P \leq P^* \text{ и } C < C^*)$.

Из выражения сентенциональной связи: $(P < P^* \wedge C \leq C^*) \vee (P \leq P^* \wedge C < C^*)$, (8)

следует, что в процессе оптимизации не происходит потери полезности ни для одного из агентов, заинтересованных в минимизации показателей P и C .

Таблица 6

**Распределения числа маршрутов и значения показателей P , C_i и $P+C_i$
[составлены авторами]**

№	Количество маршрутов, сформированных на станциях погрузки						P	C_i	S
	Тм1	Ап2	Зр3	Сл4	Тц5	Рмб			
1	0	0	0	5	10	10	1137,6	60,45	1198,05
2	0	0	1	4	10	10	1133,12	60,45	1193,57
3	0	0	2	3	10	10	1125,64	60,45	1189,09
...
37	2	10	10	0	2	1	1114,8	55,37	1170,17
38	3	6	9	0	7	0	1114,6	55,31	1169,91
...
48	6	10	3	0	6	0	1114,0	54,41	1168,41
49	7	9	1	0	8	0	1113,8	54,39	1168,19
50	7	10	1	0	7	0	1113,8	54,27	1168,07

В табл. 5 приведены восемь комплектов числовых данных из 96 «ступенек», найденных *Maxima* и составляющих соответствующую «оптимизационную лестницу».

Для оптимального сочетания распределения числа маршрутов по станциям погрузки и плана перевозок оказывается (см. № 96 в табл. 5), что на станции Аполлонская следует сформировать пять маршрутов, а на станциях Черноград и Тацинская – по десять маршрутов. При этом значение показателя S оказывается равным 1150,03 млн руб., то есть практически совпадает с полученным в подразделе 4 значением 1149,73 млн руб.. Однако, значение показателя C оказывается равным 41,23 млн руб., то есть на 6,1 млн руб. меньше, чем в предыдущем случае (разница составляет почти 13 %).

Итак, в оптимальном сочетании с точки зрения клиента показатели не уступают предыдущим, а в отношении перевозчика, владельца транспортной инфраструктуры и операторской компании могут оказаться более предпочтительными.

Для сравнения рассмотрим результаты оптимизации грузоперевозок, выполняемых в адрес глубоководной станции перегрузки Тамань. Здесь используется критерий Парето с показателями P и C_i . В табл. 6 приведены восемь комплектов числовых данных из 50 «ступенек», составляющих соответствующую «оптимизационную лестницу».

Для оптимального распределения числа маршрутов по станциям погрузки (заметим, что оно существенно отличается от распределений, полученных для совокупности малых портов) получились значения равные: $P=1113,8$ млн руб., $C_i=54,27$ млн руб.

и $S=P+C_i=1168,07$ млн руб. В данном случае стоимость перевозки на 13,04 млн руб. больше, чем для перевозок в адрес малых портов (разница составляет почти 32 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан основанный на эгалитарных принципах теории благосостояния подход к изучению функционирования ключевого связующего и преобразующего звена логистической системы, каковым являются грузоперевозки, осуществляемые железнодорожным транспортом. Математическая модель перевозочного процесса, рассматриваемого в рамках набора стоимостных показателей, представляет собой многокритериальную и многоэкстремальную задачу целочисленного линейного программирования. Ввиду особой важности для мультимодальных систем грузоперевозок координации действий кооперированных агентов и уровня их делового доверия реализация интересов любого агента не должна происходить путём ущемления интересов других.

Найдены оптимальные по Парето сочетания распределений числа маршрутов по станциям погрузки и относящихся к ним планов грузоперевозок в адрес станций перегрузки. Соответствующие значения стоимостных показателей предоставляют агентам возможности выбора альтернативных вариантов в схемах перевозок с точки зрения конкурентоспособности малых припортовых станций перегрузки по отношению к глубоководным станциям.

Программная реализация оптимизационного алгоритма функционирования рассматриваемого звена логистической системы



выполнена в среде системы аналитических вычислений. Обращение к вычислительным экспериментам создаёт возможности для целенаправленного оперирования значениями целевых функций и ограничениями в задаче транспортного типа с целью выявления оптимального уровня организации и экономической эффективности перевозочного процесса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Зак Ю. А. Математические модели и алгоритмы построения допустимых и оптимальных маршрутов движения и доставки грузов // Проблемы управления. – 2016. – № 5. – С. 57–70. [Электронный ресурс]: https://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=ru&paperid=993&option_lang=rus. Доступ 13.01.2023.
2. Бородин А. Ф., Вербов Д. М., Рубцов Д. В., Новиков П. О. Автоматизированная система организации вагонопотоков: современные теория и практика // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 11. – С. 4–17. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47186444> [платный доступ].
3. Баушев А. Н., Сафронов В. С., Осьминин А. Т., Садчикова В. А. Алгоритмы оптимизации процесса согласования заявок на перевозки грузов по сети российских железных дорог // Вестник транспорта Поволжья. – 2022. – № 5 (95). – С. 52–66. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49856109>. Доступ 13.01.2023.
4. Осьминин А. Т. О разработке интеллектуальной системы управления перевозочным процессом // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 3. – С. 17–27. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44819081> [платный доступ].
5. Кужель А. Л., Осьминин А. Т., Осьминин Л. А. Развитие теории и практики разработки графика движения поездов // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 3. – С. 6–13. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17723039> [платный доступ].
6. Кокшаров Ю. А. Эффективность оптимизации нормы состава грузового поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2005. – № 1. – С. 7–11. [Электронный ресурс]: https://izvestiapgups.org/assets/pdf/01_2005.pdf [полный текст номера]. Доступ 13.01.2023.
7. Шаров В. А., Тлеуханов А. А. Динамические приоритеты пропуска грузовых поездов в коммерческих целях // Мир транспорта. – 2019. – № 4 (83). – С. 208–217. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2019-17-4-208-217>.
8. Осинцев Н. А., Рахмангулов А. Н. Оценка логистических потоков в зеленых цепях поставок методом DEMATEL // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 4. – С. 81–89. DOI: [10.53914/issn2071-2243_2021_3_162](https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2021_3_162).
9. Севостьянов А. Л. Проблемы развития транспортной инфраструктуры экспорта зерна // Вестник Воро-

нежского государственного аграрного университета. – 2021. – № 3. – С. 162–167. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47403407>. Доступ 13.01.2023.

10. Светлов Н. М. Влияние глобального потепления на сельскохозяйственные товарные потоки Европейской России // Московский экономический журнал. – 2018. – № 3. – С. 214–227. DOI: [10.24411/2413-046X-2018-13010](https://doi.org/10.24411/2413-046X-2018-13010).

11. Черепанов И. О. Изыскивая погрузочные ресурсы // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 9. – С. 48–49. [Электронный ресурс]: <https://rucont.ru/efd/784498> [платный доступ].

12. Куренков П. В., Хусаинов Ф. И. Инфраструктура железных дорог России и регулирование вагонных парков // Экономика железных дорог. – 2013. – № 9. – С. 35–48. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20211142>. Доступ 13.01.2023.

13. Хусаинов Ф. И. Экономические проблемы управления вагонными парками // Экономика железных дорог. – 2010. – № 11. – С. 63–68. [Электронный ресурс]: https://www.hse.ru/data/2014/02/19/1330667500/14_economicshye2010.pdf. Доступ 13.01.2023.

14. Кужель А. Л. Необходим комплексный подход // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 9. – С. 41–43. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36283660> [платный доступ].

15. Третьяков Г. М., Денисов В. В., Кононов И. И. Повышение эффективности перевозки зерновых грузов железнодорожным транспортом // Наука и образование транспорта. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 80–83. [Электронный ресурс]: <https://csc-knu.github.io/tpr/books/mulen-1991.pdf>. Доступ 13.01.2023.

16. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: Аксиомы и модели / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 464 с. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21808892>. Доступ 13.01.2023.

17. Виноградов И. М. Математическая энциклопедия: Т. 2. – М.: Советская Энциклопедия. 1979. – С. 79–80.

18. Прохоров Ю. В., Розанов Ю. А. Теория вероятностей: Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. – М.: Наука, 1967. – 495 с.

19. Chislov, O. N., Zadorozhnyi, V. M., Bogachev, V. A., Kravets, A. S., Bogachev, T. V., Bakalov, M. V. Mathematical modeling of cargo flow distribution in a regional multimodal transportation system. *Transport Problems*, 2021, Vol. 16, No. 2, pp. 153–165. DOI: [10.21307/tp-2021-031](https://doi.org/10.21307/tp-2021-031).

20. Chislov, O., Zadorozhnyi, V. M., Bogachev, V. A., Kravets, A. S., Bogachev, T. V., Egorova, I. N. Methods of Analytical Modeling the Process of Freight Transportation Management in the Regional Transport Complex. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2021, Vol. 208, pp. 197–210. DOI: [10.1007/978-3-030-71771-1_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71771-1_13).

21. Задорожний В. М., Малоземов В. Н., Богачев В. А. Экономико-географический метод в моделировании грузопотоков нефтепродуктов на полигоне Северо-Кавказской железной дороги // Вестник РГУПС. – 2020. – № 2. – С. 103–112. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43040817>. Доступ 13.01.2023.

Информация об авторах:

Колесников Максим Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры экономики и менеджмента Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, kmv-d@list.ru.

Богачев Виктор Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, bogachev-va@yandex.ru.

Задорожний Вячеслав Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станции и грузовой работы Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, adorozhny91@mail.ru.

Бакалов Максим Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры управления эксплуатационной работой Ростовского государственного университета путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, Maxim_btmv@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 27.04.2023, одобрена после рецензирования 02.06.2023, принята к публикации 05.06.2023.