

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.05:656.615

DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1001-1008

Оптимизация параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов

Вадим Александрович Муря, Алексей Юрьевич Пономарев

*Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Роль портов в поддержке экономического роста, развития глобальных цепочек создания добавленной стоимости и логистических потоков неоспорима. В то время как неэффективные порты тормозят торговлю, нарушают транспортные потоки и повышают затраты, инфраструктура, готовая к будущему, привлекает инвестиции и поддерживает экономическое развитие. Однако строительство портов является дорогостоящим элементом и включает в себя длительные периоды планирования, консультаций и строительства. Эксплуатация и управление портами также требуют специализированной рабочей силы и опыта. Цель исследования заключается в рассмотрении подходов к оптимизации параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов.

Материалы и методы. Исследование основано на системном и синтетическом подходах, включающих теоретический анализ литературы, обобщение существующих моделей и подходов к строительству портовых объектов, а также математическое моделирование. Использовались методы стохастической и адаптивной оптимизации, обеспечивающие учет неопределенности технологических, логистических и природных факторов в процессе возведения портовых объектов.

Результаты. Предложена интеллектуально-адаптивная модель многокритериальной оптимизации организационно-технологических систем строительства портовых объектов. Авторская модель обеспечивает робастное, адаптивное и самообучающееся управление строительством портовых объектов, минимизируя отклонения от плана, повышая эффективность использования ресурсов, сокращая сроки и риски, а также интегрируя многокритериальные цели в условиях высокой стохастичности и ограниченных пространственных ресурсов.

Выводы. Предложенная модель позволяет перейти от статического планирования строительных работ к адаптивному управлению, устойчивому к фактическим технологическим отклонениям. Применение на практике этой модели предоставит возможность не просто корректировать график, но и накапливать верифицированные данные для обновления стандартов и развития будущих практик строительства портовых объектов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: порт, строительство, сроки, план, управление, оптимизация, технологический процесс

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Муря В.А., Пономарев А.Ю. Оптимизация параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов // Вестник МГСУ. 2026. Т. 21. Вып. 6. С. 1001–1008. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1001-1008

Автор, ответственный за переписку: Алексей Юрьевич Пономарев, ntcmost@mail.ru.

Optimization of process parameters and construction management systems for port facilities

Vadim A. Murya, Alexei Yu. Ponomarev

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The role of ports in supporting economic growth, global value chains, and logistics flows is undeniable. While inefficient ports slow down trade, disrupt transport flows, and increase costs, future-ready infrastructure attracts investment and supports economic development. However, port construction is costly and involves lengthy periods of planning, consultation and construction. Port operation and management also require a specialized workforce and expertise. The purpose of this paper is to examine approaches to optimizing the parameters of technological processes and systems for organizing the construction of port facilities.

Materials and methods. The study is based on systematic and synthetic approaches, including theoretical analysis of the literature, generalization of existing models and approaches to the construction of port facilities, and mathematical modeling.

In addition, the work used methods of stochastic and adaptive optimization, which take into account the uncertainty of technological, logistical, and natural factors in the process of constructing port facilities.

Results. The paper proposes an intelligent adaptive model for multi-criteria optimization of organizational and technological systems for the construction of port facilities. The author's model provides robust, adaptive, and self-learning management of port facility construction, minimizing deviations from the plan, increasing the efficiency of resource use, reducing time and risks, and integrating multi-criteria objectives in conditions of high stochasticity and limited spatial resources.

Conclusions. The model proposed in this work provides a transition from static planning of construction work to adaptive management that is resistant to actual technological deviations. The practical application of this model will allow not only to adjust the schedule, but also to accumulate verified data for updating standards and developing future practices for the construction of port facilities.

KEYWORDS: port, construction, deadlines, plan, management, optimization, technological process

FOR CITATION: Murya V.A., Ponomarev A.Yu. Optimization of process parameters and construction management systems for port facilities. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2026; 21(6):1001-1008. DOI: 10.22227/1997-0935.2026.6.1001-1008 (rus.).

Corresponding author: Alexei Yu. Ponomarev, ntcmost@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Порты и соответствующая прилегающая инфраструктура являются важнейшими элементами морского сектора. В условиях продолжающегося роста мировой торговли развитие портов играет ключевую роль в обеспечении эффективного перемещения грузов и стимулировании экономического подъема [1]. В последние годы на первый план вышли различные тенденции, направленные на удовлетворение растущих потребностей судоходной отрасли, решение экологических проблем и развитие технологий. Появление этих возможностей ставит перед отраслью серьезные задачи, которые необходимо решать одновременно в условиях конкурирующих приоритетов.

Портовые терминалы, включая контейнерные, грузовые, транспортные, состоят из интегрированных систем сервисных служб и вспомогательных конструкций. Строительство, техническое обслуживание и модернизация этих элементов требуют значительных капиталовложений [2]. Кроме того, с практической точки зрения не подлежит сомнению тот факт, что пространственные проблемы не утрачивают своей актуальности. В данном контексте целесообразно выделить три ключевых аспекта.

1. Оптимизация и рациональное использование территориальных ресурсов. Ограниченность доступных площадей создает сложности при размещении различных объектов и их интеграции с основной портовой функцией. Балансирование между наземной транспортной инфраструктурой, промышленным и жилым строительством требует нетривиальных усилий, поскольку все они соперничают за место в очень ограниченном пространстве [3]. В связи с этим необходимо тщательное планирование и оптимизация технологических процессов с участием широкого круга заинтересованных сторон, чтобы максимизировать экономические и социальные выгоды во всех секторах.

2. Порты и судоходство пересекаются по функциональным интересам с экологическими требованиями, коммунальными и телекоммуникационными системами, а также возобновляемыми источниками

энергии, что предполагает тщательную организацию для минимизации возможных конфликтов.

3. Изменение климата привело к подъему уровня воды и учащению экстремальных погодных явлений, что делает необходимым усиление, повышение и укрепление портовой инфраструктуры [4]. Это, в свою очередь, влияет на финансирование, потребление энергии и расход материалов, что представляет сложность при стремлении достичь показателя «чистого нуля» с ограниченными ресурсами.

Учитывая обозначенные факты, развитие портовой инфраструктуры — это постоянный поиск компромиссов с природными факторами и непрерывный инвестиционный цикл для защиты цепочек поставок в настоящем, а также для обеспечения экологичности глобальной торговли в будущем. Очевидно, что в этих новых обстоятельствах традиционные методы организации строительства портовых объектов системно неэффективны, приводя к колоссальным потерям времени и денег, о чем наглядно свидетельствует статистика возведения, модернизации и улучшения портов в различных странах мира (табл.).

Таким образом, изучение новых технологий строительства портовых сооружений с учетом важных тенденций, определяющих будущее портовой инфраструктуры, включая автоматизацию, устойчивое развитие, взаимосвязанность и инновационные решения для портовых систем, представляет собой актуальное направление для научного поиска, что и предопределило выбор темы данной статьи.

Решением проблем, связанных с обеспечением устойчивости портов и портовых городов, а также разработкой методов по снижению рисков для контейнерных и терминальных сооружений, обусловленных как климатическими угрозами, так и увеличением грузооборота, занимаются Q. Ren [4], Л.А. Андреева, А.Л. Кузнецов, А.М. Сампиев, А.Д. Семенов [5], М.А. Фомин, М.В. Золотарева [6], F. Pian и соавт. [7].

Перспективы использования передовых технологических решений, новых строительных материалов и инноваций с целью оптимизации процесса возведения портовых сооружений описывают L. Wen и соавт. [8], А.А. Зыкова, А.В. Кириченко, В.Э. Гет-

Статистика проблем при реализации крупных инфраструктурных портовых проектов¹

Statistics of problems in the implementation of large infrastructure port projects¹

Показатель / Indicator	Среднемировое значение, % The global average, %	Значение по региону Европа, Ближний Восток и Африка, % Value by region EMEA, %	Примечание / Note
Превышение сметной стоимости Exceeding the estimated cost	+38	25–45	Среднее превышение бюджета проекта над плановым The average excess of the project budget over the planned one
Отставание от графика (срыв сроков) Lagging behind schedule (missed deadlines)	+55	40–70	Среднее увеличение фактического времени реализации проекта Average increase in the actual project implementation time
Недостижение плановых выгод Failure to achieve planned benefits	–35	30–50	Проект генерирует меньше пользы (например, пропускной способности), чем ожидалось The project generates less benefits (e.g. bandwidth) than expected
Рост производительности труда (в год) Labour productivity growth (per year)	~1	0,8	Низкие темпы роста по сравнению с другими отраслями Low growth rates compared to other industries
Доля проблемных проектов The proportion of problematic projects	~30	28	Проекты, требующие реструктуризации или находящиеся под угрозой остановки Projects that require restructuring or are in danger of being shut down

ман [9], А.А. Алексеева, А.А. Крылов, В.А. Панасюк, В.М. Абрамов [10].

Возможности платформ управления активами, которые целесообразно применять в процессе строительства в портах, поскольку они помогают лучше планировать и координировать работу на загруженных объектах, обеспечивая максимальную отдачу от существующих активов и предоставляя полную информацию о состоянии объекта наблюдения, рассматривают Н.А. Гринько, Е.М. Коринец [11], S. Zhou, X. Guo, S. Cao [12], M.N. Maphumulo, M.M. Masuku [13], M.T. Elnabwy и соавт. [14].

В то же время, отдавая должное накопленному на сегодняшний день научному наследию, следует отметить, что с учетом жестких экологических норм, высоких требований к соблюдению сроков и бюджетов строительных проектов ряд вопросов в данной предметной плоскости нуждается в дальнейшем более углубленном изучении. Например, необходимы уточнения решения, которые позволят совместную реализацию портовых проектов с участием заинтересованных сторон в условиях ограниченного пространства. Также особого внимания заслуживают подходы к оптимальному использованию материалов на строительной площадке, позволяющие удовлетворить требования нулевых выбросов.

С учетом вышеизложенного цель статьи заключается в рассмотрении походов к оптимизации параметров технологических процессов и систем организации строительства портовых объектов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование основано на системном и синтетическом подходах, включающих теоретический анализ литературы, обобщение существующих моделей и принципов к строительству портовых объектов, а также математическое моделирование. Использовались методы стохастической и адаптивной оптимизации, обеспечивающие учет неопределенности технологических, логистических и природных факторов в процессе возведения портовых объектов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Строительство портовых объектов относится к числу одной из самых сложных и трудоемких форм строительства. В отличие от наземных проектов, которые реализуются на относительно стабильном грунте и в предсказуемых условиях, порты строятся на границе суши и моря — в динамичной среде, подверженной воздействию приливов, волн, течений и штормов [15, 16]. Учитывая динамичность и нестационарность мирового океана, портовые сооружения должны быть

¹ Составлено авторами с использованием отчетов IPA (Infrastructure and Projects Authority), McKinsey & Company.

1003

спроектированы так, чтобы выдерживать постоянные нагрузки, давление и эрозию в агрессивной соленой среде. Еще до начала строительства необходимо провести обширные геотехнические исследования и изучить побережье, чтобы понять состояние морского дна, колебания приливов и отливов, движение отложений и волновой климат [17, 18].

В то же время порт, как отмечалось ранее, — это не только морская инфраструктура, он также должен быть органично интегрирован с наземной логистикой — складами, кранами, инженерными сетями, дорогами и железнодорожными соединениями, чтобы функционировать надежно и стабильно, обеспечивая непрерывность цепочек поставок [19].

Таким образом, принимая во внимание вышеизложенное, управление строительством портовых объектов представляет собой задачу многокритериальной оптимизации в условиях действия факторов различной природы и направленности [20]. Такая постановка вопроса относится к классу NP-трудных стохастических задач планирования. Традиционные детерминированные методы управления являются недостаточными и методологически ограниченными для нивелирования и уменьшения рисков, связанных с возведением портовой инфраструктуры на сегодняшний день. Кроме того, в процессе их использования возникают проблемы с учетом различных типов неопределенности, порожденных возмущениями окружающей среды, а именно:

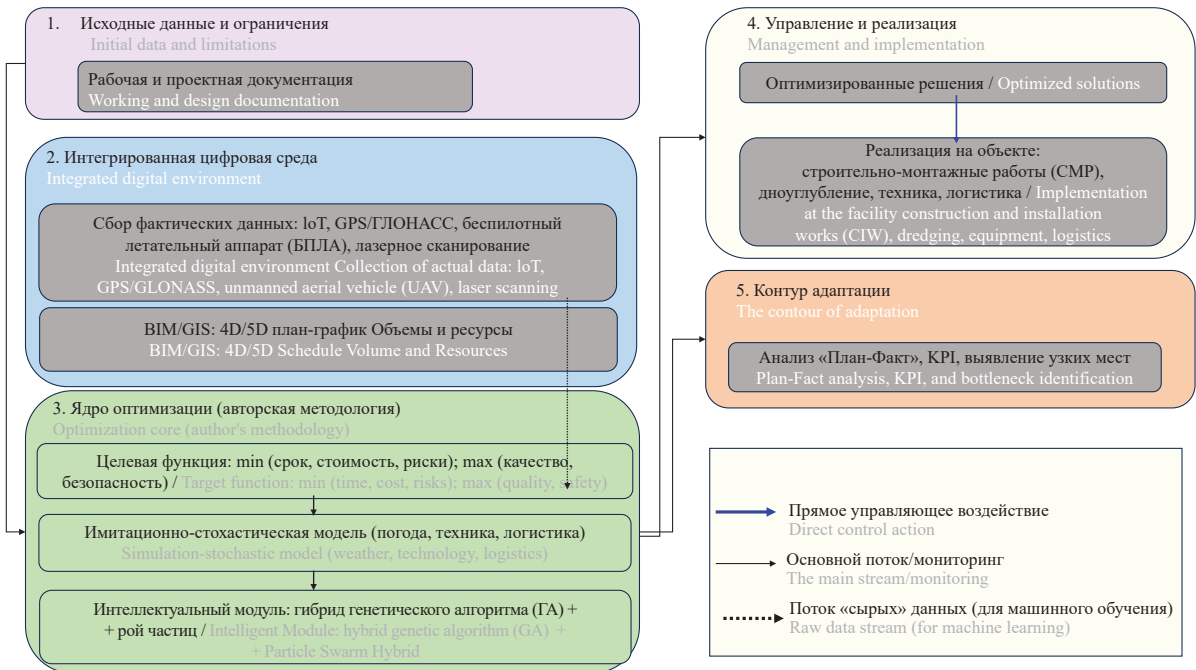
- внешняя стохастичность: погодные и гидрологические условия (волнение, ветер, осадки), влияющие на работу флота и техники;

- внутренняя технологическая вариативность: неполнота собираемых сведений о фактических параметрах строительных процессов. Например, производительность дноуглубления, свайных работ, работ по разработке котлованов напрямую зависят от реальных свойств грунтов (категории, наличия посторонних предметов, валунов), которые зачастую отличаются от данных геологических изысканий;

- организационно-логистическая неопределенность: сбои в цепочках поставок, отказы техники, ошибки персонала.

Существующие на сегодняшний день подходы к оптимизации, которые предполагают фиксацию технологических параметров в виде констант, игнорируют реальные отклонения от плана. Это приводит к неконтролируемому накоплению этих отклонений и, как следствие, к системному срыву сроков. В связи с этим возникает научная проблема разработки робастной (устойчивой) киберфизической системы, способной адаптивно управлять проектом строительства портовой инфраструктуры. Помимо этого, ожидается, что она позволит интегрировать многокритериальные, конфликтующие цели (сроки, затраты, риски, качество, безопасность) и будет адаптироваться к динамически изменяющимся условиям на основе непрерывной интеграции данных.

На рисунке представлена разработанная авторами архитектура киберфизической системы с замкнутым контуром, которая позволит реализовывать многокритериальную оптимизацию организационно-технологических систем строительства портовых объектов.



Интеллектуально-адаптивная модель многокритериальной оптимизации организационно-технологических систем строительства портовых объектов (составлено авторами)

Intellectual and adaptive model of multi-criteria optimization of organizational and technological systems for the construction of port facilities (compiled by the authors)

Предлагаемая на рисунке модель реализует архитектуру киберфизической системы с замкнутым контуром. Она интегрирует физический уровень (объект) с цифровым (модель) и интеллектуальным (ядро принятия решений). Рассмотрим структуру модели более подробно.

Входные данные: формализуют пространство статических ограничений P и исходных параметров (проект, гео- и гидроусловия, нормативы и т.д.).

Интегрированная цифровая среда: функционирует как подсистема сбора и агрегации данных. Информационные и геоинформационные модели представляют плановое состояние объектов строительства. Сенсоры и системы сканирования позволяют получить фактические данные. Цифровой двойник выполняет функцию оценки, синтезируя актуализированный вектор состояния системы $X_{DT}(t)$.

Ядро оптимизации: центральный вычислительный блок, реализующий авторскую методологию робастной оптимизации.

Управление и реализация: подсистема трансляции выработанных ядром управляющих векторов P_{opt} в физические (стратегические и оперативные) решения.

Контур адаптации и самообучения: ключевой кибернетический контур. Он не просто фиксирует отклонения $\in(t)$, а инициирует параметрическую адаптацию ядра оптимизации, обеспечивая его устойчивость и эволюцию системы.

Математическая постановка задачи заключается в следующем.

Пусть P вектор управляющих параметров системы (распределение ресурсов, последовательность операций, логистические маршруты), принадлежащий допустимому множеству P . Задача формулируется как многокритериальная оптимизация. Цель — найти не единственное решение, а множество парето-оптимальных решений P_{opt} :

$$P_{opt} = \arg \max_{P \in P} F(P),$$

где $F(P)$ — векторная целевая функция. Для приведения к задаче максимизации минимизируемые критерии берутся с отрицательным знаком:

$$F(P) = \begin{bmatrix} -f_T(P) \\ -f_C(P) \\ -f_R(P) \\ -f_Q(P) \\ -f_S(P) \end{bmatrix};$$

$$P = \{P | g_i(P) \leq 0, i = 1 \dots m\},$$

где f_T — время; f_C — стоимость; f_R — риски; f_Q — качество; f_S — безопасность; $g_i(P)$ — система линейных и нелинейных ограничений (ресурсных, нормативных).

Фактические параметры реализации строительного проекта по возведению портового объекта $X_{fact}(t)$

рассматриваются как стохастический процесс, отклоняющийся от детерминированного плана $X_{plan}(t)$ на величину вектора возмущений $\in(t)$.

Предположение о нормальном распределении возмущений N с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей Σ является базовым. Научная новизна разработанной авторами модели заключается в том, что матрица Σ не является статической. Контур адаптации непрерывно переоценивает ее компоненты на основе фактических данных, адаптируя модель к реальной волатильности.

Цифровой двойник (DT) выполняет функцию фильтра, рекурсивно оценивая истинное состояние системы $X_{DT}(t)$ путем слияния плановых и фактических данных:

$$X_{DT}(t) = f_{DT}(X_{fact}(t), X_{plan}(t)).$$

Именно актуализированное состояние $X_{DT}(t)$, а не план $X_{plan}(t)$ подается на вход ядра оптимизации для следующей итерации расчета.

Систематизируя вышеизложенное, можно выделить элементы научной новизны разработанной авторами модели.

1. Связь многокритериальной оптимизации с фактическими технологическими данными. В отличие от существующих подходов, фокусирующихся на логистической неопределенности (поставки, отказы), эта модель обеспечивает жесткую связь стохастического оптимизатора с DT. Новизна заключается в том, что DT в реальном времени поставляет в ядро оптимизации фактические технологические параметры (например, реальное сопротивление грунтов, производительность бурового оборудования), а не только логистические. Это позволяет перейти от статичного планирования к адаптивному управлению в реальном времени, которое устойчиво к фактическим отклонениям в технологических процессах.

2. Реализация оптимизации через самообучение. Интеллектуальный модуль (генетический алгоритм + рой частиц) решает NP-трудную задачу поиска в многомерном пространстве P . При этом самообучающийся блок (на основе машинного обучения) реализует мета-оптимизацию: он не только прогнозирует KPI, но и (через тактический контур) адаптивно корректирует гиперпараметры эвристических алгоритмов и весовые коэффициенты в целевой функции $F(P)$, реагируя на изменение приоритетов и параметров строительного проекта.

3. Иерархическая трехуровневая адаптация. Архитектурная новизна модели заключается в реализации трех иерархических контуров обратной связи, которые и обеспечивают самообучение и робастность системы:

- оперативный контур (от физического объекта к DT): обеспечивает непрерывную актуализацию вектора состояния системы;
- тактический контур (от блока «Базы знаний» к «Ядру оптимизации»): выполняет параметриче-

скую адаптацию самой модели. Он не просто корректирует график, а обновляет параметры стохастической технологической модели (например, уточняет геологическую модель или модель производительности на основе $\epsilon(t)$);

- стратегический контур (от «Решений» к «Исходным данным»): реализует долгосрочную обратную связь. Он использует статистику завершенного проекта по строительству портовой инфраструктуры, чтобы исправить и обновить исходные нормативы и стандарты (базу знаний) для будущих проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Строительство портов сопряжено с логистическими и финансовыми трудностями, а также с рядом технических и экологических препятствий. Задача усложняется на фоне перманентно растущих ожиданий в отношении устойчивого развития и необходи-

мости конструктивного взаимодействия с местным сообществом в плане развития прилегающей инфраструктуры. Это в свою очередь выдвигает на первый план задачи оптимизации и повышения эффективности строительного процесса.

Описана разработанная авторами интеллектуально-адаптивная модель многокритериальной оптимизации организационно-технологических систем строительства портовых объектов, которая позволит обеспечить гибкое управление строительством портовых объектов в реальном времени, интегрируя технологические, логистические и стохастические данные. Ожидается, что это даст возможность минимизировать отклонения от плана, повысить эффективность использования ресурсов, сократить сроки и риски, а также сформировать устойчивую и самообучающуюся систему планирования и контроля для комплексных портовых проектов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Николаева А.Б. Развитие портовой инфраструктуры как потенциал для увеличения грузооборота Северного морского пути // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2023. Т. 26. № 3 (81). С. 140–149. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2023.81.009. EDN CUHUBA.

2. Воронина Е.П. Основные направления устойчивого функционирования и приоритеты развития Северного морского пути в качестве конкурентоспособной национальной транспортной коммуникации // Арктика 2035: актуальные вопросы, проблемы, решения. 2023. № 4 (16). С. 39–50. DOI: 10.51823/74670_2023_4_39. EDN EGKZGQ.

3. Lin W., Liu W. Resilience Evaluation of Ports along the Maritime Silk Road from the Perspective of Investment and Construction // Journal of Advanced Transportation. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–18. DOI: 10.1155/2023/8818667. EDN JFKXRI.

4. Ren Q. Comparison and Cost Analysis of Soft Soil Foundation Treatment Schemes in Port Construction // Advances in Civil Engineering. 2022. Vol. 2022. Issue 1. DOI: 10.1155/2022/6442750. EDN LQPVFR.

5. Андреева Л.А., Кузнецов А.Л., Сампиев А.М., Семенов А.Д. Задачи совершенствования методов технологического проектирования морских торговых портов в новых условиях // Транспортное дело России. 2024. № 1. С. 164–166. EDN CERHHD.

6. Фомин М.А., Золотарева М.В. Преобразование объектов портовой инфраструктуры на примере Нью-Йорка // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2025. Т. 27. № 1. С. 70–81. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-70-81. EDN DYDMPF.

7. Pian F., Shi Q., Yao X., Zhu H., Luan W. Joint Optimization of a Dry Port with Multilevel Location

and Container Transportation: The Case of Northeast China // Complexity. 2021. Vol. 2021. Issue 1. DOI: 10.1155/2021/5584600. EDN EDQLFD.

8. Wen L., Ren Q., Li J. Hainan Port Logistics Supply Chain and Its Flexible Operation Mechanism considering Digital Visual Remote Control // Mobile Information Systems. 2022. Vol. 2022. Pp. 1–12. DOI: 10.1155/2022/4642103. EDN MUJBBC.

9. Зыкова А.А., Кириченко А.В., Гетман В.Э. Влияние развития Северного морского пути на портовую инфраструктуру России // Актуальные проблемы экономики и управления. 2022. № 1 (11). С. 125–130. DOI: 10.52899/978-5-88303-644-5_125. EDN AZFXDH.

10. Алексеева А.А., Крылов А.А., Панасюк В.А., Абрамов В.М. Проблемы и перспективы развития портовой инфраструктуры // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № 3 (43). С. 69–76. EDN FIKDRP.

11. Гринько Н.А., Коринец Е.М. Особенности применения геоинформационных систем в развитии портовой инфраструктуры // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S2. С. 25–27. EDN YLOIXC.

12. Zhou S., Guo X., Cao S. Enhanced Energy Sharing and Management Between Cross-Harbour Zero-Emission Buildings Based on a Combination of Electric Ferries and Deck-on Electric Vehicles with Grid Integrations // International Journal of Energy Research. 2025. Vol. 2025. Issue 1. DOI: 10.1155/er/9606817. EDN UHPQXJ.

13. Maphumulo M.N., Masuku M.M. The State of Infrastructure in the Proclaimed Small Harbours in Enhancing Livelihoods in South Africa // Journal of International Development. 2025. Vol. 37. Issue 2. Pp. 457–467. DOI: 10.1002/jid.3968. EDN CXQHLW.

14. Elnabwy M.T., Elbeltagi E., El Banna M.M., Alshahri A.H., Hu J.W., Choi B.G. et al. Harbor Sedimentation Management Using Numerical Modeling and Exploratory Data Analysis // *Advances in Civil Engineering*. 2024. Vol. 2024. Issue 1. DOI: 10.1155/2024/1209460. EDN BEFFT.

15. Almeida F., Okon E. Achieving sustainable development goals through digitalization in ports // *Business Strategy and the Environment*. 2024. Vol. 33. Issue 7. Pp. 6737–6747. DOI: 10.1002/bse.3842. EDN VYMPQA.

16. Кочурова А.А. Способы расшивки «узких мест» портовой инфраструктуры Арктического побережья России // *Экономика и предпринимательство*. 2022. № 11 (148). С. 527–529. DOI: 10.34925/EIP.2022.148.11.099. EDN ISKTYU.

17. Коваль В.Н., Процевский В.А., Морозова А.Н. Особенности правового регулирования частных инте-

ресов в процессе функционирования портовой инфраструктуры // *Власть Закона*. 2023. № 3 (55). С. 35–48. EDN ZRZXRT.

18. Яценко А.И., Белый А.А., Никитчин А.А., Бернд О.Х. Применение автоматизированной системы деформационного мониторинга для обеспечения безопасной эксплуатации сооружений портовой и транспортной инфраструктуры // *Путевой навигатор*. 2024. № 59 (85). С. 58–65. EDN ZOSAOM.

19. Gonçalves A., de Aguiar Dutra A.R., de Andrade Guerra J.B.S.O., Dutra A. Ports and Climate Change: A Systematic Review Aligned with the Sustainable Development Goals // *Sustainable Development*. 2025. Vol. 34. Issue S2. Pp. 390–402. DOI: 10.1002/sd.70352. EDN RNXXTV.

20. Yuan Y., Sui Z. Application status and developing trend of emerging technologies in smart port // *China Water Transport*. 2022. Vol. 3. Pp. 60–62.

Поступила в редакцию 7 ноября 2025 г.

Принята в доработанном виде 4 февраля 2026 г.

Одобрена для публикации 1 марта 2026 г.

ОБ АВТОРАХ: **Вадим Александрович Мурия** — кандидат технических наук, доцент; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 927045, Scopus: 59181231800, ResearcherID: AEX-9031-2022; 89166772070@mail.ru;

Алексей Юрьевич Пономарев — аспирант; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; ResearcherID: PMR-2789-2026, ORCID: 0009-0005-3249-4521; ntmmost@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Nikolaeva A.B. Enhancing cargo capacity along the northern sea route through harbor infrastructure development. *Sever i rynok: formirovanie ekonomicheskogo por-yadka*. 2023; 26(3):(81):140-149. DOI: 10.37614/2220-802X.3.2023.81.009. EDN CUHUBA. (rus.).

2. Voronina E.P. The main directions of sustainable functioning and priorities for the development of the northern sea route as a competitive national transport communication. *Arctic 2035: Current Issues, Challenges, Solutions*. 2023; 4(16):39-50. DOI: 10.51823/74670_2023_4_39. EDN EGKZGQ. (rus.).

3. Lin W., Liu W. Resilience Evaluation of Ports along the Maritime Silk Road from the Perspective of Investment and Construction. *Journal of Advanced Transportation*. 2023; 2023:1-18. DOI: 10.1155/2023/8818667. EDN JFKXRI.

4. Ren Q. Comparison and Cost Analysis of Soft Soil Foundation Treatment Schemes in Port Construction. *Advances in Civil Engineering*. 2022; 2022(1). EDN LQPVFR.

5. Andreeva L., Kuznetsov A., Sampiev A., Semenov A. Tasks of improving methods of technological design of trade sea ports in new conditions. *Transport business of Russia*. 2024; 1:164-166. EDN CERHHD. (rus.).

6. Fomin M.A., Zolotareva M.V. Port infrastructure conversion in New York city as an example. *Journal of Construction and Architecture*. 2025; 27(1):70-81. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-1-70-81. EDN DYDMPF. (rus.).

7. Pian F., Shi Q., Yao X., Zhu H., Luan W. Joint Optimization of a Dry Port with Multilevel Location and Container Transportation: The Case of Northeast China. *Complexity*. 2021; 2021(1). DOI: 10.1155/2021/5584600. EDN EDQLFD.

8. Wen L., Ren Q., Li J. Hainan Port Logistics Supply Chain and Its Flexible Operation Mechanism considering Digital Visual Remote Control. *Mobile Information Systems*. 2022; 2022:1-12. DOI: 10.1155/2022/4642103. EDN MUJBBC.

9. Zytkova A.A., Kirichenko A.V., Hetman V.E. The impact of the development of the northern sea route

on the port infrastructure of Russia. *Actual Problems of Economics and Management*. 2022; 1(11):125-130. DOI: 10.52899/978-5-88303-644-5_125. EDN AZFXDH. (rus.).

10. Alekseeva A.A., Krylov A.A., Panasyuk V.A., Abramov V.M. Problems and prospects of port infrastructure development. *Information technologies and systems: management, economics, transport*. 2022; 3(43):69-76. EDN FIKDRP. (rus.).

11. Grinko N.A., Korinets E.M. Features of the application of geoinformation systems in the development of port infrastructure. *Information technologies and systems: management, economics, transport, law*. 2022; S2:25-27. EDN YLOIXC. (rus.).

12. Zhou S., Guo X., Cao S. Enhanced Energy Sharing and Management Between Cross-Harbour Zero-Emission Buildings Based on a Combination of Electric Ferries and Deck-on Electric Vehicles with Grid Integrations. *International Journal of Energy Research*. 2025; 2025(1). DOI: 10.1155/er/9606817. EDN UHPQXJ.

13. Maphumulo M.N., Masuku M.M. The State of Infrastructure in the Proclaimed Small Harbours in Enhancing Livelihoods in South Africa. *Journal of International Development*. 2025; 37(2):457-467. DOI: 10.1002/jid.3968. EDN CXQHLW.

14. Elnabwy M.T., Elbeltagi E., El Banna M.M., Alshahri A.H., Hu J.W., Choi B.G. et al. Harbor Sedimentation Management Using Numerical Modeling and Exploratory Data Analysis. *Advances in Civil Engineer-*

ing. 2024; 2024(1). DOI: 10.1155/2024/1209460. EDN BEFFT.

15. Almeida F., Okon E. Achieving sustainable development goals through digitalization in ports. *Business Strategy and the Environment*. 2024; 33(7):6737-6747. DOI: 10.1002/bse.3842. EDN VYMPQA.

16. Kochurova A.A. Ways to relieve the “bottle-necks” of the port infrastructure arctic coast of Russia. *Economics and Entrepreneurship*. 2022; 11(148):527-529. DOI: 10.34925/EIP.2022.148.11.099. EDN ISKTYU. (rus.).

17. Koval V.N., Protsevskiy V.A., Morozova A.N. Peculiarities of legal regulation of private interests in the process of functioning of port infrastructure. *The Rule of Law*. 2023; 3(55):35-48. EDN ZRZXRT. (rus.).

18. Jashhenko A.I., Belyj A.A. Application of an automated deformation monitoring system to ensure the safe operation of port and transport infrastructure facilities. *Road Navigator*. 2024; 59(85):58-65. EDN ZOSAOM. (rus.).

19. Gonçalves A., de Aguiar Dutra A.R., de Andrade Guerra J.B.S.O., Dutra A. Ports and Climate Change: A Systematic Review Aligned with the Sustainable Development Goals. *Sustainable Development*. 2025; 34(S2):390-402. DOI: 10.1002/sd.70352. EDN RNXXTV.

20. Yuan Y., Sui Z. Application status and developing trend of emerging technologies in smart port. *China Water Transport*. 2022; 3:60-62.

Received November 7, 2025.

Adopted in revised form on February 4, 2026.

Approved for publication on March 1, 2026.

B I O N O T E S : **Vadim A. Murya** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 927045, Scopus: 59181231800, ResearcherID: AEX-9031-2022; 89166772070@mail.ru;

Alexei Yu. Ponomarev — аспирант; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ResearcherID: PMR-2789-2026, ORCID: 0009-0005-3249-4521; ntcmost@mail.ru.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.