

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВКИ ОТКРЫТЫХ СКЛАДСКИХ ПЛОЩАДОК ПОРТОВ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

А. В. Галин, Д. В. Гольдинов

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

Настоящая статья посвящена актуальной проблеме оптимизации планировки открытых складских площадок для контейнеров и генеральных грузов портов Северного морского пути. Предложена расчетная модель, направленная на максимизацию вместимости склада с учетом геометрических параметров грузовых мест, технологических проездов и ограничений нагрузки на покрытие. Модель, реализованная в формате электронных таблиц с поддержкой исполняемых программных модулей (макросов), включает учет параметров грузовых мест: длины, ширины, массы, допустимой нагрузки и предназначена для оптимизации размещения штабелей груза с варьированием количества грузовых мест по длине и ширине штабелей. Рассматриваются два варианта компоновки складской площадки: «продольный» (размещение грузовых мест длинной стороной вдоль длинной стороны земельного участка размещения склада) и «поперечный» (размещение грузовых мест широкой стороной вдоль длины участка). Приведены формулы преобразования произвольных прямоугольных участков к стандартной форме для расчетов. На примере 20-футовых контейнеров показано, что оптимальная вместимость склада не всегда достигается при максимальной длине и ширине штабелей, размещаемых на складе, что подтверждает необходимость проведения точных расчетов. Модель полезна для проектирования новых и оптимизации существующих складов генеральных грузов и контейнеров, особенно в портах Северного морского пути с ограниченной инфраструктурой. Модель имеет ряд ограничений и упрощений (однородность грузов, прямоугольная форма участков расположения складов), которые задают направления для дальнейшего развития, включая работу с многоугольными площадками и разнотипными грузами. На основе проведенного исследования сформулированы выводы об эффективности модели и оптимальности компоновок складов.

Ключевые слова: контейнерный терминал, оптимизация склада, Северный морской путь, математическое моделирование, генеральные грузы, транспортная артерия, годовой грузооборот, статистика, финансовые вложения, эффективная перегрузка.

Для цитирования:

Галин А. В. Разработка модели для оптимизации планировки открытых складских площадок портов Северного морского пути / А. В. Галин, Д. В. Гольдинов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 204–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-204-215. — EDN CVYHCZ.

MODEL DEVELOPMENT FOR OPTIMIZATION OF THE LAYOUT OF OPEN STORAGE AREAS OF NORTHERN SEA ROUTE PORTS

A. V. Galin, D. V. Goldinov

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

This paper is devoted to the current problem of optimization of the layout of open storage areas for containers and general cargo of Northern Sea Route ports. A computational model aimed at maximizing storage capacity taking into account the geometric parameters of cargo units, technological aisles, and pavement load constraints is proposed. The model, implemented in the form of a spreadsheet with executable modules (macros), includes the parameters of cargo units (length, width, weight, permissible load) and is intended to optimize the placement of cargo stacks by varying the number of cargo units along the length and width of the stacks. Two layout variants of the storage area are considered: “longitudinal” (placement of cargo units with the long side along the long

side of the storage site) and “transverse” (placement of cargo units with the wide side along the length of the site). Formulas for transforming arbitrary rectangular plots into a standard form for calculations are presented. Using the example of 20-foot containers, it is shown that optimal storage capacity is not always achieved with maximum stack length and width placed in the storage area, which confirms the need for precise calculations. The model is useful for the design of new and optimization of existing storage areas for general cargo and containers, especially in Northern Sea Route ports with limited infrastructure. The model has a number of limitations and simplifications (homogeneity of cargo, rectangular shape of storage area plots), which define directions for further development, including the use of polygonal plots and different types of cargo. Based on the results of the study, conclusions are drawn regarding the effectiveness of the model and the optimality of storage area layouts.

Keywords: container terminal, storage layout optimization, Northern Sea Route, mathematical modeling, general cargo.

For citation:

Galina, Aleksandr V. and D. V. Goldinova. “Model development for optimization of the layout of open storage areas of northern sea route ports.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 204–215. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-204-215.

Введение (Introduction)

Северный морской путь (СМП) продолжает оставаться одной из наиболее перспективных транспортных артерий современной Российской Федерации. Важность этого маршрута подтверждается существенным ростом объема годовых грузооборотов с середины 2010-х гг. до настоящего времени. Например, автор статьи [1] приводит статистику грузооборота СМП, согласно которой начиная с 2015–2016 гг. отмечается стремительный рост грузооборота с 5–7 млн т в год до почти 35 млн т в год в 2022 г. Динамика изменения грузооборота по СМП соответствует данным статьи [1]. Пандемия 2020 г. и санкции 2022 г. оказали некоторое влияние на этот грузопоток, но он все еще имеет очень высокие значения.

В 2024 г. по СМП прошел самый большой в истории этого транспортного маршрута контейнеровоз Flying Fish 1 (ледовый класс — ICE 1, длина — 294 м, осадка — 12,3 м, грузовая вместимость — 4843 TEU). В этом же году китайская транспортная компания NewNew Shipping Line в лице ее представителя Кэ Цзинь сообщила, что совместно с «Ростатомом» была открыта контейнерная линия, проходящая по СМП. Суда компании совершили 13 рейсов и перевезли 20 тыс. TEU за 2024 г.

Контейнеры являются одним из перспективных видов груза для транспортировки по Северному морскому пути. Это подтверждается заинтересованностью и реальными финансовыми вложениями не только со стороны Российской Федерации, но и со стороны зарубежных инвесторов. Так, например, в 2023 г. дочернее предприятие госкорпорации «Росатом» — «Русатом Карго» — и российское дочернее предприятие международного оператора контейнерных терминалов Dubai Ports World и DP World Russia FSE — зарегистрировали совместное предприятие в Москве под названием ООО «Международная контейнерная логистика» с уставным капиталом 960 млн руб. по данным Единого государственного реестра юридических лиц (ЕГРЮЛ). В январе 2023 г., согласно данным, доступным в ЕГРЮЛ, рост уставного капитала совместного предприятия составил 960 млн руб. до около 2,6 млрд руб. Такая активность доказывает актуальность транспортировки контейнеров по СМП. Необходимо также организовать эффективную перегрузку грузовых мест в начальной и конечной точке маршрута СМП. Для этого совместное предприятие «Русатом Карго» и Dubai Ports World планируют строительство одного контейнерного терминала в г. Мурманске (ООО «Западный транспортно-логистический узел») и одного контейнерного терминала на Дальнем Востоке РФ (предположительно в г. Владивостоке).

Во многих современных исследованиях рассматриваются проблемы строительства и развития морских портов в Арктической зоне. Так, например, в 2023 г. опубликовано исследование [2], авторы которого отмечают, что модернизация арктических портов требует внедрения технологий «умного порта» — автоматизации процессов, цифровизации логистики и использования Интернета вещей (IoT) для мониторинга процессов перегрузки.

Авторы исследования [3] отмечают, что транзитные контейнерные порты-хабы играют ключевую роль в повышении эффективности судоходства по СМП, обеспечивая перегрузку товаров с одного судна на другое в специально оборудованных портах. Геополитические и экономические факторы определяют развитие портов в Арктике: Россия стремится укрепить свою инфраструктуру, несмотря на санкции и геополитическую нестабильность, а климатические изменения и сокращение площади ледяного покрова делают СМП более привлекательным для судоходства. Однако при этом необходимо учитывать риски, связанные с суровыми погодными условиями и навигационной безопасностью.

В статье [4], опубликованной в 2023 г., авторы анализируют эффективность портов СМП с помощью метода анализа охвата данных (Data Envelopment Analysis, DEA) и индекса производительности Мальмквиста (Malmquist Index, MI). На основе результатов проведенного анализа авторы делают выводы о том, что порты СМП (например, Мурманск и Варандей) демонстрируют наибольшую эффективность и стабильный рост, в то время как эффективность таких портов, как Архангельск, Нарьян-Мар, Онега и Хатанга существенно ниже из-за нерационального использования причалов и существенной невостребованной длины причальной стенки. Кроме того, к причинам низкой эффективности портов относятся нерациональное использование техники персонала, а также сезонные ограничения навигации.

В отечественной научной литературе вопросы эффективности эксплуатации СМП и его портов стоят особенно остро. Например, автор статьи [5] предлагает методику планирования перевозок и выгрузки контейнеров во внепортовых условиях, что особенно актуально для портов СМП, поскольку портовая инфраструктура в этих регионах развита достаточно слабо. Автор работы [5] отмечает, что регулярный северный (экспедиционный) завоз является особой подсистемой перевозок, обеспечивающих жизнедеятельность удаленных пунктов в Арктической зоне. В статье рассматриваются три технологические схемы перегрузки контейнеров в условиях отсутствия полноценной портовой инфраструктуры: выгрузка с использованием плашкоутов, выгрузка вертолетами и применением саморазборных понтонов (лихтеров). Предлагаемая в статье методика позволяет определить наиболее эффективную схему на основе комплексного показателя для каждого конкретного случая перегрузки.

Авторы исследования [6] ставят в качестве цели разработку метода выбора оптимальных судоходных маршрутов в акватории СМП для обеспечения круглогодичной навигации. Авторы предлагают метод многокритериальной оценки альтернативных маршрутов, учитывающий такие критерии, как безопасность, время перехода, глубина, толщина льда и гидрографическая изученность. Результаты этого исследования показали, что более южные маршруты позволяют судам преодолеть акваторию СМП быстрее, но более северные маршруты являются более безопасными при наличии льда. При толщине льда 100 см и 200 см использование судов с ледовым классом Arc4 невозможно, а суда класса Arc7 могут использоваться только под проводкой ледоколов. Отмечается, что для круглогодичной навигации необходимо строительство новых судов, развитие навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения, а также создание единой сети информационно-измерительных комплексов.

Помимо общих вопросов эффективности портов и транспортных маршрутов в Арктической зоне России необходимо уделить внимание задаче, предлагаемой к рассмотрению в данной статье, а именно оптимизации размещения генеральных грузов или контейнеров на открытой складской площадке морского порта, т. е. вместимости (проектной или оперативной) открытой площадки. В статье [7] авторы предлагают математическую модель для оптимизации планировки складских штабелей на складах автоматизированных контейнерных терминалов с так называемой «перпендикулярной» конфигурацией (штабели контейнеров располагаются перпендикулярно линии корпуса причальной стенки). В модели учитывается количество рядов, ярусов и секций. Помимо геометрических параметров учитывается время цикла работы автоматизированных контейнеровозов (Automated Straddle Carriers, ASC), а также предлагается гибридный имитационно-аналитический подход для учета взаимных помех между ASC для повышения реалистичности оценки контейнеропотоков склада.

Авторы статьи [8] предлагают смешанную целочисленную нелинейную модель (Mixed Integer Non-Linear Programming Model, MINLP) для оптимизации использования складской территории на контейнерном терминале, учитывающей два типа штабелей: эксклюзивные (для конкретных грузоотправителей) и общие (динамически используемые всеми судами). Модель направлена на максимизацию дохода за счет сокращения потерь от неэффективных перестановок контейнеров и поддержания высокого уровня заполнения каждого штабеля контейнерами. Результаты проведенных численных экспериментов показали, что при недостаточном количестве штабелей контейнеров (например, 10 ед.) возникают дополнительные расходы, в то время как оптимальная конфигурация (разбивка склада на 20 штабелей) минимизирует простои оборудования.

В обзорной статье [9] выполнен системный анализ более 600 статей, опубликованных за период 20 лет, из которых выделены 75 наиболее релевантных работ по темам управления складскими площадями, автоматизированным оборудованием и интеграции планирования операций на контейнерных терминалах. Проанализированные авторами исследования разделены на четыре основных кластера: управление пространством (например, назначение слотов для хранения контейнеров на складе), работа автоматизированных перегружателей и транспортных средств, интегрированное планирование операций, управление терминалами в целом.

Все рассмотренные исследования в той или иной степени сфокусированы на оптимизации работы именно автоматизированных контейнерных терминалов. Под автоматизацией в данном случае понимается использование перегрузочного оборудования, работающего в автоматическом режиме, без постоянного участия человека в качестве оператора. Такие технологии являются перспективными, однако с трудом или малоприменимы на контейнерных терминалах в портах СМП (из-за погодных условий) и на терминалах обработки генеральных грузов (из-за большой вариативности характеристик грузовых мест).

В данном исследовании предлагается расчетная модель, которая может применяться в описанных условиях как на терминалах генгрузов, так и на контейнерных терминалах. В частности, рассматривается одно из возможных направлений оптимизации открытых складских площадок морских портов, закладываемое еще в период проектирования объекта, но имеющее большое значение во время эксплуатации портов.

Целью исследования является формирование модели оптимизации открытой складской площадки для максимизации вместимости. Открытая складская площадка может использоваться для хранения генеральных грузов или контейнерных грузов. К задачам исследования относятся формулировка математической модели, реализация модели в редакторе электронных таблиц, проведение серии расчетов на модели, описание результатов моделирования и формирование выводов на основе этих результатов.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Модель разработана в формате листа электронных таблиц с поддержкой макросов. Основные параметры и переменные модели представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры модели оптимизации открытой складской площадки

Table 1

Main parameters of the optimization model for an open storage area

Параметр	Обозначение	Ед. изм.	Описание
Длина грузового места	a	м	Задается пользователем
Ширина грузового места	b	м	Задается пользователем
Масса грузового места	m	т	Задается пользователем
Расстояние между грузовыми местами по длине	Δ_a	м	Задается пользователем
Расстояние между грузовыми местами по ширине	Δ_b	м	Задается пользователем

Таблица 1
(Окончание)

Ширина поперечного проезда между штабелями	A	м	Ширина проезда между штабелями по длинной стороне грузовых мест
Ширина продольного проезда между штабелями	B	м	Ширина проезда между штабелями по широкой стороне грузовых мест
Ширина проезда между ограждением площадки и штабелями	L	м	Ширина проезда по периметру складской площадки
Допустимая нагрузка на покрытие	q	т / м ²	Задается пользователем
Высота складирования грузовых мест	h	ярусов	Зависит от заданной допустимой нагрузки на покрытие и характеристик грузовых мест. Формула неприменима для контейнеров из-за особенностей распределения нагрузки на фитинги
Количество грузовых мест по длине штабеля	N_a	Ед.	Варьируемый моделью параметр
Количество грузовых мест по ширине штабеля	N_b	Ед.	Варьируемый моделью параметр
Координаты точек прямоугольного участка склада	(x_i, y_i)	—	Задается пользователем
Координаты точек приведённого прямоугольного участка склада	(x_{pi}, y_{pi})	—	Рассчитываются моделью
Координаты точек зоны складирования	(x_{li}, y_{li})	—	Рассчитываются моделью
Координаты точек приведённой зоны складирования	(x_{ri}, y_{ri})	—	Рассчитываются моделью
Длина штабеля груза	$L_{шт}$	м	Рассчитываются моделью
Ширина штабеля груза	$B_{шт}$	м	Рассчитываются моделью
Количество штабелей груза по длине складской площадки	$N_{L.шт}$	Ед.	Рассчитываются моделью
Количество штабелей груза по ширине складской площадки	$N_{B.шт}$	Ед.	Рассчитываются моделью
Вместимость открытой площадки хранения грузов	E	Ед. грузовых мест	Рассчитываются моделью (критерий оптимальности)

На рис. 1 приведены основные параметры грузовых мест и штабелей, используемые в модели. Длина одного грузового места задаётся параметром a , ширина — параметром b . Расстояния между грузовыми местами внутри штабеля составляют Δ_a и Δ_b , м. Ширина поперечного проезда между штабелями задается параметром A , ширина продольного проезда — параметром B .

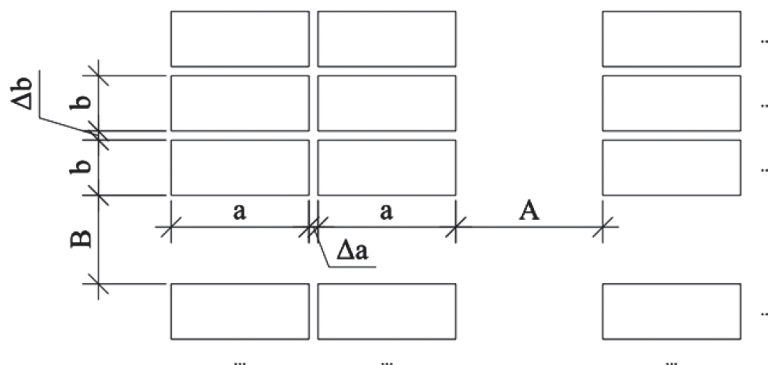


Рис. 1. Основные геометрические параметры грузовых мест и штабелей
Fig. 1. Main geometric parameters of cargo units and stacks

Высота складирования грузовых мест определяется либо исходя из массы одного грузового места m и допустимой нагрузки на покрытие площадки q — для грузовых мест с равномерным распределением массы по площади, занимаемой грузовым местом, либо на основе рекомендуемых показателей (например, на основе рекомендаций Норм технологического проектирования морских портов¹). В случае генеральных грузов с равномерно распределенной нагрузкой по площади грузового места применяется следующая формула для определения высоты складирования:

$$h = [q / (m / (a \cdot b))]. \quad (1)$$

В модели рассматриваются только складские площадки, расположенные на прямоугольных участках территории. Это допущение сделано для упрощения поставленной задачи. В реальности участки земли, выделяемые под открытые складские площадки, обычно имеют произвольную форму в плане. Оптимизация размещения грузовых мест на складских площадках произвольной формы является одним из потенциально перспективных направлений развития модели. Тем не менее в модели учитывается возможное произвольное размещение прямоугольного участка в плане. На первом шаге работы модели определяется приведенный прямоугольник на основе произвольно расположенного прямоугольного участка. Одна из вершин этого прямоугольника расположена в точке $(0, 0)$, а его стороны находятся вдоль осей OX и OY .

Для определения координат точек приведенного участка склада используются приведенный далее алгоритм. На первом шаге прямоугольник переносится так, чтобы точка (x_{p0}, y_{p0}) приведенного прямоугольника находилась в точке $(0; 0)$:

$$x_{pi} = x_i - x_0; \quad y_{pi} = y_i - y_0. \quad (2)$$

На втором шаге производится поворот прямоугольника так, так чтобы он располагался вдоль осей OX и OY . Это достигается при расчете координат точек прямоугольника по следующим формулам:

$$x_{p1} = \sqrt{(x_{p1} - x_{p0})^2 + (y_{p1} - y_{p0})^2}; \quad (3)$$

$$y_{p1} = 0; \quad x_{p3} = 0; \quad (4)$$

$$y_{p3} = \sqrt{(x_{p3} - x_{p0})^2 + (y_{p3} - y_{p0})^2}; \quad (5)$$

$$x_{p2} = x_{p1}; \quad y_{p2} = y_{p3}. \quad (6)$$

Для складирования грузов может быть использован не весь земельный участок. Обычно на открытых складских площадках, особенно на площадках для контейнеров, организовывается проезд по периметру склада. Ширина этого проезда (L , м) задается пользователем. Модель закладывает отступ от границ прямоугольного участка, равный ширине проезда по периметру склада. Груз может располагаться только внутри результирующего доступного для склада участка.

Для определения координат доступного для складирования участка используются следующие формулы:

$$x_{i0} = x_{p0} + L;$$

$$y_{i0} = y_{p0} + L;$$

$$x_{i1} = x_{p1} - L;$$

$$y_{i1} = y_{p1} + L;$$

$$x_{i2} = x_{p2} - L;$$

¹ СП 350.1326000.2018. Нормы технологического проектирования морских портов. М.: Стадартинформ, 2018. 218 с.

$$y_{l2} = y_{p2} - L;$$

$$x_{l3} = x_{p3} + L;$$

$$y_{l3} = y_{p3} - L.$$

На третьем шаге приведения прямоугольника к координатам, с которыми будет работать модель, производится смещение доступного для складирования участка в точку с координатами (0, 0). Для этого используются те же формулы, которые использовались на первом шаге приведения прямоугольного участка:

$$x_{ri} = x_{li} - x_{l0};$$

$$y_{ri} = y_{li} - y_{l0}.$$

В результате из произвольного участка территории прямоугольной формы модель получает прямоугольный участок, внутри которого можно располагать грузовые места. Этот участок перемещен в точку (0, 0) и повернут так, чтобы стороны участка располагались вдоль осей OX и OY . Размеры полученного приведенного участка учитывают необходимость организации технологического проезда по периметру складкой площадки. Примеры произвольного прямоугольного участка территории, предназначенного для размещения складской площадки и приведенного участка, показаны на рис. 2.

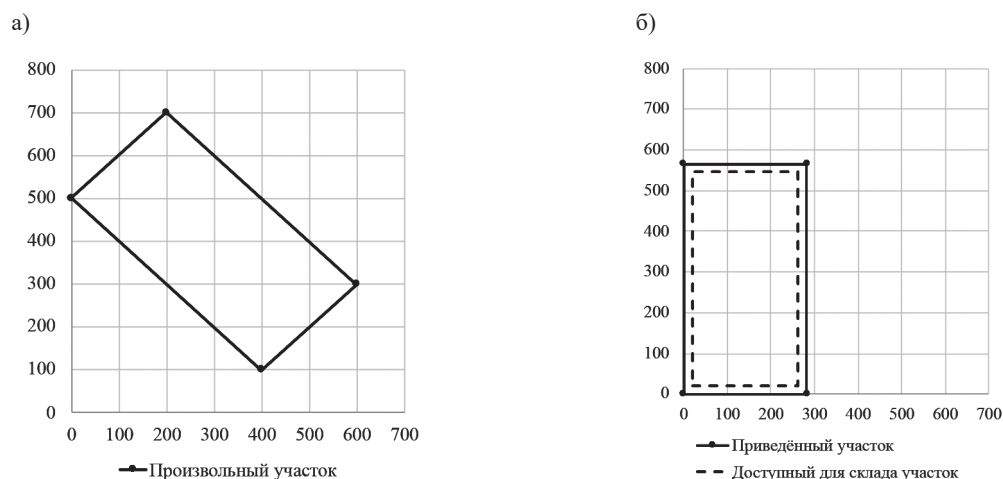


Рис. 2. Пример территориальных участков для размещения открытого склада в модели:
а — произвольный прямоугольный участок; б — приведенный участок для работы модели

Fig. 2. Example of site plots for the placement of an open storage area in the model:

(a) arbitrary rectangular plot; (b) transformed plot for model application

Рассчитав координаты приведенного участка, на котором располагается открытый склад, модель размещает контейнеры или другие заданные грузовые места согласно двум вариантам: «продольный» и «поперечный». *Вариант 1* — «продольное» размещение грузовых мест — подразумевает размещение грузовых мест в штабелях длинной стороной вдоль длинной стороны прямоугольного участка склада. *Вариант 2* — «поперечное» размещение грузовых мест — подразумевает размещение грузовых мест в штабелях широкой стороной вдоль длинной стороны прямоугольного участка склада.

Длины сторон складской площадки определяются на основе координат точек приведенного прямоугольника:

$$L_x = x_{r1} - x_{r0};$$

$$L_y = y_{r3} - y_{r0}.$$

Груз на площадке размещается в штабелях. Длина $L_{шт}$ и ширина $B_{шт}$ штабеля определяется по следующим формулам для варианта 1 («продольное» расположение грузовых мест):

$$L_{шт} = N_a A + \Delta_a (N_a - 1);$$

$$B_{шт} = N_b B + \Delta_b (N_b - 1).$$

При расчете по варианту 2 («поперечное» расположение грузовых мест) длина и ширина штабеля определяются по следующим формулам:

$$L_{шт} = N_b B + \Delta_b (N_b - 1);$$

$$B_{шт} = N_a A + \Delta_a (N_a - 1).$$

Количество штабелей по длине и по ширине складской площадки определяется по формулам:

$$N_{L_{шт}} = L_x / (B_{шт} + B);$$

$$N_{B_{шт}} = L_y / (L_{шт} + A).$$

После выполнения всех описанных ранее шагов определяется вместимость площадки (E) в единицах грузовых мест. Для этого используется следующая формула:

$$E = (N_{L_{шт}} N_{B_{шт}}) (N_a N_b h).$$

В качестве варьируемых параметров в модели выступают величины N_a и N_b — количество грузовых мест по длине и по ширине штабеля. Эти параметры могут изменяться в пределах, заданных пользователем с шагом 1 ед.

Результаты (Results)

Для расчетов на модели предлагается рассмотреть открытую площадку хранения контейнеров на примере порта Мурманск, являющегося западным логистическим узлом СМП. Исходные данные о размерах грузовых мест и расстояниях между ними:

- длина 20-футового морского контейнера a — 6,058 м;
- ширина 20-футового морского контейнера b — 2,438 м;
- высота штабелирования, средняя h — четыре-пять ярусов;
- расстояние между контейнерами в штабеле по длине Δ_a — 0,4 м;
- расстояние между контейнерами в штабеле по ширине Δ_b — 0,4 м;
- ширина продольного проезда между штабелями B — 20 м;
- ширина поперечного проезда между штабелями A — 25 м;
- количество контейнеров по длине штабеля N_a — 10–16 контейнеров;
- количество контейнеров по ширине штабеля N_b — 4–6 контейнеров;
- ширина проезда по периметру площадки L — 20 м.

Координаты точек прямоугольного участка территории, на котором планируется размещение контейнерного склада, приведены в табл. 2. Координаты такого прямоугольного участка совпадают с прямоугольным участком (см. рис. 2, а).

Таблица 2

Координаты точек участка для размещения склада контейнеров

Table 2

Coordinates of plot vertices for container storage area placement

Точки прямоугольного участка	x_i	y_i
Точка 0	400	100
Точка 1	600	300
Точка 2	200	700
Точка 3	0	500

После выполнения шагов для приведения участка к обрабатываемой моделью форме получены координаты результирующего участка, приведенные в табл. 3, откуда видно, что этот участок имеет длину $L_x = 526$ м и ширину $L_y = 243$ м.

Таблица 3

Координаты точек приведенного участка для размещения склада контейнеров

Table 3

Coordinates of vertices of the transformed plot for container storage area placement

Точки прямоугольного участка	x_{ri}	y_{ri}
Точка 0	0	0
Точка 1	243	0
Точка 2	243	526
Точка 3	0	526

Модель выполняет расчеты и формирует таблицу, в которой указываются все возможные комбинации количества контейнеров по длине N_a и ширине N_b штабелей, а также вариант размещения контейнеров на площадке («продольный» или «поперечный»). Результаты работы модели с заданными параметрами представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты моделирования

Table 4

Simulation results

Количество грузовых мест по длине штабеля, контейнеров	Количество грузовых мест по ширине штабеля, контейнеров	Вместимость контейнеров	Вариант
N_a	N_b	E	—
10	4	8473	1
11	4	7957	2
12	4	8473	1
13	4	9180	1
14	4	9886	1
15	4	8473	1
10	5	9702	1
11	5	9284	2
12	5	9702	1
13	5	10511	1
14	5	11319	1
15	5	9852	2
10	6	10741	1
11	6	10345	2
12	6	10741	1
13	6	11636	1
14	6	12531	1
15	6	10978	2
16	6	11457	1
Оптимальный вариант на основе вместимости			
14	6	12531	1

Модель определяет оптимальный вариант на основе максимального значения вместимости складской площадки. В случае примера, приведенного в табл. 4, оптимальная компоновка открытого склада контейнеров достигается при 14 контейнерах в штабеле по длине, шести контейнерах в штабеле по ширине и при размещении контейнеров длинной стороной вдоль длинной стороны участка территории.

Обсуждение (Discussion)

В представленном в предыдущем разделе статьи примере рассматривается оптимизация открытой складской площадки, заполняемой 20-футовыми морскими контейнерами. Значение количества контейнеров по ширине штабеля N_b от четырех до шести контейнеров выбрано не случайно. В практике проектирования контейнерных терминалов ширина штабеля, равная четырем контейнерам, считается оптимальной для обеспечения эффективной работы при помощи погрузчиков с телескопической стрелой (ричстакеров) с учетом необходимости так называемой «копки», т. е. поиска контейнеров в штабеле. Ширина штабеля, равная шести контейнерам, увеличивает количество непроизводительных операций при копке ричстакерами. Значения больше шести контейнеров по ширине одного штабеля могут рассматриваться моделью, но они не рекомендованы с точки зрения эффективности технологической схемы.

Вместимость склада при оптимальной компоновке найденной с использованием предлагаемой модели составляет около 12,5 тыс. контейнеров. При этом максимальной вместимости можно добиться при не максимальных значениях N_a и N_b . При максимальных рассмотренных значениях $N_a = 16$ и $N_b = 6$ вместимость склада составит около 11,5 тыс. контейнеров, что на 8 % ниже вместимости при оптимальной компоновке. Это демонстрирует, что даже при прямоугольной форме площадки в плане размещение максимального количества контейнеров по длине и ширине в штабелях не гарантирует оптимальной компоновки открытого склада.

Заключение (Conclusions)

Модель оптимизации планировки на примере открытой складской площадки порта Мурманск, являющегося западным транспортно-логистическим узлом СМП, предложенная в настоящем исследовании, выполняет роль вспомогательного инструмента при проектировании открытых складских площадок генеральных грузов или контейнеров. Также она может применяться при поиске оптимального способа размещения генеральных грузов / контейнеров на существующих открытых площадках.

Модель, выполненная с учетом предложений, сформулированных в работах [10, 11], имеет следующие ограничения:

- возможно рассмотрение только прямоугольных участков территории для размещения склада;
- размещаемые на складе грузовые места должны быть однородными с точки зрения своих геометрических характеристик.

Данные ограничения являются перспективными в следующих направлениях развития модели:

- разработка алгоритмов работы с многоугольными территориальными участками произвольной формы;
- добавление возможности размещения нескольких видов грузов на одном открытом складе.

Работоспособность модели продемонстрирована на примере определения оптимальной вместимости открытой площадки хранения контейнеров в порту Мурманск. Рассмотренный пример показывает, что максимизация длины и ширины штабеля с целью занять как можно больше территории для хранения контейнеров или других грузовых мест не всегда приводит к максимизации вместимости площадки хранения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексушин Г. В. Развитие атомного ледокольного флота и его роли в экономическом освоении Северного морского пути / Г. В. Алексушин // Арктика и Север. — 2023. — № 53. — С. 28–35. — EDN KAMGIN. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2023.53.28.
2. Makarova I. The Construction of Seaports in the Arctic: Prospects and Environmental Consequences / I. Makarova, P. Buyvol, E. Mukhametdinov, A. Boyko // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11. — Is. 10. DOI: 10.3390/jmse11101902.
3. Hermann R. R. Arctic transshipment hub planning along the Northern Sea Route: A systematic literature review and policy implications of Arctic port infrastructure / R. R. Hermann, N. Lin, J. Lebel, A. Kovalenko // Marine Policy. — 2022. — Vol. 145. — Pp. 105275. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105275.
4. Zakharova I. A study on port efficiency in the Russian Arctic as a key factor for trade growth in the Northern Sea Route / I. Zakharova, H-S. Lee // Korea Trade Review. — 2023. — Vol. 48. — Is. 4. — Pp. 121–148. DOI: 10.22659/ktra.2023.48.4.121.
5. Горенькова В. С. Методика планирования перевозки и выгрузки контейнеризованных грузов во внепортовых условиях / В. С. Горенькова // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 74–83. — EDN KANMEE. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.
6. Андреева Е. В. Поиск оптимальных судоходных маршрутов в акватории арктических морей / Е. В. Андреева, А. Л. Тезиков // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 2. — С. 191–199. — EDN VWMHSK. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.
7. Kong L. Mathematical modeling and optimizing of yard layout in automated container terminals / L. Kong, M. Ji // Expert Systems with Applications. — 2024. — Vol. 258. — Pp. 125117. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125117.
8. Wirjodirdjo B. Container yard planning layout model considering demand and lost sale container / B. Wirjodirdjo, A. G. Budianto, I. N. Pujawan, I. Maflahah // Proceedings of the 2020 2nd international conference on management science and industrial engineering 2020. — С. 314–318.
9. Yu H. Yard Operations and Management in Automated Container Terminals: A Review / H. Yu, Y. Deng, L. Zhang, X. Xiao, C. Tan // Sustainability. — 2022. — Vol. 14. — Is. 6. DOI: 10.3390/su14063419.
10. Кузнецов А. Л. Генезис моделей развития портов в современной транспортной науке / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2(30). — С. 141–153. — EDN TPSXEF. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.
11. Кузнецов А. Л. Дискретно-событийное моделирование грузовых фронтов контейнерного терминала / А. Л. Кузнецов, А. В. Галин, Г. Б. Попов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 4. — С. 589–602. — EDN TRJAZE. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

REFERENCES

1. Aleksushin, G. V. “The nuclear icebreaker fleet and its role in the economic development of the northern sea route”. *Arctic and North* 53 (2023): 28–35. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2023.53.28.
2. Makarova, I., P. Buyvol, E. Mukhametdinov and A. Boyko. “The Construction of Seaports in the Arctic: Prospects and Environmental Consequences.” *Journal of Marine Science and Engineering* 11.10 (2023). DOI: 10.3390/jmse11101902.
3. Hermann, R. R., N. Lin, J. Lebel and A. Kovalenko. “Arctic transshipment hub planning along the Northern Sea Route: A systematic literature review and policy implications of Arctic port infrastructure.” *Marine Policy* 145 (2022): 105275. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105275.
4. Zakharova, I. and H-S. Lee. “A study on port efficiency in the Russian Arctic as a key factor for trade growth in the Northern Sea Route.” *Korea Trade Review* 48.4 (2023): 121–148. DOI: 10.22659/ktra.2023.48.4.121.
5. Goren’kova, V. S. “Methodology for planning transportation and containerized cargo unloading in off-port conditions.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.1 (2024): 74–83. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-74-83.

6. Andreeva, E. V. and A. L. Tezikov. "Search for optimal shipping routes in the arctic seas." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.2 (2023): 191–199. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-2-191-199.
7. Kong, L. and M. Ji. "Mathematical modeling and optimizing of yard layout in automated container terminals." *Expert Systems with Applications* 258 (2024): 125117. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125117.
8. Wirjodirdjo, B., A. G. Budianto, I. N. Pujawan and I. Maflahah. "Container yard planning layout model considering demand and lost sale container." *Proceedings of the 2020 2nd international conference on management science and industrial engineering*. 2020: 314–318.
9. Yu, H., C. Tan et al. "Yard Operations and Management in Automated Container Terminals: A Review." *Sustainability* 14.6 (2022). DOI: 10.3390/su14063419.
10. Kuznetsov, A. L. and A. V. Galin. "Genezis modeley razvitiya portov v sovremennoy transportnoy nauke." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 141–153. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-2-141-153.
11. Kuznetsov, A. L., A. V. Galin and G. B. Popov. "Discrete-event modelling of container terminal cargo fronts." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.4 (2023): 589–602. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-4-589-602.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галин Александр Валентинович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Гольдинов Данил Вадимович — аспирант
Научный руководитель:
Галин Александр Валентинович
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская 5/7
e-mail: goldinoff91@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galin, Aleksandr V. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: galin2403@gmail.com, kaf_top@gumrf.ru
Goldinov, Danil V. — Postgraduate
Supervisor:
Galin, Aleksandr V.
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: goldinoff91@gmail.com

Статья поступила в редакцию 01 декабря 2025 г.

Received: Dec. 1, 2025