

DOI: 10.24412/cl-37382-2026-3-83-87

Дата поступления рукописи в редакцию: 28.06.2026 г.

**БОНДАРЕНКО Никита Александрович,**

*магистрант,*

*кафедра информационных систем и технологий (ИСТ),*

*«Поволжский государственный университет*

*телекоммуникаций и информатики»,*

*Самара, Россия,*

*e-mail: vizit.nikita163@gmail.com*

**КОЗЛОВ Вячеслав Васильевич,**

*кандидат технических наук,*

*доцент кафедры ИСТ,*

*кафедра информационных систем и технологий (ИСТ),*

*«Поволжский государственный университет*

*телекоммуникаций и информатики»,*

*Самара, Россия,*

*e-mail: vco2005@mail.ru*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЦЕПОЧЕК ПОРТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОАГЕНТНОГО ПОДХОДА И ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ**

**Аннотация.** В статье представлен анализ современных гибридных методов оптимизации логистических процессов морских портов, основанных на конвергенции многоагентных систем и генетических алгоритмов. Обобщены предпосылки отказа от жёстко иерархических систем управления в пользу децентрализованных самоорганизующихся структур. Проведён сравнительный анализ архитектурных решений, где многоагентная платформа выполняет функцию динамического имитатора и координатора, а генетический аппарат является инструментом глобального эволюционного поиска. Проанализированы механизмы разрешения конфликтов между агентами и способы вложения генетических операторов в протоколы переговоров. Выявлены ключевые ограничения существующих подходов, связанные с вычислительной сложностью и онтологической совместимостью. Определены направления исследований, включая интеграцию обучения с подкреплением и технологий цифровых двойников.

**Ключевые слова:** морской порт, логистическая цепочка, многоагентная система, генетический алгоритм, децентрализованное управление, эволюционные вычисления, оптимизация ресурсов, контрактные сети, имитационное моделирование.

**BONDARENKO Nikita Aleksandrovich,**

*Master's Student,*

*Department of Information Systems and Technologies (IST),*

*Volga Region State University of Telecommunications and Informatics,*

*Samara, Russia*

**KOZLOV Vyacheslav Vasilievich,**

*PhD (Engineering),*

*Associate Professor, Department of Information Systems and Technologies (IST),*

*Department of Information Systems and Technologies (IST),*

*Volga Region State University of Telecommunications and Informatics,*

*Samara, Russia*

## OPTIMIZATION OF PORT LOGISTICS CHAINS USING A MULTI-AGENT APPROACH AND GENETIC ALGORITHMS

**Annotation.** *This article presents an analysis of modern hybrid methods for optimizing seaport logistics processes based on the convergence of multi-agent systems and genetic algorithms. The rationale for abandoning strictly hierarchical management systems in favor of decentralized, self-organizing structures is summarized and systematized. A comparative analysis of architectural solutions is conducted, where the multi-agent platform functions as a dynamic simulator and coordinator, and the genetic apparatus serves as a tool for global evolutionary search. Conflict resolution mechanisms between agents and methods for embedding genetic operators in negotiation protocols are analyzed. Key limitations of existing approaches related to computational complexity and ontological compatibility are identified. Further research directions are identified, including the integration of reinforcement learning and digital twin technologies.*

**Key words:** *seaport, supply chain, multi-agent system, genetic algorithm, decentralized control, evolutionary computation, resource optimization, contract networks, simulation modeling.*

### Введение

Современный этап цифровой трансформации транспортных узлов связан с ростом объёмов и неопределённости грузопотоков, что определяет необходимость поиска новых способов управления. Традиционные системы оперативного планирования в портах, построенные на иерархических диспетчерских принципах, показывают свою уязвимость к динамическим возмущениям и сложность масштабирования. В данном контексте выделяются два методологических направления – технология интеллектуальных агентов и эволюционные вычисления.

Многоагентный подход (МАС) предоставляет основу для децентрализованного представления судов, причалов, складских комплексов и перегрузочной техники, наделяя их собственными целями и поведенческими стратегиями. Но согласование локальных интересов агентов не всегда приводит к глобально оптимальному поведению системы, что создаёт проблему «трагедии общин» в портовой логистике. Для снижения этого недостатка в научной литературе предлагается гибридизация МАС с метаэвристическими оптимизаторами, среди которых выделяются генетические алгоритмы (ГА).

Цель статьи состоит в аналитическом обзоре и классификации существующих моделей, синергетически объединяющих МАС и ГА для оптимизации логистических цепочек порта, а также в выявлении структурных ограничений и перспектив развития этого научного направления.

### Методологические основы и текущее состояние проблематики

Сложность порта как объекта управления связана с комбинаторной сложностью, возникающей при попытке совместного планирования причального фронта, складского хранения и внутрипортовой транспортировки. Решение задачи в

классической постановке методами смешанного целочисленного программирования часто оказывается неосуществимо в реальном масштабе времени из-за NP-трудности задачи [1]. Это обстоятельство стимулировало переход к эвристическим и метаэвристическим техникам, где генетический алгоритм показал себя как надёжный инструмент решения. В работах [2; 3] показана продуктивность ГА для задачи распределения причалов и планирования работы кранов. При этом функция строится как интегральная оценка времени ожидания судов и штрафов за отклонение от планового окна обслуживания.

Параллельное направление исследований фокусируется на агентном моделировании, где единицей анализа выступает не глобальное расписание, а локальное взаимодействие. Изолированное применение аукционов приводит к субоптимальности, если горизонт планирования не учитывает будущих состояний.

Синтез этих двух парадигм представляет собой попытку преодолеть дуализм между стратегической оптимизацией и тактической реактивностью. Здесь выделяются два архитектурных паттерна. Первый паттерн, «инъекция эволюции», предполагает использование ГА для настройки параметров поведения агентов до начала симуляции [4]. Второй, более сложный паттерн, «циклическая коэволюция», описан в работе [5], где ГА работает на метауровне, периодически перестраивая коалиции агентов или виртуальную топологию связей. Этот подход связан с концепцией цифровых двойников, где МАС служит динамической моделью для валидации хромосом [6].

### Архитектурный анализ гибридных систем

Фундаментальная проблема совмещения МАС и ГА заключается в разнице темпоральных характеристик их функционирования. Генетический алгоритм требует относительно статичной

среды для оценки фитнеса поколения, в то время как многоагентная среда априори изменчива. В анализируемых работах это противоречие разрешается через введение механизма «квантования времени», где итерации ГА синхронизируются с окончанием определенных событий, например с завершением разгрузки судна или наступлением приливного цикла.

Ключевым функциональным блоком гибридной системы выступает подсистема переговоров. Анализ протоколов взаимодействия агентов, проведённый в работах [7; 8], позволяет утверждать, что в контексте порта наибольшую надёжность показывает расширенный протокол Contract Net, модифицированный для многокритериальных оценок. В таких схемах генетический алгоритм не назначает жёсткие планы, а кодирует весовые коэффициенты значимости критериев для каждого агента-менеджера. Это позволяет достичь семантической совместимости между машинными правилами логистики и абстрактной математикой ГА.

Анализ также выявил тенденцию к миграции от статических хромосом, кодирующих последовательность операций, к предиктивным геномам. Особи популяции все чаще кодируют не расписание как таковое, а стратегию принятия решений агентом, например пороги активации или параме-

тры нечётких правил вывода [9]. Это ставит прикладную задачу выбора способа представления знаний в хромосоме. Встречается бинарное, вещественное и перестановочное кодирование, причём последнее доминирует в задачах компоновки судов у причалов, а вещественные числа предпочтительнее для калибровки темпов работы кранов.

#### **Классификация и сравнение моделей оптимизации**

Для систематизации знаний о гибридных решениях целесообразно провести классификацию по критерию уровня вмешательства ГА в работу МАС. В научной литературе прослеживаются три основные архитектурные модели, различающиеся механизмом взаимодействия компонентов. Первая модель, условно называемая «внешней оптимизацией», предполагает, что ГА рассчитывает полноценное расписание, которое затем передаётся агентам для исполнения. Вторая модель, «параметрическая», использует ГА только для тонкой настройки переменных агентов. Третья модель, «интегративная», встраивает эволюционные операторы непосредственно в жизненный цикл агентов, позволяя им обмениваться фрагментами генетической информации. Сравнительный анализ моделей гибридизации МАС и ГА в портовой логистике приведён в таблице 1.

*Таблица 1. Сравнительный анализ моделей гибридизации МАС и ГА в портовой логистике*

| <b>Характеристика</b>   | <b>Внешняя оптимизация</b>           | <b>Параметрическая модель</b>                                | <b>Интегративная модель</b>                                   |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Роль ГА                 | Генерация глобального расписания     | Настройка весов и порогов агентов                            | Оператор коллаборативной эволюции                             |
| Гибкость к сбоям        | Низкая, требуется перезапуск расчёта | Высокая, агенты адаптируются локально                        | Очень высокая, знание эволюционирует                          |
| Вычислительная нагрузка | Полный расчёт на горизонте           | Разовый прогон обучения                                      | Распределённая, зависит от топологии сети                     |
| Основной недостаток     | Неустойчивость к динамике очереди    | Риск локальных экстремумов без гарантии глобального оптимума | Сложность отладки и непредсказуемость эмерджентного поведения |

*Составлено по материалам [2; 4; 5; 10-12]*

Анализ позволяет сделать вывод о комплементарности моделей в зависимости от операционных требований терминала. Для стабильных грузопотоков предпочтительна внешняя оптимизация, определяющая близкие к оптимальным расписания. Для высоко вариативной среды с частыми срывами графиков подвоза более устойчивой оказывается параметрическая модель, в то время как интегративная

модель остаётся преимущественно академическим концептом с не до конца изученными свойствами сходимости [13].

Несмотря на теоретическую привлекательность, гибридизация МАС и ГА сопряжена с рядом фундаментальных сложностей. Наблюдается проблема «семантического разрыва». Хромосомы низкого уровня плохо согласуются с высокоуровне-

выми онтологиями агентов, что требует введения громоздких процедур кодирования-декодирования и снижает оперативность системы. Оценка фитнеса агентов в ходе симуляции требует значительных вычислительных ресурсов, и при ограничении времени симуляции оценка становится смещённой, что влияет на направленность генетического поиска.

Попытки масштабирования моделей на смешанные терминалы единичны. Также, аналитический обзор источников [14; 15] показывает, что в современных постановках задач преобладают экономические показатели в ущерб экологическим и эргономическим аспектам. Включение в фитнес-функцию компонент углеродного следа и уровня утомляемости операторов кранов является пока

не формализованной в рамках МАС-ГА задачей.

### Заключение

Анализ подтверждает, что сочетание глобального эволюционного поиска с локальной реактивностью агентов позволяет преодолеть ограничения, присущие каждому из методов в отдельности. Выявлено, что наиболее сбалансированным на текущем этапе развития является параметрический подход, при котором ГА настраивает поведенческие стратегии агентов, избегая прямого императивного планирования.

Основным нерешённым вопросом остаётся отсутствие общепринятых бенчмарков для сравнения гибридных архитектур и недостаточная верификация прототипов на исторических данных реальных портов.

### Список литературы:

- [1] Bierwirth C., Meisel F. *A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. European Journal of Operational Research. 2010. V. 202. №3. Pp. 615-627.*
- [2] Dulebenets M.A. *An Adaptive Island Evolutionary Algorithm for the berth scheduling problem. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2020. V. 12. №3. Pp. 1-27.*
- [3] Kavoosi M., Dulebenets M.A., Abioye O. *Berth scheduling at marine container terminals with multiple objectives. Maritime Economics & Logistics. 2019. V. 21. Pp. 565-591.*
- [4] Shen W., Hao Q., Yoon H.J. *Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. Advanced Engineering Informatics. 2006. V. 20. №4. Pp. 415-431.*
- [5] Канский П.Д., Ларин О.Н., Жудро М.К. *Многокритериальная классификация модификаций цепей поставок в транспортно-логистической деятельности. Наука и техника. 2026. Т. 25. №2. С. 154-166.*
- [6] Череповская Ю.А. *Цифровые двойники для управления рисками цепей поставок в условиях пандемии COVID-19. Инженерный вестник Дона. 2021. №7 (79). С. 304-310.*
- [7] Абрамов В.И. *Агент-ориентированное и имитационное моделирование: перспективы в области информационных технологий. Региональные проблемы преобразования экономики. 2018. №11 (97). С. 386-397.*
- [8] Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems. Chichester: John Wiley & Sons. 2009. 461 p.*
- [9] Lee D., Kang Y.-S., Noh S.D. *Digital twin-driven deep reinforcement learning for real-time optimisation in dynamic AGV systems. International Journal of Production Research. 2025. V. 64. №1. Pp. 1-20.*
- [10] Li S., Song L. *Berth Allocation and Quay Crane Assignment Considering the Uncertain Maintenance Requirements. Applied Sciences. 2025. V. 15. P. 660. Pp. 1-15.*
- [11] Севрюгина Н.С., Конев А.А., Штырхунова Н.А., Вахрушева И.А. *Моделирование и оптимизация транспортировочных операций для горнодобывающих предприятий. Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. 2025. №2. С. 306-311.*
- [12] Botti V., Omicini A. *The Cognitive Approach in Multi-Agent Systems. Knowledge Engineering Review. 2019. V. 36. P. 394.*
- [13] Belfemine F., Caire G., Greenwood D. *Developing Multi-Agent Systems with JADE. Springer. 2007. 303 p.*
- [14] Iris C., Lam J.S.L. *A review of energy efficiency in ports: Operational strategies and technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. V. 112. Pp. 170-182.*
- [15] *Decarbonising Maritime Transport: Pathways to zero-carbon shipping by 2035. // OECD International Transport Forum. URL: [itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-maritime-transport.pdf](https://itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-maritime-transport.pdf). (дата обращения: 06.05.2026).*

## References:

- [1] Bierwirth C., Meisel F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*. 2010. V. 202. No. 3. pp. 615-627.
- [2] Dulebenets M.A. An Adaptive Island Evolutionary Algorithm for the Berth scheduling problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2020. V. 12. No. 3. pp. 1-27.
- [3] Kavoosi M., Dulebenets M.A., Abioye O. Berth scheduling at marine container terminals with multiple objectives. *Maritime Economics & Logistics*. 2019. V. 21. Pp. 565-591.
- [4] Shen W., Hao Q., Yoon H.J. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Advanced Engineering Informatics*. 2006. Vol. 20. No. 4. Pp. 415-431.
- [5] Kapskiy P.D., Larin O.N., Zhudro M.K. Multicriteria classification of supply chain modifications in transport and logistics activities. *Science and Technology*. 2026. Vol. 25. No. 2. Pp. 154-166.
- [6] Cherepovskaya Yu.A. Digital twins for supply chain risk management in the context of the COVID-19 pandemic. *Engineering Bulletin of the Don*. 2021. No. 7 (79). Pp. 304-310.
- [7] Abramov V.I. Agent-Based Modeling and Simulation: Prospects in Information Technology. *Regional Problems of Economic Transformation*. 2018. No. 11 (97). Pp. 386-397.
- [8] Wooldridge M. *An Introduction to MultiAgent Systems*. Chichester: John Wiley & Sons. 2009. 461 p.
- [9] Lee D., Kang Y.-S., Noh S. D. Digital Twin-Driven Deep Reinforcement Learning for Real-Time Optimization in Dynamic AGV Systems. *International Journal of Production Research*. 2025. Vol. 64. No. 1. Pp. 1-20.
- [10] Li S., Song L. Berth Allocation and Quay Crane Assignment Considering the Uncertain Maintenance Requirements. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15. Pp. 660. Pp. 1-15.
- [11] Sevryugina N.S., Konev A.A., Shtyrkhunova N.A., Vakhrusheva I.A. Modeling and optimization of transportation operations for mining enterprises. *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*. 2025. No. 2. pp. 306-311.
- [12] Botti V., Omicini A. The Cognitive Approach in Multi-Agent Systems. *Knowledge Engineering Review*. 2019. V. 36. p. 394.
- [13] Bellifemine F., Caire G., Greenwood D. *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. Springer. 2007. 303 p.
- [14] Iris C., Lam J.S.L. A review of energy efficiency in ports: Operational strategies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. V. 112. Pp. 170-182.
- [15] Decarbonising Maritime Transport: Pathways to zero-carbon shipping by 2035. // OECD International Transport Forum. URL: [itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-maritime-transport.pdf](https://itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-maritime-transport.pdf). (date of access: 05/06/2026).



**ЮРКОМПАНИ**  
[www.law-books.ru](http://www.law-books.ru)

Юридическое издательство «ЮРКОМПАНИ»  
издает научные журналы:

- Научно-правовой журнал «Образование и право», рекомендованный ВАК Министерства науки и высшего образования России (специальности 12.00.01, 12.00.02), выходит 1 раз в месяц.
- Научно-правовой журнал «Право и жизнь», рецензируемый (РИНЦ, E-Library), выходит 1 раз в 3 месяца.