

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335

## MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE SEA PORTS THROUGHPUT ASSESSMENT

**A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, R. V. Kuznetsov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The sea transportation system, which in turn forms the basis of the global trade system, has been developing during the whole history of human civilization. The abrupt leaps in this steady development were caused both by the changes of technological paradigms (e. g. by the shift from sail to steam, appearance of steel framing and hull shells, containerization, digitalization etc.) and social reasons (abandon of the acceptable losses strategy after world wars, end of cold war, relaxation of the international tension and war conflicts etc.). Unfortunately, the social factors can not only push forward the development, but also have destructive character, manifesting themselves as crises of different scales and natures. The complexity and the scope of the global transportation system that has developed by the XXI century have already shown the tendency to kaleidoscopic changing of its states under small shocks. In full scale this sensitivity has developed after COVID-19 and Ukraine affairs. It seems unreal to expect not only quick revival of the collapsed world system of sea and land transportation, but even preservation of its structure. Consequently, the key elements of the transport infrastructure, i. e. sea port, found themselves in a very serious situation. Major ports have faced a problem of cargo flows deterioration and relevant redundancy of their capacity; minor ports have discovered the opposite problem, namely, the residual cargo flows squeezed on the periphery of business areal turned out to be too large for the existing facilities and resources. In both cases the changes in external commercial environment and relevant route patterns set for the ports a task of finding a new balance between potential cargo flows and existing resources. A decision of this problem by the methods of mixed integer linear programming is described in the paper.*

*Keywords: seaports, throughput, linear programming, multiobjective optimization.*

**For citation:**

Kuznetsov, Aleksandr L., Aleksandr V. Kirichenko, and Roman V. Kuznetsov. "Mathematical description of the sea ports throughput assessment." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.

**УДК656.615**

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ АНАЛИЗА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ МОРСКИХ ПОРТОВ

**А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Р. В. Кузнецов**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В работе исследована система морской транспортировки грузов, являющаяся элементом инфраструктуры мировой глобальной системы торговли. Отмечается, что резкие скачки ее развития обусловлены как сменой технологической системы (перехода от паруса на пар, появление стального набора и корпуса, контейнеризация, внедрение цифровизации и др.), так и социальными условиями (например, отказ от вместимости, ограниченной «риском приемлемых потерь» после мировых войн, прекращение «холодной войны», снижение напряженности локальных конфликтов и т. д.). При этом социальные факторы могут не только играть положительную роль в развитии, но и носить деструктивный характер, проявляясь в форме кризисов разной природы и масштаба. Сложность и масштаб сформировавшейся к XXI в. глобальной системы*

показали ее склонность к «калейдоскопическим эффектам» при различного рода потрясениях, причем в полной мере эта чувствительность проявилась после пандемии и событий на Украине. Представляется нереальным ожидать не только быстрого восстановления рухнувшей мировой системы морских и наземных перевозок, но даже сохранения ее структуры. Подчеркивается, что в очень сложном положении оказались ключевые элементы указанной инфраструктуры — морские порты. Отмечается, что порты столкнулись с проблемой потери грузопотоков и возникшего избытка мощностей, малые порты испытывают иные сложности: «выдавленные» на периферию бизнеса остаточные грузопотоки оказались слишком велики для имеющихся ресурсов. В обоих случаях изменение внешней коммерческой среды и маршрутов грузопотоков ставит перед портами задачу нахождения нового баланса между потенциальными грузопотоками и имеющимися ресурсами. В данном исследовании предлагается возможное решение указанной задачи на основе методов смешанного целочисленного линейного программирования.

*Ключевые слова:* морские порты, пропускная способность, линейное программирование, многокритериальная оптимизация.

**Для цитирования:**

Кузнецов А. Л. Математическое описание задачи анализа пропускной способности морских портов / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, Р. В. Кузнецов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 327–335. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-327-335.

### Введение (Introduction)

Современные морские порты генеральных грузов, морские и тыловые контейнерные терминалы, логистические центры распределения и иные подобные объекты образуют комплексную инфраструктуру глобальной транспортно-технологической сети. Для эффективного и бесстыкового функционирования сети пропускная способность этих элементов обычно проектируется с определенным запасом, определяемым финансовыми возможностями их операторов и положением терминалов в иерархической суперструктуре. Как следствие, каждый терминал практически всегда имеет резерв пропускной способности, который может быть использован для перевалки альтернативных грузов. В интегрированных цепях поставок этот потенциал обычно остается нереализованным, поскольку системная оптимизация обычно предполагает потери экономической эффективности отдельных звеньев в пользу качества и эффективности общего функционирования. При планировании работы терминала в качестве обособленного центра формирования прибыли, а также в период кризисов задача привлечения грузопотоков формулируется уже не в терминах их альтернативности, а в терминах их максимальной прибыльности.

Как правило, через указанные ранее объекты комплексной инфраструктуры глобальной транспортно-технологической сети проходят грузопотоки разной природы, образуя так называемую *структуру общего грузопотока*. Для морского порта это могут быть навалочные, генеральные и контейнерные грузы, для контейнерного терминала — груженые и порожние контейнеры, импортные и экспортные, универсальные и специальные, растариваемые и затариваемые тарно-штучные грузы и др. Каждый из этих отдельных грузопотоков проходит обработку по своему собственному технологическому маршруту, при помощи установленной последовательности операционных звеньев и задействованного в них оборудования. Технологические фронты, здания и сооружения, подъемно-транспортное оборудование, персонал — все это составляет понятие *технологических ресурсов, необходимых для выполнения операций обработки грузопотока*. Каждый ресурс в процессе своего использования связан с определенной себестоимостью, формирующей совокупные затраты на обработку, а обработка каждого грузопотока связана с известными (определяемыми рынком) тарифами, применение которых формирует доход от операций.

В содержательной постановке в данном исследовании задача формулируется следующим образом: имеется определенное множество обязательных к обработке возможных грузопотоков, а также определенное количество разнородных технологических ресурсов, требуется найти оптимальную структуру проектного грузопотока. В данном исследовании показано, что эта задача является сложной, комплексной и многокритериальной, вследствие чего в разных постановках для ее решения необходимо применять различные математические и эвристические методы. Современные

научные разработки в данной области базируются на возросших возможностях вычислительной техники и ставшей доступной статистики, что позволяет применять достаточно сложные математические методы, а расчеты значительной части рассмотренных работ имеют долгосрочный, прогнозный и вследствие этого оценочный характер.

Поводом для проведения недавних исследований в основном явилась потребность в оценке портовых мощностей в условиях «ковидного» и «постковидного» периодов [1], [2], применении инновационных технологий [3], методов управления [4]–[6], а также в оценке масштабных макроэкономических проектов [7]–[11]. Данные исследования носят выраженный региональный характер [1]–[9], [11]. В качестве методического аппарата используется достаточно своеобразный спектр методов, опирающихся на обработку обширных баз статистических данных. В работах [1], [4] внимание уделено динамическому взаимодействию между морскими портами и соответствующей стратегии принятия решений для операционной деятельности морского порта с использованием четырехмерной фракционной модели конкуренции Лотки – Вольтерра в условиях временной неопределенности.

Для описания динамики сотрудничества и конкуренции между взаимодействующими портами применены методы нелинейного анализа, включая анализ равновесия, оценку стабильности и исследование временных рядов. В работе [4] нелинейное динамическое поведение участников транспортного рынка изучается с использованием анализа бифуркаций и временных рядов. На основе динамического анализа реализовано адаптивное управление скользящим режимом дробного порядка с помощью алгоритма искусственной нейронной сети. Необходимо отметить, что указанный подход, опирающийся на модель Лотки – Вольтерра и анализ аттракторов, был применен ранее авторами данной статьи [12] с положительными результатами. В работе [7] оценка технологической эффективности контейнерных портов выборки выполнена с помощью анализа окна DEA (Data Envelopment Analysis). Затем полученные показатели эффективности были введены в качестве объясняющих переменных в алгоритм анализа основных компонентов PCA (Principal Component Analysis).

В работе [5] исследована роль «умного порта» в обеспечении эффективности цепочек поставок (порт пятого поколения (5G)), рассмотрена концептуальная модель, призванная объяснить взаимосвязь между внедрением технологий «Индустрии 4.0» и эволюцией бизнес-моделей морских портов. В исследовании [6] интегрирован стохастический многокритериальный анализ приемлемости с моделью порядка  $\alpha$  для обработки случаев несовершенных знаний (авторегрессионная модель временных рядов, в которой значения временного ряда в данный момент линейно зависят от предыдущих значений этого же ряда). Результаты показали, что ни одна из тринадцати примененных авторами объясняющих переменных (ни внешних, ни показателей эффективности) не имеет значимой связи с технологической эффективностью морских портов. В работе [9] применен способ оценки динамической системы обобщенного метода моментов GMM (Generalized Method of Moments), учитывающий потенциальную эндогенность регрессоров. Обобщенный метод моментов обычно применяется в математической статистике и эконометрике для оценки неизвестных параметров распределений и эконометрических моделей, является обобщением классического метода моментов. Метод был предложен Хансенom в 1982 г. Результаты данного исследования показывают, что рост пропускной способности морского порта улучшает региональный торговый баланс в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

Сформированный подход авторов настоящей статьи основан на применении методов имитационного моделирования [13], [14], однако представляется, что для решения вопросов оперативного управления целесообразно применение более «быстрых» расчетных методов, позволяющих получать рациональные решения.

### **Методы и материалы (Methods and Materials)**

*Однородный грузопоток и неограниченные однородные ресурсы.* Пусть имеется некоторый грузопоток  $q$ , для обработки которого в неограниченном количестве предоставлено оборудование

$e$  производительностью  $p$ . Очевидно, что количество оборудования, необходимого для обработки заданного грузопотока, определяется выражением  $N = \frac{q}{p}$ .

*Однородный грузопоток и ограниченные однородные ресурсы.* Если имеется ограниченное количество оборудования  $N^0$  производительностью  $p$ , то с его помощью может быть обработан грузопоток, ограниченный по величине значением  $q_0 = pN^0$ . Для обработки грузопотока  $q < q_0$  необходимо иметь лишь  $N' = \frac{q}{p} < N^0$  единиц оборудования, а  $N^0 - N'$  единиц останутся неиспользованными. Этот и рассмотренный ранее случаи образуют прямую и обратную расчетные задачи: в прямой постановке требуется определить ресурсы, необходимые для обработки проектного грузопотока, в обратной — какой грузопоток можно обеспечить имеющимися ресурсами.

*Смешанный грузопоток и неограниченные неоднородные ресурсы.* Грузопоток  $Q$  любого терминала (порта, склада, логистического центра) в общем случае является неоднородным и формируется из отдельных частных компонент  $q_k$ , т. е.

$$Q = \sum_{k=1}^K q_k. \quad (1)$$

Каждая компонента грузопотока  $q_k$  проходит через терминал отдельным операционным маршрутом, требуя для обработки свой конкретный набор технологического оборудования из имеющегося на терминале множества

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m, \dots, e_M\}. \quad (2)$$

Если производительность оборудования  $e_m$  при выполнении операции обслуживания грузопотока  $q_k$  известна и составляет величину  $P_m^k$ , то требуемое количество оборудования для выполнения этой операции рассчитывается в виде

$$N_m^k = \frac{q_k}{P_m^k}. \quad (3)$$

Отсюда общее количество оборудования типа  $e_m \in E$  определяется как сумма по всем операциям:

$$N_m = \sum_{k=1}^K N_m^k. \quad (4)$$

При наличии заданного грузопотока  $Q = \sum_{k=1}^K q_k$  и неограниченного ресурса оборудования  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m, \dots, e_M\}$  выведенное соотношение позволяет оценить общий парк оборудования каждого типа, необходимый для освоения заданного грузопотока.

*Однородный грузопоток и ограниченные неоднородные ресурсы.* Рассмотрим однородный грузопоток

$$Q = \sum_{k=1}^1 q_k = q_1 = q. \quad (5)$$

Этот грузопоток сводится к единственному частному операционному потоку  $q$ , для обработки которого потребуется  $N_m = \frac{q}{P_m^k}$  единиц оборудования каждого типа. Пусть теперь каждый тип оборудования  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m, \dots, e_M\}$  имеется в ограниченном количестве  $\{N_1^0, N_2^0, \dots, N_m^0, \dots, N_M^0\}$ .

Если оборудование каждого типа имеется в достаточном количестве, т. е.  $N_m \leq N_m^0$ , то заданный грузопоток может быть обработан терминалом. Если для некоторого типа оборудования  $e_{m_0}$  это соотношение не будет выполняться, то предельный объем рассматриваемого однородного грузопотока составит величину  $q_0 = P_{m_0}^k N_{m_0}^0$ . В этом случае для его обработки потребуется  $N'_m = \frac{q_0}{P_m^k}$  единиц оборудования каждого типа. Отсюда  $N_m^0 - N'_m$  единиц оборудования каждого типа ( $m \neq m_0$ ) будет избыточным.

*Смешанный грузопоток и ограниченные неоднородные ресурсы.* Рассмотрим теперь смешанный грузопоток  $Q = \sum_{k=1}^K q_k$  при ограниченном количестве оборудования:

$$\{N_1^0, N_2^0, \dots, N_m^0, \dots, N_M^0\}. \quad (6)$$

Поскольку производительность оборудования типа  $e_m$  при выполнении операции обслуживания частного грузопотока  $q_k$  различна, его нехватка будет по-разному проявляться в каждом из этих грузопотоков. В одном случае можно относительно равномерно распределить имеющееся оборудование между всеми компонентами, в другом — максимально обеспечить требуемыми ресурсами приоритетные направления, оставив за дополнительными грузопотоками потоками получение ресурсов по остаточному принципу. Как следствие, задача становится многовариантной и зависимой от системы расстановки приоритетов. Очевидно, что при ограниченных ресурсах, заданных объемом и структурой компонент, грузопоток в большинстве случаев не может быть обработан.

Обратная задача, а именно, какой смешанный грузопоток может быть обработан имеющимся количеством оборудования  $\{N_1^0, N_2^0, \dots, N_m^0, \dots, N_M^0\}$  также не имеет решения, поскольку разные приоритеты компонент будут давать различные варианты решений. Если целевой функцией выбирается максимальная доходность совокупных операций, тарифы на отдельные компоненты грузопотока  $c_k$  и себестоимость использования ресурса  $s$  известны, то рассматриваемая проблема сводится к задаче линейного программирования

*Постановка задачи: нахождение грузопотока как задача ЛП.* Рассмотрим неоднородный грузопоток  $Q$ , который состоит из отдельных частных компонент  $q_k$ :

$$Q = \sum_{k=1}^K q_k. \quad (7)$$

Каждая компонента грузопотока  $q_k$  требует для обработки конкретный набор технологического оборудования:

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_m, \dots, e_M\}. \quad (8)$$

Каждый тип оборудования  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m, \dots, e_M\}$  имеется в ограниченном количестве:

$$\{N_1^0, N_2^0, \dots, N_m^0, \dots, N_M^0\}. \quad (9)$$

Пусть известна производительность  $P_m^k$  оборудования  $e_m$  в процессе обслуживания грузопотока  $q_k$ . Тогда его требуемое количество запишется в виде

$$N_m^k = \frac{q_k}{P_m^k}. \quad (10)$$

Кроме того, известны тарифы на отдельные компоненты грузопотока  $c_k$  и себестоимость единицы ресурса каждого тип  $s_m$ . Соответствующая задача линейного программирования в этом случае формулируется в виде

$$\sum_{k=1}^K (c_k q_k - \sum_{m=1}^M s_m \frac{q_k}{P_m^k}) \rightarrow \max \quad (11)$$

или

$$q_k \left( \sum_{k=1}^K q_k (c_k - \sum_{m=1}^M \frac{s_m}{P_m^k}) \right) \rightarrow \max \quad (12)$$

при следующих ограничениях на имеющиеся ресурсы:

$$\{N_1 \leq N_1^0, N_2 \leq N_2^0, \dots, N_m \leq N_m^0, \dots, N_M \leq N_M^0\}. \quad (13)$$

Кроме того, каждая компонента грузопотока может требовать определенного обязательного объема обработки

$$\{q_1 \geq q_1^0, q_2 \geq q_2^0, \dots, q_k \geq q_m^0, \dots, q_k \geq q_k^0\}. \quad (14)$$

Таким образом, появляется возможность различных постановок задачи с решением, содержащим элементы анализа влияния каждой компоненты на исследуемый процесс.

### Результаты (Results)

Пусть, например, располагают ресурсами, характеризваемыми значениями, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

#### Исходные данные и результаты решения для целевой функции (11)

Тариф на компоненты			Производительность ресурсов				Ограничения	Объем
			$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$		
Груз 1	$q_1$	1500	2500	2500	2500	2500	100	4852
Груз 2	$q_2$	1300	3000	3000	3000	2500	100	4265
Груз 3	$q_3$	1000	0	1300	2000	0	100	100
Груз 4	$q_4$	900	0	1000	2500	2500	100	100
Груз 5	$q_5$	800	0	1700	0	2500	100	783
Себестоимость ресурса			$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	–	–
			12000	2000	1000	2500	–	–
Ограничения			4	4	4	4	–	–

Результат решения соответствующей задачи линейного программирования стандартными средствами MSExcel дает значения, указанные в крайнем правом столбце таблицы. Как видно из этих данных, третья и четвертая компонента грузопотока вошли в общий грузопоток лишь вследствие его обязательного минимального объема. Изменения тарифа на обработку третьей компоненты грузопотока делает более привлекательным обработку этой и второй компонент (табл. 2).

Таблица 2

#### Исходные данные и результаты решения для целевой функции (12)

Тариф на компоненты			Производительность ресурсов				Ограничения	Объем
			$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$		
Груз 1	$q_1$	1500	2500	2500	2500	2500	100	100
Груз 2	$q_2$	1300	3000	3000	3000	2500	100	9700
Груз 3	$q_3$	1000	0	1300	2000	0	100	738
Груз 4	$q_4$	900	0	1000	2500	2500	100	100
Груз 5	$q_5$	800	0	1700	0	2500	100	100
Себестоимость ресурса			$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	–	–
			12000	2000	1000	2500	–	–
Ограничения			4	4	4	4	–	–

В случае более сложной системы приоритетов (например, учитывающих коммерческая значимость тех или иных клиентов и требуемых ими операций, обеспечение предписанных внешними условиями грузопотоков, сохранение рыночной позиции и др.) метод линейного программирования в большинстве случаев неприменим, и решение должно находиться различными эвристическими способами. Методической причиной этой неадекватности является слишком большая вариативность результата при небольшом спектре параметров, в частности доходности грузопотоков. Как правило, методы линейного программирования имеют тенденцию максимизировать единственный грузопоток с наибольшей доходностью. Кроме того, разные методы решения задачи линейного программирования дают различные результаты. Если в отношении максимизирования функции

это не столь важно, то для практики диаметрально противоположные варианты формирования технологических ресурсов могут оказаться неприемлемыми.

### Обсуждение (Discussion)

Как видно из ранее изложенного, при традиционной постановке задачи оптимизации как максимизации некоторой целевой функции в процессе ее решения приходится сталкиваться с характерными для всех известных теоретических методов проблемами: вычислительной трудоемкостью и стремлению к локальным экстремумам. Появившиеся в последнее время метаэвристики, наиболее известными из которых являются генетические алгоритмы, пока отличаются своей новизной более, чем результативностью.

Практические потребности решения оптимизационных задач, подобных составлению планов и расписаний, основаны на человеческом интеллекте, трудноформализуемом и транслируемом в программные средства, и в еще большей степени — на методе многократных проб и ошибок. Все полученные таким способом решения в лучшем случае являются допустимыми, редко — рациональными и практически никогда — оптимальными. Одной из причин низкого качества получаемых решений является высокая трудоемкость каждой вычислительной итерации, что в условиях ограниченного времени на поиск решения заставляет принимать первое из решений, удовлетворяющее заданным ограничениям.

Очевидным направлением повышения качества новых решений является снижение трудоемкости каждого шага процедуры поиска, что достигается за счет использования специфических инструментов быстрого и точного анализа, как правило, реализуемых в виде имитационных моделей.

### Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Для решения задач оперативного управления, когда обоснован допуск о дискретности исходных данных (в условиях, например, ограниченного времени, когда используемые параметры не успеют измениться вследствие действия комплекса возмущающих факторов), актуальными являются методы линейного программирования (в частности, смешанного целочисленного линейного программирования), разумеется, со всеми присущими им рисками при неудачной области допустимых значений.
2. Процесс формирования адекватных моделей представляет некоторую сложность, в особенности при реализации непосредственно матричного моделирования в нотации специальных программ (например, MILP88BorlandInternational).
3. Полученные решения являются квазиоптимальными, при этом востребованными остаются проблемы многокритериальной оптимизации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Cuong T. N.* Seaport throughput forecasting and post COVID-19 recovery policy by using effective decision-making strategy: A case study of Vietnam ports / T. N. Cuong, H. S. Kim, S. S. You, D. A. Nguyen // *Computers & Industrial Engineering*. — 2022. — Vol. 168. — Pp. 108102. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108102.
2. *Narasimha P. T.* Impact of COVID-19 on the Indian seaport transportation and maritime supply chain / P. T. Narasimha, P. R. Jena, R. Majhi // *Transport Policy*. — 2021. — Vol. 110. — Pp. 191–203. DOI: 10.1016/j.transpol.2021.05.011.
3. *Jeevan J.* The Implications of the Growth of Port Throughput on the Port Capacity: the Case of Malaysian Major Container Seaports / J. Jeevan, H. Ghaderi, Y. M. Bandara, A. H. Saharuddin, M. R. Othman // *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*. — 2015. — Vol. 3. — Pp. 84–98. DOI: 10.1016/j.enavi.2015.12.008.
4. *Cuong T. N.* Container throughput analysis and seaport operations management using nonlinear control synthesis / T. N. Cuong, H. S. Kim, X. Xu, S. S. You // *Applied Mathematical Modelling*. — 2021. — Vol. 100. — Pp. 320–341. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.039.

5. *Henríquez R.* Technological drivers of seaports' business model innovation: An exploratory case study on the port of Barcelona / R. Henríquez, F. X. M. de Osés, J. E. M. Marín // *Research in Transportation Business & Management*. — 2022. — Pp. 100803. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100803.
6. *Ferreira D. C.* Explanatory variables driving the technical efficiency of European seaports: An order- $\alpha$  approach dealing with imperfect knowledge / D. C. Ferreira, R. C. Marques, M. I. Pedro // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. — 2018. — Vol. 119. — Pp. 41–62. DOI: 10.1016/j.tre.2018.09.007.
7. *Kammoun R.* Seaport efficiency and competitiveness in European seaports / R. Kammoun, C. Abdennadher // *Transport Policy*. — 2022. — Vol. 121. — Pp. 113–124. DOI: 10.1016/j.tranpol.2022.04.003.
8. *Notteboom T.* The adaptive capacity of container ports in an era of mega vessels: The case of upstream seaports Antwerp and Hamburg / T. Notteboom // *Journal of Transport Geography*. — 2016. — Vol. 54. — Pp. 295–309. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.06.002.
9. *Sakyi D.* Seaport efficiency and the trade balance in Africa / D. Sakyi, M. Immurana // *Maritime Transport Research*. — 2021. — Vol. 2. — Pp. 100026. DOI: 10.1016/j.martra.2021.100026.
10. *de Langen P. W.* Seaports as Clusters of Economic Activities / P. W. de Langen // *International Encyclopedia of Transportation: Volume 3. Freight Transport and Logistics*. — Elsevier, 2021. — Pp. 310–315. DOI: 10.1016/B978-0-08-102671-7.10261-1.
11. *Efimova E. G.* Seaports as drivers of regional economic development: The case of Saint Petersburg and Leningrad Province / E. G. Efimova, A. A. Gapochka // *Case Studies on Transport Policy*. — 2020. — Vol. 8. — Is. 2. — Pp. 383–393. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.10.003.
12. *Кузнецов А. Л.* Порто-ориентированная логистика: монография / А. Л. Кузнецов, А. В. Кириченко, О. В. Соляков, А. Д. Семенов. — М.: МОРКНИГА, 2021. — 245 с.
13. *Kuznetsov A. L.* Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko // *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2016. — Vol. 10. — No. 3. — Pp. 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.
14. *Kuznetsov A. L.* Planning Simulation Experiments in the Tasks of Studying the Operational Strategies of Container Terminals / A. L. Kuznetsov, A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, H. Oja // *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2020. — Vol. 14. — No. 4. — Pp. 845–849. DOI: 10.12716/1001.14.04.08.

## REFERENCES

1. Cuong, Truong Ngoc, Hwan-Seong Kim, Sam-Sang You, and Duy Anh Nguyen. “Seaport throughput forecasting and post COVID-19 recovery policy by using effective decision-making strategy: A case study of Vietnam ports.” *Computers & Industrial Engineering* 168 (2022): 108102. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108102.
2. Narasimha, Prathvi Thumbe, Pradyot Ranjan Jena, and Ritanjali Majhi. “Impact of COVID-19 on the Indian seaport transportation and maritime supply chain.” *Transport Policy* 110 (2021): 191–203. DOI: 10.1016/j.tranpol.2021.05.011.
3. Jeevan, J., H. Ghaderi, Y. M. Bandara, A. H. Saharuddin, and M. R. Othman. “The Implications of the Growth of Port Throughput on the Port Capacity: the Case of Malaysian Major Container Seaports.” *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy* 3 (2015): 84–98. DOI: 10.1016/j.enavi.2015.12.008.
4. Cuong, Truong Ngoc, Hwan-Seong Kim, Xiao Xu, and Sam-Sang You. “Container throughput analysis and seaport operations management using nonlinear control synthesis.” *Applied Mathematical Modelling* 100 (2021): 320–341. DOI: 10.1016/j.apm.2021.07.039.
5. Henríquez, Ricardo, F. Xavier Martínez de Osés, and Jesús E. Martínez Marín. “Technological drivers of seaports' business model innovation: An exploratory case study on the port of Barcelona.” *Research in Transportation Business & Management* (2022): 100803. DOI: 10.1016/j.rtbm.2022.100803.
6. Ferreira, Diogo Cunha, Rui Cunha Marques, and Maria Isabel Pedro. “Explanatory variables driving the technical efficiency of European seaports: An order- $\alpha$  approach dealing with imperfect knowledge.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 119 (2018): 41–62. DOI: 10.1016/j.tre.2018.09.007.
7. Kammoun, Rabeb, and Chokri Abdennadher. “Seaport efficiency and competitiveness in European seaports.” *Transport Policy* 121 (2022): 113–124. DOI: 10.1016/j.tranpol.2022.04.003.
8. Notteboom, Theo. “The adaptive capacity of container ports in an era of mega vessels: The case of upstream seaports Antwerp and Hamburg.” *Journal of Transport Geography* 54 (2016): 295–309. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2016.06.002.

9. Sakyi, Daniel, and Mustapha Immurana. "Seaport efficiency and the trade balance in Africa." *Maritime Transport Research* 2 (2021): 100026. DOI: 10.1016/j.martra.2021.100026.

10. de Langen, Peter W. "Seaports as Clusters of Economic Activities." *International Encyclopedia of Transportation: Volume 3. Freight Transport and Logistics*. Elsevier, 2021. 310–315. DOI: 10.1016/B978-0-08-102671-7.10261-1.

11. Efimova, Elena G., and Alexander A. Gapochka. "Seaports as drivers of regional economic development: The case of Saint Petersburg and Leningrad Province." *Case Studies on Transport Policy* 8.2 (2020): 383–393. DOI: 10.1016/j.cstp.2019.10.003.

12. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, O. V. Solyakov, and A. D. Semenov. *Porto-orientirovannaya logistika: monografiya*. M.: MORKNIGA, 2021.

13. Kuznetsov, A. L., and A. V. Kirichenko. "Simulation for Service Quality and Berths Occupancy Assessment." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.3 (2016): 489–492. DOI: 10.12716/1001.10.03.14.

14. Kuznetsov, A. L., A. V. Kirichenko, A. D. Semenov, and H. Oja. "Planning Simulation Experiments in the Tasks of Studying the Operational Strategies of Container Terminals." *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 14.4 (2020): 845–849. DOI: 10.12716/1001.14.04.08.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кузнецов Александр Львович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru),  
[kuznetsoval@gumrf.ru](mailto:kuznetsoval@gumrf.ru)

**Кириченко Александр Викторович** —  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kirichenkoav@gumrf.ru](mailto:kirichenkoav@gumrf.ru)

**Кузнецов Роман Вячеславович** — инженер  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [kuznecovrv@gumrf.ru](mailto:kuznecovrv@gumrf.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kuznetsov, Aleksandr L.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [thunder1950@yandex.ru](mailto:thunder1950@yandex.ru),  
[kuznetsoval@gumrf.ru](mailto:kuznetsoval@gumrf.ru)

**Kirichenko, Aleksandr V.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kirichenkoav@gumrf.ru](mailto:kirichenkoav@gumrf.ru)

**Kuznetsov, Roman V.** — Engineer  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [kuznecovrv@gumrf.ru](mailto:kuznecovrv@gumrf.ru)

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2022 г.  
Received: April 21, 2022.