

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТЕЙНЕРООБОРОТА МОРСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА ГРАВИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ**

*Морские транспортные системы являются основной и лидирующей формой в системе транспортировки товаров. При решении прогнозных задач в работе морской транспортной системы необходимо использовать моделирование, в частности — имитационное. Существуют различные методы моделирования грузопотоков, среди которых в данной статье предлагается применение гравитационной модели с расчетом матриц корреспонденций применительно для перевозки контейнеров. Правильность выбора данной методики обуславливается большим количеством исходных данных, которые детально описывают морскую транспортную систему, и возможностью расширения данной методики. Под расширением понимается возможность размещения схем «сухих портов» грузовых и контейнерных терминалов и включения других контейнерных линий, которые работают на данном участке. Методика позволяет определять наиболее загруженные элементы транспортной системы. Несмотря на это предлагаемая методика подразумевает расчет большого числа матриц корреспонденций контейнеров между портами, что выполнить вручную достаточно сложно, поэтому дополнительно приводится разработанный программный инструментарий. Рассматривается пример моделирования и реализации морской транспортной системы на примере работы контейнерной линии компании APL с включением терминалов, которые вовлечены в процесс доставки контейнеров по суше.*

*Ключевые слова: морская контейнерная линия, морская транспортная система, моделирование, гравитационная модель, модель расчета матриц корреспонденции, расписание движения судов.*

### **Введение**

Морской транспорт на сегодня остается главной артерией международного товарооборота, обеспечивая перевозки более 90 % физического объема мировой товарной торговли. Это делает его важным инструментом товарообмена (контейнерооборота) между отдельными регионами, создания и организации единого экономического пространства. Наблюдается постоянный рост количества контейнерных судов, используемых для перевозки грузов. Это приводит к тому, что на достаточно длинных маршрутах контейнерных перевозок оправданным оказывается использование только крупных судов.

На сегодняшний момент созданы информационные системы, которые предоставляют большое количество логистической статистической информации (числовые характеристики контейнерооборота) как по работе отдельных портов, так и по конкретному судну или контейнерной линии [1], [2]. Несмотря на это при работе морских контейнерных линий возникает определенное количество задач, которые можно решить только с помощью моделирования. Особенно это актуально при решении задач прогнозирования. Работа морской контейнерной линии представляет собой сложную систему, жизнедеятельность которой, определяется как достаточно четким расписанием, так и случайными факторами (нарушение расписания прибытия судов — опоздание в рамках временного окна, ухудшение погодных условий, поломка судна). Объемы перевозимых контейнеров на судах образуют грузовой контейнерооборот. Задача создания имитационной модели [3] — [6], позволяющей спрогнозировать контейнерооборот при включении, к примеру, новых портов, принимая во внимание весь набор специфических условий, необходимых для выполнения отдельных операций с морской линией, является актуальной.

Задачами исследования является обоснование правильности выбранной математической модели, описывающей инфраструктуру морской транспортной сети, разработка алгоритма построения и представление разработанного программного инструментария, позволяющего пользователю прогнозировать контейнерооборот в транспортной сети.

### Морская транспортная сеть

Морская транспортная сеть [6] сама по себе является физическим набором связей между серией узлов, по которым происходит движение грузов в контейнерах. Морская транспортная сеть характеризуется определенным набором инструментов управления движением потоков в сети, которая состоит из набора портов, связанных маршрутами морских транспортных судов. Рассмотрим схему морской транспортной системы в виде сетевой структуры системы, отражающей отношение от многих ко многим (рис. 1).

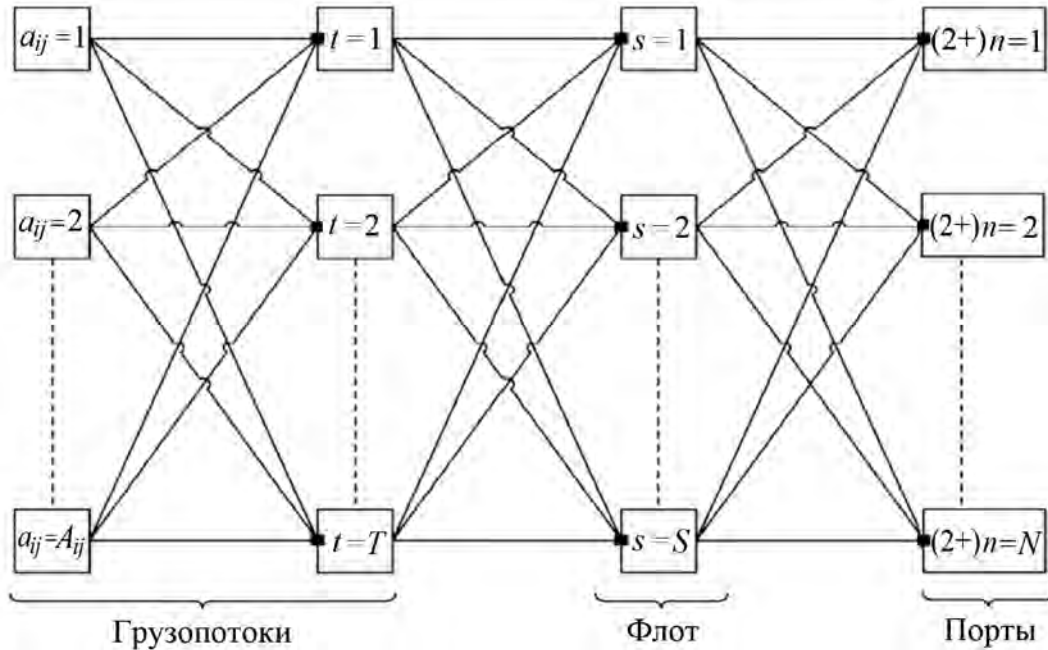


Рис. 1. Схема морской транспортной системы:

$t$  — род груза для отправки;  $t = 1, 2, \dots, T$ ;  $s$  — тип судна для перевозки;  $s = 1, 2, \dots, S$ ;  
 $n$  — порт определенных технологических, географических и др. характеристик, используемый в процессе перевозки;  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  
 $a_{ij}$  — необходимый маршрут движения грузопотока  $a$  из порта отправки  $i$  в порт назначения  $j$ ,  $a_{ij} = 1, 2, \dots, A_{ij}$ ;  $A_{ij} = (N - Nh)/2$ , где  $Nh$  — совокупное количество портов, используемых исключительно для перевалки

Данная схема построена исходя из предположения о том, что выделяются три главных звена процесса перевозки грузов морем:

- 1) предоставление груза к перевозке;
- 2) погрузка грузов на судно, разгрузка грузов с судна в порту;
- 3) перевозка грузов морем на судне.

Целевая функция транспортной сети, или обобщенный план работы транспортно-логистической системы может быть получен из решения задачи

$$\sum_{a_{ij}=1}^{A_{ij}} \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{n=1}^N CQ \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $C$  — стоимость перевозки единицы груза  $t$  из пункта  $i$  в пункт  $j$ , перевозимого на судне  $s$  с использованием нескольких портов  $n$ ;  $Q$  — объем перевозок груза  $t$  из пункта  $i$  в пункт  $j$  на судне  $s$  с использованием нескольких портов  $n$ .

Грузопотоки, флот, порты выделены как главные направляющие процесса перевозки груза морем [7] — [9]. Оптимальное соотношение всевозможных качественных характеристик этих трех элементов дает нам оптимальность всей системы. Пример морской транспортной сети компании APL [10] приведен на рис. 2.



Рис. 2. Пример работы контейнерной линии компании APL [10]

Грузооборот в контейнерах в морской транспортной сети может быть описан с помощью следующих методов:

- аналитическим методом;
- аппаратом теории ориентированных графов [5], [6];
- аппаратом матриц корреспонденции;
- имитационным моделированием с использованием методики «следования за лидером».

Применение данного метода детально приведено в [2], [12].

Главным недостатком применяемых аналитических методов является то, что они позволяют в качестве исходных параметров учитывать лишь основные вероятностные распределения, а результирующими данными являются только средние величины показателей. Однако морская контейнерная линия является сложной системой, характеристики которой адекватно не могут быть описаны только вероятностными распределениями. Например, прибытие судов не является случайной величиной в широких временных рамках порядка недели, а определяется достаточно чётким расписанием. Кроме того, случайные факторы, такие как отказ оборудования, локальное нарушение расписания прибытия судов (опоздание в рамках временного окна), ухудшение погодных условий и др., не могут быть учтены при аналитическом расчёте. Но их можно учитывать при использовании имитационного моделирования.

### Описание математической модели

Исходными данными для моделирования являются данные о перемещении контейнеров по транспортной сети, т. е. количестве передвижений судов между портами, а также данные на основе географического расположения о размещении портов, порождающих передвижения контейнеров по сети (портов доставки грузов). Для прогноза структуры перевозки контейнеров производится расчет матриц корреспонденций между расчетными портами, соответствующих передвижениям разного типа судов с целью доставки груза в соответствии с расписанием движения судов. Если матрица корреспонденции построена, то на ее основе можно:

- составить скорректированное расписание движения судов;
- определить главные контейнерообразующие пункты;
- оценить интенсивность перевозок контейнеров между различными портами;
- оценить количество перевозимых контейнеров.

При данном подходе принимается, что любой контейнер, требующий перевозки, имеет точку доставки, т. е. некоторую целевую функцию. Множество таких контейнеров образует множество целевых функций, которые можно описать с помощью матриц корреспонденции.

Процесс образования потоков контейнеров обусловлен потребностями по перевозке грузов, поэтому исходными данными для задачи прогноза потоков являются распределение портов на основе географического расположения, а также движение судов, т. е. их работа на маршруте за определенное время. Цели передвижений объединены в несколько групп (доставка контейнера в порт  $A$ , доставка контейнера в порт  $A_i$ , порожний пробег). Подвижность морской транспортной системы можно представить матрицей межцелевых передвижений контейнеров между портами (рис. 3).

	Порт	Порт 1	Порт 2	Порт $N$
Порт	0	$g_{01}$	$g_{02}$	$g_{0k}$
Порт 1	$g_{10}$	$g_{11}$	$g_{12}$	$g_{1k}$
Порт 2	$g_{20}$	$g_{21}$	$g_{22}$	$g_{2k}$
Порт $N$	$g_{n0}$	$g_{n1}$	$g_{n2}$	$g_{nk}$

Рис. 3. Матрица межцелевых перемещений контейнеров между портами

В данной матрице принимается, что передвижение в «порт 1 ... порт  $N$ » — это передвижение к месту доставки контейнера. Элементы матрицы должны удовлетворять условию

$$\forall k \sum_l g_{kl} = \sum_l g_{lk}. \quad (2)$$

Расчет матрицы корреспонденций проводится по гравитационной модели [2], [11]. В настоящее время для расчета корреспонденций вместо гравитационных моделей используются энтропийные, а гравитационная модель может быть использована только для задач, в которых имеет место дискретная структура. Гравитационная модель разработана по аналогии с ньютоновским законом, который описывает силу притяжения  $F_{ij}$  между двумя массами  $m_i$  и  $m_j$ , расположенными друг от друга на расстоянии  $d_{ij}$ ,

$$F_{ij} = c \frac{m_i m_j}{d_{ij}^2}, \quad (3)$$

где  $c$  — некоторая константа.

Аналогично закону Ньютона, транспортная гравитационная модель описывает интенсивность потока контейнеров  $T_{ij}$  между полным количеством отправок из  $i$ -й зоны (порта)  $Q_i$  (отправляющихся из зоны  $i$ ) и прибытий в  $j$  зону  $D_j$  (прибывающих в порт  $j$ ) и затраты на передвижение между зонами  $i$  и  $j$  в форме  $c_{ij}$ .

$$T_{ij} = k \frac{Q_i D_j}{c_{ij}^2}, \quad (4)$$

где  $\sum_i T_{ij} = D_j$ ;  $\sum_j T_{ij} = Q_i$ ;  $T_{ij} \geq 0$ . (5)

Уравнение (4) означает, что суммарный поток судов из порта  $i$  в порт  $j$  должен быть равен потоку, который прибыл в порт  $j$ . Условия (5) означают, что суммарный поток, который вышел обратно из всех зон  $j$  в зону  $i$ , должен совпадать с числом прибывших в зону  $i$ . Суммарное количество покинувших порт судов должно быть равно суммарному количеству прибывших, т. е. должно обязательно выполняться условие

$$\sum_i T_i = \sum_j D_j. \quad (6)$$

При моделировании грузооборот  $T_{ij}$  между известными векторами отправлений из портов  $Q_i$  и прибытия в порты  $D_j$  можно рассчитать по формуле

$$T_{ij} = A_i B_j Q_i D_j f(c_{ij}), \quad (7)$$

где 
$$A_i = \left[ \sum_j B_j D_j f(c_{ij}) \right]^{-1}; \quad B_j = \left[ \sum_i A_i Q_i f(c_{ij}) \right]^{-1}, \quad (8)$$

где  $f(c_{ij})$  — функция, которая зависит от стоимости перевозки контейнеров. В качестве  $f(c_{ij})$  можно использовать среднее время передвижения  $t_{ij}$ , которое считается заданным при среднем времени доставки. Среднее время передвижения судов между портами является более или менее стабильным показателем морской транспортной системы, и данная величина может быть спрогнозирована.

### Условия реализации программного инструментария для моделирования контейнерооборота

Для построения специализированного программного обеспечения для моделирования необходимы следующие входные данные:

- количество портов, в которые планируется доставка контейнеров определенных объемов;
- количество порожних контейнеров, которые доставляются в данные порты при обратном движении;
- количество контейнеров, которые ожидают погрузки в заданном порту;
- средняя стоимость перевозки контейнеров;
- данные реальной геоинформационной системы, на которой присутствуют заданные порты;
- количество судов, работающих на контейнерной линии;
- среднее время движения судна на линии (данной время для моделирования было взято из дискретного расписания заходов судна в порт).

Стоит учесть, что в программе необходимо внести возможность внесения данных других морских контейнерных линий, которые работают в данных портах и могут также использоваться при перевозке контейнеров. При расчете матрицы корреспонденций доставки контейнеров за среднее время принимает время, равное пути из порта в сегменте отправления в порт в сегмент прибытия. Данная модель может быть применена для моделирования контейнерооборота между «сухими портами» и контейнерными терминалами.

Реализации морских и сухопутных участков транспортной системы приведена на рис. 4. В узловых точках пользователь вводит как количество контейнеров для перевозки, так и количество порожних контейнеров, которые придут в заданный порт.

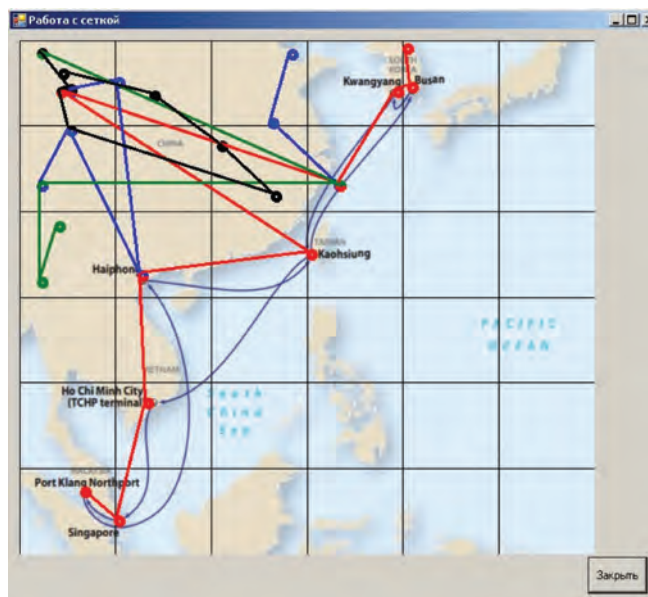


Рис. 4. Оконная форма морской транспортной системы на примере контейнерной линии APL и внесение системы грузовых терминалов и «сухих портов», включенных в систему доставки контейнеров

### Заключение

Проведенное исследование направлено на обоснование возможности применения гравиационной модели и аппарата расчета корреспонденций для разработки имитационной модели контейнерооборота в морской транспортной системе. Используемая методика открывает новые возможности по решению группы прогнозных задач — таких как определение оптимального количества судов, определение наиболее загруженного порта на линии, количество перевозимых контейнеров и время доставки. Это достигается благодаря возможности внесения в программу схемы портов (геоинформационных данных), количества контейнеров, требующих перевозки между портами, количества порожних контейнеров и различных задержек в работе контейнерной линии. В качестве исходных данных был выбран набор портов и работа контейнерной линии компании *APL*, но можно также использовать любую другую контейнерную линию. Необходимо отметить, что созданное программное средство может быть использовано для моделирования грузооборота между «сухими портами» и контейнерными терминалами.

В статье предлагается возможность реализации такого подхода как «расчет матриц корреспонденции» для определения контейнерооборота. Авторы расширяют возможность применения данного метода для реализации различных задач моделирования в транспортной отрасли. В результате экспериментирования с добавлением новых судов на линии, внесения динамических данных по количествам контейнеров, требующих перевозки, в зависимости от грузопотока получают числовые характеристики загруженности линии, прогнозируются объемы перевозок.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Майоров Н. Н.* Практические задачи моделирования транспортных систем / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2012. — 185 с.
2. *Майоров Н. Н.* Моделирование транспортных процессов / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2011. — 165 с.
3. *Майоров Н. Н.* Имитационное моделирование как метод оптимизации сложной технической системы / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов, В. Е. Таратун // Системный анализ и логистика. — 2013. — № 10. — С. 63–69.
4. *Фетисов В. А.* Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В. А. Фетисов, Н. Н. Майоров // Эксплуатация морского транспорта. — 2012. — № 3. — С. 3–7.
5. *Fetisov V. A.* System Approach to the Simulation of Transport Infrastructure of Container Terminals / V. A. Fetisov, N. N. Maiorov // Our Sea, International Journal of Maritime Science & Technology. — 2015. — № 5–6. — Pp. 102–105.
6. Введение в транспортную логистику / А. В. Кириченко, А. Л. Кузнецов, О. А. Ражев [и др.]. — СПб.: Изд-во ГУАП, 2011. ¾ 228 с.
7. Global Logistics and Supply Chain Management, second edition / J. Mangan, Ch. Lalwani, T. Butcher, R. Javadpour. — USA: John Wiley & Sons, 2011. ¾ 446 p.
8. *Song D.-W.* Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management / D.-W. Song, Ph. M. Panayides. — London: Kogan Page, 2012. — 344 p.
9. *Rodrigue J. P.* The Geography of Transport Systems, third edition / J. P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack. — London: Routledge, 2013. — 432 p.
10. Расписание судозаходов фидерных линий в порт Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://baltcomp.spb.ru/public/files/shedule/sched\\_apl.pdf](http://baltcomp.spb.ru/public/files/shedule/sched_apl.pdf), [http://aplinfo.apl.com/services/documents/sells\\_mkt\\_ia\\_nsl.pdf](http://aplinfo.apl.com/services/documents/sells_mkt_ia_nsl.pdf) (дата обращения: 24.06.2015).

11. Каукин А. С. Анализ издержек перемещения товаров при моделировании внешнеторговых потоков / А. С. Каукин, Г. И. Идрисов // Российское предпринимательство. — 2013. — № 12 (234). — С. 23–31.
12. Свидетельство № 19958 / Алгоритм реализации имитационной модели работы морской контейнерной линии / Н. Н. Майоров, В. А. Фетисов. ¾ Свидетельство о регистрации электронного ресурса в объединенном фонде электронных ресурсов «Наука и образование» Государственной Академии Наук. № 19958, 2014. — 6 с.

## MODELING OF MARINE CONTAINER TRANSPORT SYSTEM ON THE BASIS OF THE MATHEMATICAL APPARATUS OF THE GRAVITY MODEL

*The Maritime transport system are the main and leading form in the system of transporting goods. When solving predictive problems in Maritime transport system it is necessary to use simulation, particularly simulation. There are various methods of modeling the flows of goods among which this article proposes the application of gravity models with calculation of matrix correspondence in relation to the transport of containers. The correct choice of this methodology is due to a large number of initial data that describe in detail the marine transportation system and the possibility of expansion of this technique. Under the extension refers to the ability to host the schemes 'dry ports' cargo and container terminals and other container lines that work on this site. The method allows to determine the most loaded elements of the transport system. Despite this the proposed method involves the calculation of a large number of matrix correspondence of containers between ports that manually is quite difficult therefore the article presents the developed instrument. The article provides an example implementation of the Maritime transportation system on the example of container line APL c switching terminals are involved in the process of shipping containers.*

*Key words: sea container line, sea transport, modeling, gravity model, the model of calculation of matrix correspondence, vessel schedules.*

### REFERENCES

1. Majorov, N. N., and V. A. Fetisov. *Prakticheskie zadachi modelirovaniya transportnyh system*. SPb.: GUAP, 2012.
2. Majorov, N. N., and V. A. Fetisov. *Modelirovanie transportnyh processov*. SPb.: GUAP, 2011.
3. Majorov, N. N., V. A. Fetisov, and V. E. Taratun. "Imitacionnoe modelirovanie kak metod optimizacii slozhnoj tehnicheckoj sistemy." *Sistemnyj analiz i logistika* 10 (2013): 63-69.
4. Fetisov, V. A., and N. N. Majorov. "Research and realization of an optimum variant of work of port logistical system, using imitating models of systems of mass service." *Jekspluatacija morskogo transporta* 3 (2012): 3–7.
5. Fetisov, V. A., and N. N. Maiorov. "System Approach to the Simulation of Transport Infrastructure of Container Terminals." *Our Sea, International Journal of Maritime Science & Technology* 5-6 (2015): 102–105.
6. Kirichenko, A. V., A. L. Kuznecov, O. A. Razhev, et al. *Vvedenie v transportnuju logistiku*. SPb.: GUAP, 2011.
7. Mangan, J., Ch. Lalwani, T. Butcher, and R. Javadpour. *Global Logistics and Supply Chain Management, second edition*. John Wiley & Sons, 2011.
8. Song, D.-W., and Ph. M. Panayides. *Maritime Logistics: A Complete Guide to Effective Shipping and Port Management*. Kogan Page, 2012.
9. Rodrigue, J. P., C. Comtois, and B. Slack. *The Geography of Transport Systems, third edition*. Routledge, 2013.
10. Raspisanie sudozahodov fidernyh linij v port Sankt-Peterburg. Web. 24 June 2015 <[http://baltcomp.spb.ru/public/files/shedule/sched\\_apl.pdf](http://baltcomp.spb.ru/public/files/shedule/sched_apl.pdf)>, <[http://aplinfo.apl.com/services/documents/sells\\_mkt\\_ia\\_ns1.pdf](http://aplinfo.apl.com/services/documents/sells_mkt_ia_ns1.pdf)>.
11. Kaukin, Andrey S. and Georgiy I. Idrisov. "Analysis of Expenses of Goods Transfer in Modeling of Trade Flows." *Russian Journal of Entrepreneurship* 12(234) (2013): 23-31.
12. Majorov, N.N., and V.A. Fetisov. Algoritm realizacii imitacionnoj modeli raboty morskoy kontejnernoj linii. Svidetelstvo o registracii jelektronnogo resursa v obedinennom fonde jelektronnyh resursov "Nauka i obrazovanie" Gosudarstvennoj Akademii Nauk. № 19958. 2014.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

*Майоров Николай Николаевич* – кандидат технических наук, доцент. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» *sciencesuai@yandex.ru*

*Кириченко Александр Викторович* – доктор технических наук, профессор. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова» *KirichenkoAV@gumrf.ru*

*Фетисов Владимир Андреевич* – доктор технических наук, профессор. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» *Fet1@aanet.ru*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

*Majorov Nikolaj Nikolaevich* – Candidate of Engineering, associate professor. Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation *sciencesuai@yandex.ru*

*Kirichenko Aleksandr Viktorovich* – Doctor of Engineering, professor. Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping *KirichenkoAV@gumrf.ru*

*Fetisov Vladimir Andreevich* – Doctor of Engineering, professor. Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation *Fet1@aanet.ru*

**УДК 656.1**

**А. Л. Кузнецов,  
С. С. Павленко,  
В. Н. Щербакова-Слюсаренко**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТЕЙ КОНТЕЙНЕРНОГО ГРУЗОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

*Статья посвящена вопросам генезиса, эволюции и моделирования сетей контейнерного распределения. Подробно рассмотрены основные причины и факторы, вызывающие к жизни процессы формирования сетей и систем контейнерного грузораспределения — от развития первичных связей между грузополучателями и портами, до появления полноценных круговых отправок грузов маршрутными партиями через сухопутные центры контейнерного грузораспределения. Целью проведенной работы является определение зависимости суммарных конечных затрат грузоотправителей при организации отправок в различных сетях грузораспределения от периодичности и географии отправок. Достижение данной цели возможно с использованием имитационного моделирования. Приведено описание имитационной модели сетей контейнерного грузораспределения, проведен анализ практических результатов моделирования, а также сделаны выводы о возможностях применения видов сетей контейнерного грузораспределения, исходя из различных рыночных условий с учетом варьирования периодичности и географии отправок.*

*Ключевые слова:* логистика добавленной стоимости, контейнеры, логистика, контейнерные перевозки, центры грузораспределения, имитационное моделирование.

**Эволюция сетей контейнерного грузораспределения**

С последней четверти XX в. облик морской транспортной индустрии претерпел значительные изменения. Начальный период развития системы контейнерного грузораспределения в большинстве стран предполагал растарку и затарку контейнеров на территории порта, как показано на рис. 1, без их выпуска в тыловые территории [1], [2]. Грузы выгружались из контейнера и покидали порт в виде генерального груза. Какая-то часть контейнеров загружалась в порту обратным грузом, также прибывающим в порт в виде брейк-балка.