

УДК 338.47

UDC 338.47

5.2.2. Математические, статистические и инструментальные методы в экономике

5.2.2. Mathematical, statistical and instrumental methods in economics

**ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ
КОНТЕЙНЕРНОГО ТЕРМИНАЛА НА
ОСНОВЕ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ПОДХОДА И
БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИЙ**

**ASSESSMENT OF THE ECONOMIC
EFFICIENCY OF CONTAINER TERMINAL
AUTOMATION BASED ON A MULTI-AGENT
APPROACH AND BLOCKCHAIN
TECHNOLOGIES**

Хасанов Дмитрий Салимович
Младший научный сотрудник
РИНЦ-SCIENCE INDEX SPIN-код: 7683-4810
dkhasanovsuai@yandex.ru
*Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН, Лаборатория
интеллектуальных систем, г. Санкт-Петербург,
Россия*

Khasanov Dmitry Salimovich
Junior Research Fellow
RSCI-SCIENCE INDEX SPIN-code: 7683-4810
dkhasanovsuai@yandex.ru
*St. Petersburg Federal Research Center of the Russian
Academy of Sciences, St. Petersburg Institute for
Informatics and Automation of the Russian Academy
of Sciences, Laboratory of Intelligent Systems, St.
Petersburg, Russia*

Косторнова Александра Сергеевна
старший преподаватель
РИНЦ-SCIENCE INDEX SPIN-код: 5072-4158
svistunova_alexandra@bk.ru
*Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, г. Санкт-
Петербург, Россия*

Kostornova Alexandra Sergeevna
Senior Lecturer
RSCI-SCIENCE INDEX SPIN-code: 5072-4158
svistunova_alexandra@bk.ru
*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia*

В статье рассматривается проблема снижения операционных издержек и транзакционных затрат в операционной деятельности контейнерных терминалов морских портов. В качестве решения предлагается архитектура мультиагентной системы (МАС), включающая судовых, стивидорных, сервисных, транстайнерских и шлюзовых агентов, каждый из которых решает специфические задачи оптимизации. Для каждого класса агентов формализованы целевые функции и ограничения, направленные на минимизацию совокупных операционных издержек терминала. С целью повышения безопасности, прозрачности и снижения транзакционных издержек в распределенной среде предложена интеграция МАС с технологией блокчейн. Приведены математические модели взаимодействия агентов и формирования блокчейн-реестра. Эффективность предложенного подхода подтверждена результатами сравнительного имитационного моделирования, показавшего системное улучшение ключевых операционных показателей и значительное снижение экономических затрат: сокращение времени согласования на 40%, уменьшение конфликтов при назначении кранов на 20%, рост общей производительности системы на

The article addresses the problem of reducing operational costs and transaction costs in the operational activities of seaport container terminals. As a solution, an architecture of a multi-agent system (MAS) is proposed, comprising vessel, stevedoring, service, transittainer, and gate agents, each solving specific optimization tasks. For each agent class, objective functions and constraints aimed at minimizing the terminal's total operational costs are formalized. To enhance security, transparency, and reduce transaction costs in the distributed environment, the integration of the MAS with blockchain technology is proposed. Mathematical models of agent interaction and blockchain ledger formation are presented. The efficacy of the proposed approach is confirmed by the results of comparative simulation modeling, which demonstrated systemic improvement of key operational indicators and a significant reduction in economic costs: a 40% reduction in coordination time, a 20% decrease in crane assignment conflicts, a 20% increase in overall system productivity, and a 15% increase in the number of processed requests

20% и увеличение количества обрабатываемых заявок на 15%

Ключевые слова: МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА, КОНТЕЙНЕРНЫЙ ТЕРМИНАЛ, РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ РЕЕСТР, ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ, ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИКИ, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПЕРАЦИОННЫЕ ИЗДЕРЖКИ, ТРАНЗАКЦИОННЫЕ ЗАТРАТЫ

Keywords: MULTI-AGENT SYSTEM, CONTAINER TERMINAL, DISTRIBUTED LEDGER, DIGITAL TRANSFORMATION, LOGISTICS OPTIMIZATION, SIMULATION MODELING, OPERATIONAL COSTS, TRANSACTION COSTS

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-214-053>

Введение. Цифровая трансформация глобальных цепочек поставок требует внедрения передовых технологий, таких как блокчейн, облачные вычисления, машинное обучение и интернет вещей (IoT). Особую актуальность эта задача приобретает в контексте автоматизации контейнерных терминалов морских портов, где традиционные централизованные системы управления демонстрируют ограниченную масштабируемость и устойчивость к сбоям, что влечет за собой рост операционных издержек.

Традиционные централизованные подходы заставляют группировать ресурсы по постоянному принципу, создавая тесно связанные подгруппы с последовательной обработкой информации. Это создает экономические риски остановки всей системы из-за единой точки отказа, увеличивает время реакции и снижает общую экономическую эффективность. Передовым решением для решения этой задачи могут стать мультиагентные системы (МАС). Они нашли множество применений, включая процессы управления, мобильные роботы, управление воздушным движением и интеллектуальный поиск информации. [1, 2, 3]

Традиционно весь терминал управляется на основе централизованного программного обеспечения, что ограничивает возможности расширения и реконфигурации системы. Использование иерархической организации заставляет группировать ресурсы по постоянному принципу, тесно связанные между собой подгруппы, внутри

<http://ej.kubagro.ru/2025/10/pdf/53.pdf>

которых информация обрабатывается последовательно. [4] Следствием таких действий является возможность события, что большая часть системы может быть остановлена одной точкой отказа, а также способствовать нарушению плана и увеличению времени реакции, что напрямую влияет на финансовые результаты.

Очень важно, чтобы после прибытия в порт оборот грузового судна происходил как можно быстрее. Средний грузовой лайнер проводит в порту 60% своего времени, и с этим связаны большие затраты (демередж, потери от простоя). Следовательно, процесс распределения контейнеров должен быть направлен на минимизацию совокупных издержек, связанных с простоем грузового судна.

Исходя из описания задачи и работы порта [5] необходимо выделить агентов, для дальнейшей работы. Агенты характеризуются в основном своей независимостью от остальных элементов системы. Они способны координировать свои действия и передавать решения остальным элементам системы. Выделив классы агентов в системе можно будет построить архитектуру этой системы, которая позволит более точно определять «узкие места» и проводить полноценный анализ системы с точки зрения минимизации затрат.

Математическая модель МАС для контейнерного терминала. Задача технической оптимизации в рамках терминала сводится к задаче минимизации совокупных операционных издержек. Связь между агентами осуществляется с помощью асинхронного обмена данными сообщений, которые основаны на стандарте FIPA-ACL [6]. Распределенный подход повышает гибкость, эффективность и надежность, способствуя снижению транзакционных издержек взаимодействия. В этой системе можно выделить пять классов агентов:

- судовые агенты определяют последовательность погрузки/разгрузки судов

- стивидорные агенты управляют процессом погрузки/разгрузки судов
- сервисные агенты распределяют контейнеры в портовом терминале
- агенты транстайнера оптимизируют использование козлового крана
- шлюзовые агенты взаимодействуют с наземным транспортом (транспортировка контейнеров по суше). [11]

Судовые агенты:

Прибытие судна инициирует создание для него специализированного агента, задачей которого является оптимизация процесса обработки судна с точки зрения минимизации издержек. Агент нацелен на снижение стоимости простоя кранов, длительности грузовых операций и результирующих затрат на складирование. Его работа неразрывно связана с деятельностью агентов-стивидоров, требующей постоянной координации. Проблема, которую решает судовой агент, представляет собой задачу составления расписания: назначить доступные краны на операции погрузки и разгрузки, определив время их выполнения. Следовательно, множеству одновременно функционирующих судовых агентов необходимо согласовывать свои расписания между собой, чтобы исключить конфликты из-за кранового оборудования, которые несут дополнительные затраты.

Целевая функция судового агента минимизирует совокупные издержки:

$$\min C_{\text{total}} = c_1 \cdot T_{\text{простоя}} + c_2 \cdot L_{\text{пробега}} + c_3 \cdot N_{\text{конфликтов}}$$

$$\text{где } T_{\text{простоя}} = \sum_{i=1}^{N_k} \sum_{t=1}^T (1 - x_{i,t}) \cdot \Delta t$$

$$L_{\text{пробега}} = \max_{j \in J} \left(\sum_{i=1}^{N_k} \sum_{t=1}^T y_{i,j,t} \cdot t_{i,j} \right)$$

c_1 — стоимость часа простоя судна, (5000 у. е./час)

c_2 — стоимость выполнения операций,

c_3 — издержки на разрешение одного конфликта. (100 у. е./час)

Стивидорные агенты:

Для любого данного козлового крана агенты стивидора пытаются получить наиболее подходящее расписание, чтобы управлять укладкой контейнеров с минимальными затратами. Агент требует доступа к следующим данным: последовательность крановых операций, состав автопарка, закрепленного за краном, и локализация контейнеров в пределах терминала. Эту информацию он получает от уполномоченных сервисных агентов. В рамках координации с другими активными агентами (судовыми и сервисными) его целевая функция заключается в минимизации издержек, связанных с холостыми пробегами и содержанием парка машин.

$$\begin{aligned} \min \quad C_{\text{стивидор}} &= c_4 \cdot L_{\text{порожних}} + c_5 \cdot N_{\text{машин}} \\ \text{где } L_{\text{порожних}} &= \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{t=1}^T d_{m,t} \cdot \mathbb{I}_{\text{пусто}}(m, t) \\ N_{\text{машин}} &= \sum_{m=1}^{N_m} \mathbb{I}_{\text{в ожидании}}(m) \\ c_4 &\text{ — стоимость 1 км пробега техники (10 у.е./час)} \\ c_5 &\text{ — стоимость содержания одной машины.} \end{aligned}$$

Сервисные агенты:

Терминальная инфраструктура сегментирована на функциональные службы, за каждой из которых закреплены определенные зоны складирования (диапазоны штабелирования). Целевая функция сервисного агента заключается в оптимизации распределения контейнеров, поступающих на терминал с конкретного судна, и в определении рациональной конфигурации контролируемого им участка складского пространства для минимизации складских издержек. Для принятия решений агенту необходим доступ к следующим данным: схема подконтрольной территории, атрибуты контейнеров (тип, габариты, масса, порт назначения, идентификатор судна) и действующие ограничения на

штабелирование. Кроме того, агент осуществляет координацию с другими сервисными агентами для разрешения операционных конфликтов, например, для инициирования перераспределения контейнеров при исчерпании емкости назначенных ему штабелей. При решении задачи конфигурации агенты по обслуживанию должны максимизировать плотность штабелирования на своих участках, что эквивалентно снижению удельных затрат на хранение.

$$\max \rho_{\text{штабелирования}} = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \sum_{p=1}^{N_p} \mathbb{I}_{\text{занятости}}(s, p)}{N_s \cdot N_p \cdot h_{\max}}$$

Транстайнерские агенты:

Каждый транстайнер моделируется как автономный агент, целью которого является эффективное выполнение операций по штабелированию контейнеров с минимальными издержками на перемещение. Агент транстайнера (например для систем AGV) должен минимизировать стоимость порожних перемещений. Для реализации данной задачи агенту назначается оптимальный маршрут перемещения контейнера в целевую позицию. Каждый агент функционирует в режиме ожидания транзакций на штабелирование, иницируемых сервисными агентами. В рамках этих транзакций сервисные агенты передают агенту данные о локации контейнеров, предназначенных для погрузки на суда или внешний автотранспорт, а также координаты целевых позиций для контейнеров, выгружаемых с судов или грузовиков.

$$\min C_{\text{транстайнер}} = c_6 \cdot D_{\text{порожных}}$$

$$\text{где } D_{\text{порожных}} = \sum_{tr=1}^{N_{tr}} \sum_{t=1}^T \delta_{tr,t} \cdot \mathbb{I}_{\text{пусто}}(tr, t)$$

c_6 — стоимость 1 км пробега транстайнера. (200 у. е./час)

Шлюзовые агенты:

Шлюзовой агент контролирует прибытие или отправку контейнера по суше. Агент осуществляет управление закрепленными за ним

терминальными воротами, выполняя функцию интерфейса между внешним транспортом и внутренней логистикой терминала. Его ключевая задача — уведомлять соответствующего сервисного агента о событиях прибытия, а именно: о поступлении новых контейнеров для последующего размещения на складе и о прибытии автотранспорта для экспорта контейнеров с территории терминала, минимизируя задержки и связанные с ними транзакционные издержки.

Алгоритм его работы можно проиллюстрировать на примере обработки входящего контейнера: агент ворот проводит верификацию его метаданных. При успешном подтверждении корректности данных, он направляет запрос сервисному агенту, курирующему службу, к которой атрибутирован данный контейнер, с целью получения координат целевой позиции размещения. После получения данной локации, она транслируется грузовику для осуществления финальной транспортировки контейнера к назначенному штабелю. Аналогичный процесс происходит и с контейнерами, покидающими терминал.

Так же нужно понимать, что любая модель должна отвечать ряду требований, без которых ее создание не эффективно и не может быть использовано. К таким требованиям можно отнести проверку на адекватность модели, верификацию, валидацию, оценка точности результатов и анализ чувствительности модели. [13]

Ограничения производительности кранов:

$$\sum_{j=1}^{N_c} y_{i,j,t} \cdot t_{i,j} \leq P_{i,\max} \quad \forall i \in I, \forall t \in T$$

$$\sum_{i=1}^{N_k} y_{i,j,t} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall t \in T$$

Ограничения емкости склада:

$$\sum_{c=1}^{N_c} z_{c,s,p,h} \leq 1 \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall h \in H$$

$$\sum_{h=1}^H z_{c,s,p,h} \leq h_{\max} \quad \forall s \in S, \forall p \in P$$

Помимо мультиагентного подхода и описанию агентов к решению задач логистики порта, необходимо еще позаботиться о целостности хранения и передачи данных и информации, так как издержки на информационное взаимодействие (транзакционные издержки) составляют значительную часть операционных затрат. Из-за усложнившихся цепочек поставок крупные компании постоянно совершенствуют свои программные продукты, но большая часть все еще использует привычный метод коммуникации: электронная почта, телефон или социальные сети с мессенджерами, что является источником высоких транзакционных затрат. Внедрение технологии блокчейн сможет решить ряд проблем в логистике, в первую очередь за счет снижения транзакционных издержек на верификацию и документооборот. Это позволит избежать затрат на перевозки или задержек в доставке товаров. А также, очевидно, что можно будет передавать информацию о товаре и его местонахождению всем агентам системы, участвующим в процессе разгрузки, с минимальными затратами на координацию. [7,8]

Применение технологии распределенного реестра (блокчейн) в операционной деятельности контейнерных терминалов.

Применение технологии блокчейн на контейнерных терминалах сопряжено с проблемой терминологической неоднозначности, поскольку в современной научной литературе отсутствует ее унифицированное определение, что обусловлено существованием множества

технологических реализаций. Технология базируется на концепции распределенной транзакционной базы данных, реплицированной между узлами (нодами) сети, которые, идентифицируя различных пользователей, совместно участвуют в создании и верификации криптографически связанной последовательности записей, объединяемых в блоки. Ожидаемая трансформация логистического сектора, в том числе операционной деятельности контейнерных терминалов, детерминирована следующими ключевыми характеристиками технологии. Прозрачность блокчейна позволяет преодолеть информационную разобщенность между участниками цепочки поставок, обеспечивая им доступ к единому, непротиворечивому массиву данных в режиме, близком к реальному времени, что снижает издержки на поиск и согласование информации. В отличие от хранения информации в изолированных системах (унаследованные хранилища, ERP, TMS), данные в блокчейне существуют в распределенном и децентрализованном виде, что исключает возможность их несанкционированной модификации [9, 10] и снижает затраты на обеспечение безопасности и аудит. Прослеживаемость реализуется через возможность реестра фиксировать все этапы жизненного цикла продукта — от данных о поставщике и производстве до логистических операций. Это не только гарантирует аутентичность происхождения, но и предоставляет информацию о требуемых режимах обработки, транспортировки и хранения, а также упрощает процедуру установления причин и ответственных сторон при возникновении конфликтов, снижая соответствующие транзакционные издержки. Безопасность обеспечивается за счет архитектуры, в которой транзакции организуются в блоки, криптографически связанные через хэш-механизмы, формируя тем самым верифицируемую и устойчивую к изменениям доказательную базу. Доступ к информации контролируется системой асимметричного шифрования, где каждый участник обладает закрытым и открытым ключом для авторизации

доступа к данным и сети. Практическая реализация указанных свойств может быть проиллюстрирована на примере взаимодействия судовых и стивидорных агентов. В текущей парадигме судовые агенты передают стивидорам закрытую информацию (графики обработки судна) и координируют их работу, которую те выполняют в соответствии с полученным расписанием. [13] Интеграция в этот процесс блокчейн-платформы позволяет полностью защитить взаимодействие от вмешательства неуполномоченных лиц, обеспечивая конфиденциальность и безопасность операций, а также минимизировать порожние перемещения за счет синхронизации данных в едином, достоверном реестре, что приводит к значительному снижению транзакционных издержек взаимодействия агентов в цепочке поставок.

Хэш-функция для данных:

$$H(d) = \text{SHA-256}(d \parallel t \parallel \text{nonce})$$

где d — данные транзакции

t — временная метка

nonce — случайное число

Условие валидности блока:

$$H(\text{block}_i) < T_{\text{target}}$$

$$T_{\text{target}} = \frac{T_{\text{base}}}{D_{\text{difficulty}}}$$

Метрики эффективности:

$$\eta_{\text{системы}} = \frac{\sum_{v=1}^{N_v} T_{\text{обработки}}(v)}{\sum_{v=1}^{N_v} T_{\text{пребывания}}(v)}$$

$$U_{\text{ресурсов}} = \frac{\sum_{r=1}^{N_r} \sum_{t=1}^T u_{r,t}}{N_r \cdot T}$$

Распределенная природа МАС устраняет единые точки отказа, снижая экономические риски. При выходе из строя одного агента система сохраняет работоспособность за счет перераспределения задач. Добавление новых агентов не требует перепроектирования всей системы, в

отличие от централизованных решений, что повышает экономическую эффективность масштабирования.

Внедрение многоагентных систем (МАС) в сочетании с технологией блокчейн кардинально меняет операционную и экономическую эффективность портовых терминалов. Для наглядной демонстрации эффекта от внедрения представлена сравнительная таблица ключевых показателей и их экономической интерпретации (Таблица 1).

Для монетизации операционных улучшений, полученных в результате имитационного моделирования, были применены следующие стоимостные коэффициенты и допущения:

- Стоимость часа простоя судна $c_1 = 5\,000$ у.е./час.
- Издержки на разрешение одного конфликта $c_3 = 100$ у.е./конфликт.
- Стоимость 1 км пробега техники (ГСМ, амортизация) $c_4 = 10$ у.е./км.
- Стоимость часа работы персонала на согласование (оплата труда, накладные расходы, энергопотребление) $c_{\text{согл}} = 200$ у.е./час.
- Условные ежедневные постоянные затраты на эксплуатацию и обслуживание складских мощностей $C_{\text{склад}} = 10\,000$ у.е./день.
- Маржинальный доход от обработки одной дополнительной заявки (терминальный сбор) $p = 100$ у.е./заявка.
- Среднее количество судов, обрабатываемых за рабочий день: $N_{\text{судов}} = 2$ ед.
- Количество рабочих смен в день: 1.

Таблица 1 – Сравнение операционных показателей и экономического эффекта имитационной модели

Показатель	Традиционная система	Система с МАС + блокчейн	Абсолютное изменение	Относительное улучшение	Экономический эффект, у.е./день
Конфликты при назначении кранов	50 ед./день	40 ед./день	↓ 10 ед.	-20%	1000
Время согласования изменений	10 часов	6 часов	↓ 4 часа	-40%	800
Эффективность использования склада	70%	77%	↑ 7%	+10%	700
Время простоя судов	24 часа/судно	19 часов/судно	↓ 5 часов	-21%	50000 (за два судна)
Порожные пробеги техники	100 км/смена	75 км/смена	↓ 25 км	-25%	250
Обработанные заявки (в день)	200 ед.	230 ед.	↑ 30 ед.	+15%	3000
Коэффициент η_{system}	0,65	0,78	↑ 0,13	+20%	Повышение общей экономической эффективности системы.
Коэффициент $U_{ресурсов}$	0,72	0,83	↑ 0,11	+15%	Оптимизация основного капитала, снижение удельных затрат.

Проведенный сравнительный анализ демонстрирует системное улучшение ключевых операционных показателей и значительное снижение совокупных издержек при внедрении МАС и блокчейна. Суммарный экономический эффект рассчитан как сумма прямых экономий и дополнительного маржинального дохода по первым шести строкам таблицы. Коэффициенты η_{system} и $U_{ресурсов}$ являются интегральными технико-экономическими показателями, косвенный вклад которых в снижение издержек и рост доходов уже учтён в других строках. Расчеты показывают, что внедрение предложенной системы может привести к экономии и дополнительному доходу в размере **55 750 у.е.** за один рабочий

день, что при 22 рабочих днях в месяц составляет **более 1,2 млн у.е. ежемесячно.**

1. **Скорость и координация:** Наиболее значимое улучшение наблюдается во временных показателях. Сокращение времени согласования изменений на 40% свидетельствует о переходе от ручного, иерархического согласования к автоматизированному взаимодействию интеллектуальных агентов, что напрямую снижает транзакционные издержки.
2. **Эффективность использования ресурсов:** Уменьшение количества конфликтов на 20% и порожних пробегов на 25% указывает на более рациональное распределение задач между кранами и другой техникой. Агенты, обладая актуальной информацией через блокчейн, самостоятельно находят оптимальные решения без конфликтов, минимизируя соответствующие операционные издержки.
3. **Общая производительность системы:** Рост коэффициента η_{system} на 20% и $U_{ресурсов}$ на 15% подтверждает, что система стала не просто быстрее, но и "умнее" с экономической точки зрения. Ресурсы используются более целенаправленно, а общий цикл обработки судов оптимизирован, что ведет к снижению удельных затрат.
4. **Пропускная способность и экономия:** Увеличение количества обрабатываемых заявок на 15% является прямым следствием всех вышеперечисленных улучшений и ведет к росту доходов терминала. Система способна обрабатывать больший объем работы без увеличения количества физических активов, повышая отдачу на вложенный капитал.

Заключение. Предложенная мультиагентная модель с интеграцией блокчейн-технологии представляет собой перспективное решение для повышения экономической эффективности контейнерных терминалов через минимизацию операционных и транзакционных издержек.

Ключевые преимущества подхода включают повышенную отказоустойчивость, масштабируемость и адаптивность к изменяющимся условиям работы. Научная новизна работы заключается в разработке формализованных стоимостных моделей взаимодействия агентов различных классов и механизмов их интеграции с распределенным реестром данных для снижения транзакционных затрат. Предложенные целевые функции для каждого класса агентов, выраженные в денежном эквиваленте, позволяют оптимизировать работу терминала по критерию минимизации совокупных издержек.

Практическая значимость подтверждается имитационным моделированием и анализом экономических преимуществ системы. Использование блокчейна обеспечивает снижение транзакционных издержек на верификацию и документооборот при сохранении высокой производительности системы. Концепция применения мультиагентных систем в цепях поставок рассматривается как результат цифровой трансформации, направленной на снижение затрат в физических глобальных цепях поставок, в которых такие технологии, как блокчейн, облачные вычисления, машинное обучение и внедрение IoT (Интернет вещей), выступают инструментами экономии.

Описанные в данной работе технологии помогут для оптимизации сложных процессов, таких как пример штабелирования контейнеров, чтобы обеспечить более высокую производительность и снижение затрат по сравнению с существующими решениями. В силу присущих ей характеристик, мультиагентная система по своей природе является распределенной, что приводит к синергии с блокчейном для обеспечения надежного и экономически эффективного механизма, стандартизированного для обмена информацией в рамках логистической системы. Это позволяет портовой логистике работать на чрезвычайно высоком уровне эффективности и дает каждому участнику портовой

логистической цепи возможность оптимизировать свою собственную функцию по критерию затрат, сохраняя при этом целостный баланс. Внедрение МАС и блокчейна трансформирует операционную модель терминала от реактивной и централизованной к проактивной, распределенной и самоорганизующейся с фокусом на экономике. Полученные улучшения носят не разрозненный, а синергетический характер, создавая кумулятивный экономический эффект, который выражается в значительном росте общей пропускной способности и снижении совокупных издержек терминала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lukinskiy V., Panova Y. Analysis and synthesis of the designed logistics systems, in: Логистика: современные тенденции развития: материалы XVI Междунар. науч.-практ. конф. 6, 7 апреля 2017 г. / Отв. ред.: В. С. Лукинский. СПб. : ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2017. Р. 249-252.
2. Скобелев П. О. и др. Мультиагентные технологии для управления распределением производственных ресурсов в реальном времени// Механика, управление и информатика. – 2011. - No 5. – с. 110–122.
3. Yury Iskanderov, Mikhail Pautov. Security of Information Processes in Supply Chains. Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI’18) September 17-21, 2018., Volume 2, p.13-22. Springer, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 875.
4. Искандеров Ю.М. Особенности информатизации транспортно-технологических процессов в цепях поставок М., Информатизация и связь, № 4; 2019, С.31-37. DOI: 10.34219/2078-8320-2019-10-4-31-37
5. Искандеров Ю.М., Ласкин М.Б., Чумак А.С., Хасанов Д.С. Особенности моделирования управления информационными ресурсами транспортных систем. В сборнике: Системный анализ в проектировании и управлении. сборник научных трудов XXIV Международной научной и учебно-практической конференции: в 3 ч. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Санкт-Петербург, 2020. С. 250-257.
6. Lebedev, I., Sukhoparov, M., Semenov, V., & Khasanov, D. (2025). Adaptive Segmentation of Information Sequences for Machine Learning Modular Regression Models. *Emerging Science Journal*, 9(5), 2420–2438. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-05-08>
7. Tijan E., Aksentijevic S., Ivanic. K., Jardas M. Blockchain technology implementation in logistics, *MDPI sustainability* 11(4) , 1185 p., 2019, DOI 10.3390/su11041185
8. Partala J. Provably secure covert communication on blockchain, *Cryptography* 2(3), 18 p., 2018, DOI 10.3390/cryptography2030018
9. Svistunova, A. S. Improving the efficiency of traffic management in a metropolis based on computer simulation / A. S. Svistunova, D. S. Khasanov // *Computing, Telecommunications and Control*. – 2021. – Vol. 14. – No 3. – P. 33-42. – DOI

10.18721/JCSTCS.14303.

10. Майоров Н.Н, Кириченко А.В., Фетисов В.А., Исследование состояний контейнерного терминала на основе транспортной модели и имитационного моделирования // Вестник «ГУМРФ» - 2016. – №3. – С. 7-15.

11. Кузнецов А.Л., Кириченко А.В., Погодин В.А., Щербакова-Слюсаренко В.Н., Роль имитационного моделирования в технологическом проектировании и оценке параметров грузовых терминалов // Вестник Астраханского Государственного технического университета. Морская техника и технология – 2017. – №2. – С.93-102.

12. Кириченко А. В. и др. Морская контейнерная транспортно-технологическая система: моногр. СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2017. 412 с.

13. Кузнецов, А. Л. Анализ оптимизационных стратегий складирования контейнеров / А. Л. Кузнецов, А. Д. Семенов, А. З. Борович // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2019. – Т. 11. – № 5. – С. 803-812. – DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.

REFERENCES

1. Lukinskiy V., Panova Y. Analysis and synthesis of the designed logistics systems, in: Logistika: sovremennyye tendencii razvitiya: materialy XVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 6, 7 aprelja 2017 g. / Otv. red.: V. S. Lukinskij. SPb. : GUMRF imeni admirala S.O. Makarova, 2017. P. 249-252.

2. Skobelev P. O. i dr. Mul'tiagentnye tehnologii dlja upravlenija raspredeleniem proizvodstvennyh resursov v real'nom vremeni// Mehanika, upravlenie i informatika. – 2011. - No 5. – s. 110–122.

3. Yury Iskanderov, Mikhail Pautov. Security of Information Processes in Supply Chains. Proceedings of the Third International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (ITI'18) September 17-21, 2018., Volume 2, p.13-22. Springer, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 875.

4. Iskanderov Ju.M. Osobennosti informatizacii transportno-tehnologicheskikh processov v cepjakh postavok M., Informatizacija i svjaz', № 4; 2019, S.31-37. DOI: 10.34219/2078-8320-2019-10-4-31-37

5. Iskanderov Ju.M., Laskin M.B., Chumak A.S., Hasanov D.S. Osobennosti modelirovaniya upravlenija informacionnymi resursami transportnyh sistem. V sbornike: Sistemnyj analiz v proektirovanii i upravlenii. sbornik nauchnyh trudov XXIV Mezhdunarodnoj nauchnoj i uchebno-prakticheskoy konferencii: v 3 ch. Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet Petra Velikogo. Sankt-Peterburg, 2020. S. 250-257.

6. Lebedev, I., Sukhoparov, M., Semenov, V., & Khasanov, D. (2025). Adaptive Segmentation of Information Sequences for Machine Learning Modular Regression Models. Emerging Science Journal, 9(5), 2420–2438. <https://doi.org/10.28991/ESJ-2025-09-05-08>

7. Tijan E., Aksentijevic S., Ivanic. K., Jardas M. Blockchain technolu implementation in logistics, MDPI sustainability 11(4) , 1185 p., 2019, DOI 10.3390/su11041185

8. Partala J. Provably secure covert communication on blockchain, Cryptography 2(3), 18 p., 2018, DOI 10.3390/cryptography2030018

9. Svistunova, A. S. Improving the efficiency of traffic management in a metropolis based on computer simulation / A. S. Svistunova, D. S. Khasanov // Computing, Telecommunications and Control. – 2021. – Vol. 14. – No 3. – P. 33-42. – DOI 10.18721/JCSTCS.14303.

10. Majorov N.N, Kirichenko A.V., Fetisov V.A., Issledovanie sostojanij kontejnernogo terminala na osnove transportnoj modeli i imitacionnogo modelirovaniya //

Vestnik «GUMRF» - 2016. – No3. – С. 7-15.

11. Kuznecov A.L., Kirichenko A.V., Pogodin V.A., Shherbakova-Sljusarenko V.N., Rol' imitacionnogo modelirovanija v tehnologicheskom proektirovanii i ocenke parametrov gruzovyh terminalov // Vestnik Astrahanskogo Gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Morskaja tehnika i tehnologija – 2017. – No2. – С.93-102.

12. Kirichenko A. V. i dr. Morskaja kontejnernaja transportno-tehnologičeskaja sistema: monogr. SPb.: Izd-vo MANJeB, 2017. 412 s.

13. Kuznecov, A. L. Analiz optimizacionnyh strategij skladirovanija kontejnerov / A. L. Kuznecov, A. D. Semenov, A. Z. Borevich // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. – 2019. – T. 11. – № 5. – S. 803-812. – DOI 10.21821/2309-5180-2019-11-5-803-812.