

## **Вычислительный эксперимент в оптимизационном моделировании процесса мультимодальных грузоперевозок на основе эгалитарных принципов**

**В. А. Богачев<sup>1</sup>, П. В. Куренков<sup>2</sup>, Е. А. Чеботарева<sup>1</sup>, А. С. Кравец<sup>1</sup>, Т. В. Богачев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 344038, Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2

<sup>2</sup>Самарский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 443066, Самара, ул. Свободы, 2 В

<sup>3</sup>Ростовский государственный экономический университет (РИНХ), 344002, Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, д. 69

**Для цитирования:** Богачев В. А., Куренков П. В., Чеботарева Е. А., Кравец А. С., Богачев Т. В. Вычислительный эксперимент в оптимизационном моделировании процесса мультимодальных грузоперевозок на основе эгалитарных принципов // Бюллетень результатов научных исследований. — 2022. — Вып. 3. — С. 151–162. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-151-162

### **Аннотация**

**Цель:** Построение оптимизационной модели мультимодальных грузоперевозок в припортовой транспортно-технологической системе с участием железнодорожного и морского видов транспорта на основе эгалитарных принципов, позволяющей манипулировать значениями параметров, характеризующих перевозочный процесс, и учитывать интересы участников перевозочного процесса в рамках рассматриваемых стоимостных показателей. **Методы:** Разработан алгоритм планирования отгрузки и подвода грузопотоков в адрес припортовых станций с учетом маршрутизации, временных и стоимостных параметров перевозочного процесса, при которых обеспечиваются оптимальные значения стоимости перевозимого груза и комплексных временных показателей перевозочного процесса. Одним из ограничений в оптимизационной задаче является объем судовой партии, ожидаемой на какой-либо из припортовых станций выгрузки. Построенная математическая модель является многокритериальной и многоэкстремальной задачей нелинейного стохастического целочисленного программирования. Теоретико-экономическая основа исследований представляет собой синтез классических концепций утилитарного и эгалитарного подходов в теории благосостояния, что позволяет строить обоснованные в теоретическом плане и востребованные на практике оптимизационные модели железнодорожной составляющей мультимодальных грузоперевозок. **Результаты:** Разработанный в среде системы аналитических вычислений алгоритм оптимизации предоставляет возможности наряду с оптимальными по Парето планами перевозок находить планы, реализующие логистическую концепцию «точно в срок», при которых также достигается баланс интересов рассматриваемых участников перевозочного процесса. **Практическая значимость:** Предложен подход в исследовании организации процесса грузоперевозок на железнодорожном полигоне, осуществляемых в рамках мультимодальной припортовой транспортно-технологической системы. Разработанные модели и алгоритмы могут быть рекомендованы к практическому использованию в ходе формирования и анализа логистических цепей поставок с участием железнодорожного и морского видов транспорта.

**Ключевые слова:** Транспортные системы, железнодорожный транспорт, морской транспорт, планирование, оптимизация, вычислительный эксперимент.

## Введение

Анализ проведенных ранее научных исследований [1–7] подтверждает актуальность изучения вопросов оптимизации функционирования транспортных систем (в том числе припортовых) с точки зрения уровня их организации и экономической целесообразности. Организация мультимодальных грузоперевозок подразумевает кооперирование (в той или иной форме) участников перевозочного процесса, каждый из которых осуществляет свои функции в соответствующем экономическом пространстве. Однако клиента, как правило, интересует лишь результат, получаемый при функционировании всей относящейся к его коммерческим интересам транспортно-логистической цепочки. Целью настоящего исследования является построение оптимизационной модели грузоперевозок на транспортном полигоне, позволяющей учитывать интересы участников перевозочного процесса в рамках рассматриваемых стоимостных показателей.

## Характеристики рассматриваемого транспортно-логистического проекта

В качестве объекта приложения выполняемых транспортно-логистических исследований (обратим внимание на то, что они носят общий характер) рассматривается юго-западная часть полигона Северо-Кавказской железной дороги, обеспечивающей грузоперевозки в адрес портов Азово-Черноморского бассейна (АЧБ). Выгодное географическое расположение этих портов, а также универсальность в плане номенклатуры поступающих в них грузов создают условия для разносторонней и достаточно жесткой конкуренции.

В исследовании изучается система транспортировки в адрес портов АЧБ таких массовых для российских экспортеров и европейских потребителей грузов, как зерновые. В качестве станций выгрузки рассматриваются (относящиеся к расположенным на побережье Черного моря глубоководным портам) такие, как Новороссийск, Тамань и Туапсе (рис. 1). В соответствующие порты круглогодично заходят морские суда типа *Rapatax* дедвейтом до 80 тыс. т. В рассматриваемом ниже конкретном транспортно-логистическом проекте предполагается, что отправительские маршруты состоят в среднем от 50 вагонов грузоподъемностью по 64 т каждый. Таким образом, одна судовая партия практически обеспечивается  $B = 25$  маршрутами.

В качестве станций погрузки, на которых находится предназначенный для перевозки зерновой груз, рассмотрим следующие 8 станций: Морозовская, Ремонтная, Белоглинская, Ипатово, Тимашевская, Изобильная, Благодарная и Аполлонская. Численные данные, относящиеся к этим станциям и указанным выше станциям выгрузки, на основании которых строятся оптимизационные модели грузоперевозок на железнодорожном полигоне, приведены в табл. 1.



Рис. 1. Схема припортовой транспортно-технологической системы

ТАБЛИЦА 1. Стоимостные характеристики исследуемого грузопотока

п/п	Станция погрузки	Цена зерна на станциях погрузки, млн руб./маршрут, $p_i$	Стоимость перевозки одного отправительского маршрута (50 вагонов), $c_{ij}$ млн руб.		
			Новороссийск	Туапсе	Тамань
1	Морозовская	43,84	1,97	2,28	2,13
2	Ремонтная	45,12	1,81	1,97	1,97
3	Белоглинская	45,12	1,33	1,51	1,45
4	Ипатово	49,60	1,69	1,75	1,88
5	Тимашевская	49,60	9,81	1,62	1,10
6	Изобильная	51,20	1,39	1,45	1,51
7	Благодарное	45,12	1,75	1,81	1,88
8	Аполлонская	43,84	1,81	1,57	1,97

## Оптимизационная модель процесса грузоперевозок

В концептуальном плане мы руководствуемся принципами эгалитарного подхода в теории благосостояния в их понимании, представленном в [8]. Постановка рассматриваемых в статье оптимизационных задач опирается на одно из основных правил эгалитаризма, а именно на принцип единогласия для всех рассматриваемых участников перевозочного процесса (следуя терминологии работы [8], будем называть их агентами). Целесообразность указанного подхода объясняется тем, что процесс мультимодальных грузоперевозок предполагает координацию действий агентов, в качестве которых рассматриваются следующие: клиент (грузоотправитель, грузовладелец), владелец инфраструктуры, перевозчик, операторская компания (владелец подвижного состава) и логистическая компания (координирующая весь указанный процесс).

Имеются  $m$  станций погрузки и  $n$  припортовых станций выгрузки. На каждой  $i$ -й станцией погрузки ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) организуются отправительские маршруты с некоторым грузом, а на каждой  $j$ -й станцией выгрузки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) могут быть сформированы судовые партии, вмещающие заданное количество  $B$  таких маршрутов. Введем множество  $D$ , элементами которого являются всевозможные упорядоченные наборы  $(a_i)_{i=1}^m$ , где  $a_i$  — целые неотрицательные числа, удовлетворяющие условию:

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

С точки зрения геометрии конечномерного пространства для каждого натурального числа  $B$  множество  $D$  представляет собой некоторое подмножество точек гиперплоскости в пространстве  $R^m$ , которая задается равенством (1), а именно подмножество, точки которого имеют неотрицательные целочисленные координаты. Если обратиться к комбинаторному анализу, то каждый набор  $(a_i)_{i=1}^m \in D$  можно рассматривать как размещение  $B$  неразличимых предметов по  $m$  ячейкам. Отсюда, согласно известной формуле, следует, что множество  $D$  состоит из

$C_{B+m-1}^{m-1} = \frac{(B+m-1)!}{B!(m-1)!}$  наборов. Из приведенного выражения видно, как быстро воз-

растает объем вычислений, выполняемых в процессе решения рассматриваемых далее оптимизационных задач, с увеличением значений параметров  $m$  и  $B$ . Например, в ситуации, когда  $m = 8$  и  $B = 25$ , получаем, что множество  $D$  состоит из

$$\frac{32!}{25!7!} = 3\,365\,856 \text{ наборов.}$$

Возвращаясь к транспортно-логистическим построениям, для каждой  $j$ -й станции выгрузки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) рассмотрим введенное выше множество  $D$ , элементы которого будем представлять как всевозможные варианты распределения чисел  $a_i$  по  $m$  станциям погрузки (то есть варианты распределения числа отправительских маршрутов, направляемых в адрес этой станции выгрузки). Далее на множество  $D$  будем накладывать ряд ограничений организационного характера, а также позволяющих учитывать интересы рассматриваемых агентов. В частности, чтобы избежать существенных диспропорций в распределении чисел  $a_i$  по станциям погрузки, будем предполагать, что эти числа ограничены сверху той или иной константой.

Экономическую целесообразность и уровень организации процесса грузоперевозок будем оценивать в рамках эгалитарного подхода в теории благосостояния с точки зрения значений двух стоимостных показателей этого процесса. Поставим задачу о нахождении для каждой  $j$ -й станции выгрузки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) такого распределения числа отправительских маршрутов по  $m$  станциям погрузки  $(a_i)_{i=1}^m \in D$ , что соответствующая перевозка в адрес этой станции окажется оптимальной с точки зрения указанных показателей. Первый показатель является аналогом стоимостной целевой функции, рассматриваемой в классической постановке транспортной задачи, и выражается целевой функцией вида:

$$C_j = \sum_{i=1}^m c_{ij} a_i, \quad (2)$$

где  $c_{ij}$  — стоимость перевозки одного отправительского маршрута на участке между  $i$ -й станцией погрузки ( $i = 1, 2, \dots, m$ ) и  $j$ -й станцией выгрузки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Второй стоимостный показатель не связан непосредственно ни с одной из станций выгрузки. Объяснением его введения является то обстоятельство, что цена груза, находящегося на разных станциях погрузки, может быть разной. Пусть  $p_i$  — стоимость груза, который содержится в одном маршруте, отправляемом с  $i$ -й станции погрузки ( $i = 1, 2, \dots, m$ ). Положим:

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

Для каждого варианта распределения  $(a_i)_{i=1}^m \in D$  числа маршрутов по  $m$  станциям погрузки целевой функцией  $P$  выражается стоимость всего груза, который (при этом варианте распределения) подлежит транспортировке в адрес какой-либо из станций выгрузки. Введением показателя (3) бизнес-процесс грузоперевозок дополняется внешней коммерческой составляющей, и логистическое содержание транспортной задачи приобретает новое качество.

В настоящем исследовании разрабатывается алгоритм нахождения вариантов распределения числа маршрутов по станциям погрузки, которые с точки зрения двух введенных выше показателей (2) и (3) являются в некотором смысле оптимальными. При этом постановка оптимизационной задачи соответствует представлению о корпоративной ответственности агентов [8] в том смысле, что полученное решение содержит условия, при которых достигается определенный баланс интересов этих агентов. С одной стороны, рассматриваемая задача относится к задачам транспортного типа, с другой — к многокритериальным задачам линейного целочисленного программирования. Разработанный алгоритм и численный метод решения задачи реализованы в среде системы компьютерной математики Maxima (Free Ware).

### **О показателях перевозочного процесса, интересах агентов и ограничениях в задаче**

Показателями  $C_j$  и  $P$  выражаются прямые коммерческие интересы рассматриваемых агентов. Величина показателя  $C_j$  допускает различное отношение со стороны рассматриваемых агентов. С одной стороны, с увеличением стоимости перевозки коммерческая выгода, получаемая владельцем инфраструктуры и перевозчиком, возрастает. С другой стороны, этим агентам следует оставаться конкурентоспособными на рынке транспортных услуг (в том числе по отношению к автомобильному виду транспорта). В аналитических выражениях (2) и (3) показателей  $C_j$  и  $P$  не содержится предпосылок для прямого конфликта интересов агентов. В данном случае единственной управляемой переменной (то есть полезностью, которая в численном виде выражает интересы всех агентов) является стоимость (перевозки или груза).

Отметим еще, что с общей экономической точки зрения ситуация в отношении станций выгрузки может быть позиционирована как олигопсония. При этом непосредственным потребителем транспортно-логистических услуг в первую очередь является, конечно, клиент. Далее в конкретном проекте в качестве станции выгрузки рассматривается одна из указанных выше припортовых станций, а именно станция Тамань (для других станций выгрузки соответствующие вычислительные процедуры выполняются аналогичным образом). Исходя из соображений сбалансированности распределения числа маршрутов по станциям погрузки, будем предполагать, что для транспортировки в адрес указанной станции на каждой из восьми станций погрузки может быть сформировано не более чем, например, по 10 маршрутов с зерном.

## Предварительный результат

На первом, пробном этапе оптимизационного моделирования будем минимизировать значения стоимостного показателя  $C_3$ . В табл. 2 приведены результаты соответствующего вычислительного эксперимента. В процессе указанной минимизации последовательно найдены 155 распределений числа отправительских маршрутов по станциям погрузки. В последнем распределении на станции Белоглинская и Тимашевская приходится по 10 маршрутов, а на станцию Изобильная — 5 маршрутов. Такой результат вполне объясним, поскольку тарифы в адрес припортовой станции Тамань для указанных трех станций погрузки меньше, чем для остальных рассматриваемых станций (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 2. Распределения числа маршрутов и значения показателей  $C_3$  и  $P$

№ итерации	Число формируемых на станциях погрузки отправительских маршрутов								$C_3$	$P$
	Морозовская	Ремонтная	Белоглинская	Ипатово	Тимашевская	Изобильная	Благодарное	Аполлонская		
1	0	0	0	0	0	5	10	10	46,05	1145,60
2	0	0	0	0	0	6	9	10	45,68	1151,68
3	0	0	0	0	0	6	10	9	45,59	1152,96
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
65	0	0	0	0	4	10	10	1	40,27	1205,44
66	0	0	0	0	5	9	6	5	40,22	1198,72
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
153	0	0	8	0	10	7	0	0	33,17	1215,36
154	0	0	9	0	10	6	0	0	33,11	1209,28
155	0	0	10	0	10	5	0	0	33,05	1203,20

Значение показателя  $C_3$  уменьшилось на 13 (млн руб.), то есть более чем на 28 %. Однако при этом произошел (существенный и устойчивый в своей тенденции) рост значений другого показателя — стоимости груза  $P$ . Его значение увеличилось на 57,60 (млн руб.), то есть более чем на 5 %. Как видно из приведенных в табл. 2 значений, указанный рост не является монотонным. Итак, увеличение стоимости перевозимого зерна оказалось значительно больше, чем уменьшение стоимости его перевозки. То есть произошло ущемление коммерческих интересов клиента (в данном случае покупателя).

## Эгалитарный подход с ограничением на стоимость перевозимого груза

Исходя из полученного выше предварительного результата, делаем вывод о том, что минимизация значений показателя  $C_3$  должна сопровождаться ограничениями сверху на значения показателя  $P$ . В [9, 10] процесс оптимизации распределений грузоперевозок выполнялся путем обращения к критерию Парето. В настоящем исследовании к реализации эгалитарного подхода в теории благосостояния мы подойдем несколько иным образом. Процесс оптимизации будет осуществляться с использованием модификации этого критерия, а именно посредством логической связки вида:

$$(C_3 < C) \& (P \leq P_0), \quad (4)$$

где  $P_0$  — некоторое заданное фиксированное значение.

Из выражения (4) видно, что в этом случае эгалитарный принцип единогласия реализуется несимметричным образом. Отметим, что хотя в процессе оптимизации по-прежнему будет доминировать минимизация значений стоимостного показателя  $C_3$ , при этом не будет происходить потери полезности, которая выражается показателем  $P$ .

Итак, на следующем этапе вычислительного эксперимента в оптимизационном моделировании минимизация значений показателя  $C_3$  будет осуществляться при условии, что значения показателя  $P$  не должны превосходить некоторого наперед заданного значения  $P_0$ . Пользуясь приведенными в табл. 2 результатами, сначала положим, например,  $P_0 = 1150$  (млн руб.). В табл. 3 приведены результаты вычислительных процедур, выполненных согласно описанному выше алгоритму.

ТАБЛИЦА 3. Распределения числа маршрутов и значения показателей  $C_3$  и  $P$

№ итерации	Число формируемых на станциях погрузки отправительских маршрутов								$C_3$	$P$
	Морозовская	Ремонтная	Белоглинская	Игнаво	Тимашевская	Изобильная	Благодарное	Аполлонская		
1	0	0	0	0	0	5	10	10	46,05	1145,60
2	0	0	0	0	1	4	10	10	45,64	1144,00
3	0	0	0	0	2	3	10	10	45,23	1142,40
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
19	0	0	1	0	7	0	7	10	42,26	1149,12
20	0	0	1	0	7	0	8	9	42,01	1146,56
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
51	0	0	10	0	6	0	5	4	38,38	1149,76
52	0	0	10	0	7	0	0	8	37,96	1149,12

Обращаем внимание на появление целого набора «неожиданных» дополнительных пар значений показателей  $C_3$  и  $P$ , которые не были выявлены при использованном в предыдущем разделе подходе к минимизации значений показателя  $C_3$ . Именно наряду с (ожидаемой) парой значений  $C_3 = 46,05$  (млн руб.) и  $P = 1145,60$  (млн руб.) (см. первые строки табл. 2 и 3) найдена еще 51 пара значений, удовлетворяющих заданному ограничению  $P \leq 1150$  (млн руб.). При этом в результате выполненной оптимизации значение показателя  $C_3$  уменьшилось на 8,09 (млн руб.), то есть более чем на 17,5 %, а значение показателя  $P$  увеличилось лишь на 3,52 (млн руб.), то есть на 0,3 % (ср. с результатами, полученными ранее).

Сделаем общее замечание в отношении методологии проводимых исследований. Укажем на роль, которую в построении оптимизационной модели процесса грузоперевозок играет вычислительный эксперимент. Указанный инструмент имитационного моделирования позволяет, учитывая специфику транспортно-логистической ситуации, целенаправленно и гибко манипулировать значениями параметров, характеризующих перевозочный процесс. Основаниями для такого рода вариаций могут служить как интересы агентов, так и уточняющие рекомендации экспертов. Приводимые ниже результаты (по мере последовательности их получения) дают некоторое представление о соответствующих возможностях в моделировании. Исходя из результатов, приведенных в табл. 3, положим теперь  $P_0 = 1145,60$  (млн руб.).

Значение показателя  $C_3$  уменьшилось на 7,31 (млн руб.), то есть более чем на 15,9 %. При этом значение показателя  $P$  также уменьшилось на 0,96 (млн руб.), то есть почти на 0,1 %. Отметим, что приведенные во всех строках табл. 2–3 распределения числа отправительских маршрутов по станциям погрузки оказываются попарно различными. Полученные при этом в последних строках этих таблиц значения показателей  $C_3$  и  $P$  предоставляют агентам выбор с точки зрения их интересов.

## Библиографический список

1. Мамаев Э. А. Формирование внутренней и внешней среды транспортной системы Южного региона / Э. А. Мамаев, М. В. Колесников, М. В. Бакалов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 3(75). — С. 118–127. — ISSN 0201-727X.
2. Числов О. Н. Методы выбора рациональных технико-технологических параметров региональной железнодорожной припортовой транспортной системы / О. Н. Числов, Д. С. Безусов // Транспорт: наука, образование, производство: сб. науч. труд. Международной научно-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2017. — С. 68–71.
3. Зубков В. Н. Перспективы развития транспортных связей регионов Юга России с привлечением перевалочных мощностей портов Крыма / В. Н. Зубков, Е. В. Рязанова; под общ. ред. Б. А. Левина // Транспортные системы: тенденции развития: сб. труд. Международной научно-практ. конф. — М., 2016. — С. 251–256.
4. Мамаев Э. А. Логистика и организация перевозок припортовой железной дороги на современном этапе / Э. А. Мамаев // Вестник РГУПС. — 2019. — № 4(76). — С. 155–163.

5. Чеченова Л. М. Системный подход к рассмотрению перспективных направлений развития транспортных систем / Л. М. Чеченова // Бюллетень результатов научных исследований. — 2020. — Вып. 3. — С. 109–121. — DOI: 10.20295/2223-9987-2020-3-109-121
6. Никифорова Г. И. Взаимодействие железнодорожного и морского транспорта в логистической цепи доставки внешнеторгового грузопотока / Г. И. Никифорова // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2019. — Т. 16. — Вып. 3. — С. 339–346. — DOI: 10.20295/1815-588X-2019-3-339-346.
7. Чеботарева Е. А. Теория и методология организации транспортного производства в припортовых транспортно-технологических системах: монография / Е. А. Чеботарева // ФГБОУ ВО РГУПС. — Ростов-на-Дону, 2020. — 267 с.
8. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: Аксиомы и модели: пер. с англ. / Э. Мулен. — М.: Мир, 1991. — 464 с.
9. Числов О. Н. Временная параметризация в распределении грузопотоков транспортно-технологических систем / О. Н. Числов, В. А. Богачев, А. С. Кравец, Т. В. Богачев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. — 2019. — № 3. — С. 14–22.
10. Chislov O. N. Time Parameters Optimization of the Export Grain Traffic in the Port Railway Transport Technology System / O. N. Chislov, V. M. Zadorozhnyi, T. V. Bogachev et al. // Smart and Green Solutions for Transport Systems. — 2020. — Vol. 1091. — Pp. 126–137.

Дата поступления: 01.08.2022

Решение о публикации: 19.08.2022

#### **Контактная информация:**

БОГАЧЕВ Виктор Алексеевич — канд. физ.-мат. наук, доц.; bogachev-va@yandex.ru  
КУРЕНКОВ Петр Владимирович — д-р экон. наук, проф.; petrkurenkov@mail.ru  
ЧЕБОТАРЕВА Евгения Андреевна — канд. техн. наук, доц.; abrosimova@ya.ru  
КРАВЕЦ Александра Сергеевна — канд. техн. наук, доц.; kravec\_as@mail.ru  
БОГАЧЕВ Тарас Викторович — канд. физ.-мат. наук, доц.; bogachev73@yandex.ru

## **Computational Experiment in Optimization Modeling of Multimodal Cargo Transportation Process Based on Egalitarian Principles**

**V. A. Bogachev<sup>1</sup>, P. V. Kurenkov<sup>2</sup>, E. A. Chebotareva<sup>1</sup>, A. S. Kravets<sup>1</sup>,  
T. V. Bogachev<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Rostov State Transport University, sq. Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolchenia, 2, Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

<sup>2</sup>Samara State Transport University Samara, Svobody str., 2 B, 443066, Samara, Russian Federation

<sup>3</sup>Rostov State University of Economics, Bolshaya Sadovaya str., 69, Rostov-on-Don, 344002, Russian Federation

**For citation:** Bogachev V. A., Kurenkov P. V., Chebotareva E. A., Kravets A.S., Bogachev T. V. Computational Experiment in Optimization Modelling of Multimodal Cargo Transportation Process Based on Egalitarian Principles. *Bulletin of scientific research results*, 2022, iss. 3, pp. 151–162. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2022-3-151-162

## Summary

**Purpose:** To build an optimization model of multimodal cargo transportations in a port-side transport and technological system with the participation of rail and sea kinds of transport based on egalitarian principles, the model allows manipulating the values of parameters characterizing a transportation process and taking into account interests of transportation process participants within the frames of being considered cost indicators. **Methods:** An algorithm has been developed for planning the shipment and delivery of cargo flows to port station address in view of routing, time and cost parameters of transportation process which under, cost optimal values of being transported cargo and complex time indicators of transportation process are provided. One of the limitations in the optimization task is the volume of a ship batch that's expected at any port unloading stations. The built mathematical model is a multi-criteria and multi-extreme task of nonlinear stochastic integer programming. The research theoretical and economic basis is the synthesis of the classical concepts of utilitarian and egalitarian approaches in a welfare theory that makes it possible to build sounded theoretically and demanded in practice the optimization models of multimodal freight transportation railway component. **Results:** Developed in analytical computing system environment the optimization algorithm provides opportunities along with Pareto optimal transportation plans for to find plans embodying "just in time" logistic concept, so at these plans, it is also achieved the balance of interests of transportation considered participants. **Practical importance:** An approach is proposed for to study freight transportation organization on a railway landfill wherein transportations are pursued within the framework of multimodal port-side transport and technological system. The developed models and algorithms can be recommended for practical use during the formation and analysis of logistic supply chains with rail and sea transport kind participation.

**Keywords:** Transport systems, railway transport, sea transport, planning, optimization, computational experiment.

## References

1. Mamaev E. A. Formirovanie vnutrenney i vneshney sredy transportnoy sistemy Yuzhnogo regiona [Formation of the internal and external environment of the transport system of the Southern region]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Communications]. 2019, I. 3(75), pp. 118–127. (In Russian)
2. Chislov O. N. Metody vybora ratsional'nykh tekhniko-tekhnologicheskikh parametrov regional'noy zheleznodorozhnoy priportovoy transportnoy sistemy [Methods for choosing rational technical and technological parameters of the regional railway port transport system]. *Transport: nauka, obrazovanie, proizvodstvo* [Transport: science, education, production]. Rostov-on-Don. 2017, pp. 68–71. (In Russian)
3. Zubkov V. N. Perspektivy razvitiya transportnykh svyazey regionov Yuga Rossii s privlecheniem perevalochnykh moshchnostey portov Kryma [Prospects for the development of transport links in the regions of the South of Russia with the involvement of transshipment capacities of the ports of Crimea]. *Transportnye sistemy: tendentsii razvitiya* [Transport systems: development trends]. Moscow, 2016, pp. 251–256. (In Russian)
4. Mamaev E. A. Logistika i organizatsiya perevozok priportovoy zheleznoy dorogi na sovremennom etape [Logistics and organization of transportation of the port railway at the present stage]. *Vestnik RGUPS* [Vestnik RGUPS]. 2019, I. 4 (76), pp. 155–163. (In Russian)

5. Chechenova L. M. Sistemnyy podkhod k rassmotreniyu perspektivnykh napravleniy razvitiya transportnykh sistem [A systematic approach to the consideration of promising directions for the development of transport systems]. *Byulleten' rezul'tatov nauchnykh issledovaniy* [Bulletin of the results of scientific research]. 2020, I. 3, pp. 109–121. DOI: 10.20295/2223-9987-2020-3-109-121. (In Russian)
6. Nikiforova G. I. Vzaimodeystvie zheleznodorozhnogo i morskogo transporta v logisticheskoy tsepi dostavki vneshnetorgovogo gruzopotoka [Interaction of railway and sea transport in the logistic chain of delivery of foreign trade cargo traffic]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Izvestiya of the Petersburg University of Communications]. St. Petersburg: PGUPS Publ., 2019, vol. 16, I. 3, pp. 339–346. DOI: 10.20295/1815-588Kh-2019-3-339-346. (In Russian)
7. Chebotareva E. A. Teoriya i metodologiya organizatsii transportnogo proizvodstva v priportovykh transportno-tekhnologicheskikh sistemakh [Theory and methodology of organizing transport production in portside transport and technological systems]. *FGBOU VO RGUPS* [Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education RGUPS]. Rostov-on-Don. 2020. 267 p. (In Russian)
8. Mullen E. *Kooperativnoe prinyatie resheniy: Aksiomy i modeli* [Cooperative decision making: Axioms and models]. Moscow: Mir Publ., 1991. 464 p. (In Russian)
9. Chislov O. N., Bogachev V. A., Kravets A. S., Bogachev T. V. Vremennaya parametrizatsiya v raspredelenii gruzopotokov transportno-tekhnologicheskikh sistem [Temporal parametrization in the distribution of cargo flows in transport and technological systems]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Siberian State University of Communications]. 2019, I. 3, pp. 14–22. (In Russian)
10. Chislov O. N., Zadorozhnyy V. M., Bogachev T. V., Kravets A. S., Egorova I. N., Bogachev V. A. Time Parameters Optimization of the Export Grain Traffic in the Port Railway Transport Technology System. *Smart and Green Solutions for Transport Systems*. 2020, vol. 1091, pp. 126–137.

Received: August 01, 2022

Accepted: August 19, 2022

**Author's information:**

Viktor A. BOGACHEV — Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Associate Professor;

bogachev-va@yandex.ru

Petr V. KURENKOV — Dr. Sci. in Economics, Professor; petrkurenkov@mail.ru

Evgeniia Pj. CHEBOTAREVA — PhD in Engineering, Associate Professor; abrosimova@ya.ru

Alexandra S. KRAVETS — PhD in Engineering, Associate Professor; kravec\_as@mail.ru

Taras V. BOGACHEV — PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor;

bogachev73@yandex.ru