

Обзорно-аналитическая статья/Review article

УДК 528.7(202) (203):656.615

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-3-49-61>

Применение данных аэро- и космических съемок в задачах оптимизации логистики морских контейнерных терминалов

М. А. Сквazников¹✉, Д. Л. Колыгин¹

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: vka@mail.ru

Аннотация. Представлен аналитический обзор современных решений методологического и технологического характера по применению данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для мониторинга и оптимизации логистических процессов в морских контейнерных терминалах (МКТ). Проведен анализ зарубежных и отечественных публикаций за период 2010–2026 гг., выявлены основные научно-прикладные тренды: переход от визуального анализа к автоматизированному детектированию объектов на основе алгоритмов компьютерного зрения, интеграция спутниковых данных и данных с беспилотных воздушных судов (БВС) в единые геоинформационные системы, разработка цифровых двойников терминалов. На основе обзора сформулирована ключевая методологическая проблема – отсутствие систематизированных критериев и количественных моделей для обоснованного выбора типа носителя (спутник, самолет, БВС) и параметров съемки под конкретные технологические задачи управления МКТ. По результатам экспертного опроса разработана система показателей качества средств ДЗЗ и определены их весовые коэффициенты. Обоснована необходимость разработки математической модели, связывающей пространственно-временные характеристики потоков данных ДЗЗ с показателями эффективности терминала. Определены основные направления дальнейших исследований, включая создание методики трансформации данных съемки в операционные параметры логистических моделей.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, логистическая оптимизация, компьютерное зрение, БВС, цифровой двойник

Для цитирования:

Сквazников М. А., Колыгин Д. Л. Применение данных аэро- и космических съемок в задачах оптимизации логистики морских контейнерных терминалов. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 3. С. 49–61. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-3-49-61>

Leveraging airborne and spaceborne remote sensing data for optimization of maritime container terminal logistics

M. A. Skvaznikov¹✉, D. L. Kolygin¹

¹ Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg, Russian Federation

e-mail: vka@mail.ru

Abstract. The article presents an analytical review of contemporary methodological and technological approaches to applying Earth remote sensing (RS) data for monitoring and optimizing logistics processes in maritime container terminals (MCTs). A systematic analysis of domestic and international literature published between 2010 and 2026 was conducted, identifying key scientific and applied trends: the transition from visual interpretation to automated object detection based on computer vision algorithms; the integration of satellite and unmanned aerial vehicle (UAV) data into unified geographic information systems; and the development of digital twins of terminals. Based on this review, a fundamental methodological gap is identified – the absence of systematic criteria and quantitative models to support the informed selection of sensor platforms (satellite, aircraft, or UAV) and acquisition parameters tailored to specific MCT operational management tasks. Results from an expert survey were used to develop a quality indicator system for RS data sources, including assigned weight coefficients. The study substantiates the need for a mathematical model that links the spatial and temporal characteristics of RS data flows with terminal performance metrics. Key directions for future research are defined, including the development of a methodology for transforming RS data into operational parameters for logistics models.

Keywords: aerospace imaging, Earth remote sensing, logistics optimization, analytical review, computer vision, satellite monitoring, UAS, digital twin

For citation:

Skvaznikov M. A., Kolygin D. L. (2026). Leveraging airborne and spaceborne remote sensing data for optimization of maritime container terminal logistics. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 3. pp. 49–61. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-3-49-61>

Введение

Аэро- и космические съемки позволяют автоматизировать контроль промышленных объектов, снижать риски и повышать эффективность управления производством [1, 2]. Данные дистанционного зондирования Земли используются в задачах контроля инфраструктуры и строительства, выявления разливов нефти и сброса сточных вод, обнаружения аварийных ситуаций и оценки последствий катастроф [3]. Отдельная группа задач связана с логистикой и управлением ресурсами промышленных предприятий [4, 5]. Аэрокосмический мониторинг применяется для оптимизации складских территорий и транспортных потоков [6].

Контейнерные перевозки играют важную роль в современной логистике и международной торговле [7, 8]. Унификация контейнеров позволяет оптимизировать погрузку, разгрузку и перевалку грузов, сокращая время и трудозатраты, упрощает логистику и совместимость между разными видами транспорта, обеспечивая интермодальность перевозок. Около 70 % (по стоимости) международных торговых грузов перевозится в контейнерах.

Морские контейнерные терминалы – ключевые узлы глобальной мировой торговли, обеспечивающие эффективную перевалку грузов между морским и наземным транспортом [9]. Крупнейшие терминалы (Шанхай, Сингапур, Роттердам) обрабатывают десятки миллионов TEU (20-футовых эквивалентов) в год.

Современные МКТ используют интеллектуальные системы управления для автоматизации процессов, минимизации ошибок и ускорения грузопотока [10, 11]. Контейнеры и транспортировочное оборудование оснащены разнообразными датчиками, а также элементами идентификации и учета.

Аэро- и космические съемки кардинально изменили управление МКТ, обеспечив масштабный мониторинг, точную аналитику и оперативное реагирование на нештатные ситуации. Вместе с тем научные исследования, связанные с логистикой МКТ, часто носят фрагментарный характер, фокусируясь либо на совершенствовании методов обработки изображений [12, 13], либо на описании частных случаев внедрения [14, 15]. Отсутствуют комплексные исследования, обосновывающие выбор средств аэрокосмического мониторинга на основе анализа характери-

стик данных ДЗЗ (пространственное, временное, спектральное разрешение) и решаемых задач оптимизации логистики МКТ. Особенно остро ощущается пробел в практических, количественно обоснованных рекомендациях по выбору типа носителя (спутник, пилотируемая авиация, БВС) и конфигурации съемки для таких задач, как оперативный подсчет контейнеров, мониторинг движения техники, оценка загруженности отдельных функциональных зон.

Целью данного аналитического обзора является систематизация современных научных подходов к использованию аэро- и космических съемок для мониторинга МКТ, выявление ключевых нерешенных проблем, заключающихся в отсутствии критериев для обоснованного выбора средств ДЗЗ в задачах управления МКТ.

Современное состояние применения данных ДЗЗ для мониторинга МКТ: результаты аналитического обзора

Отбор публикаций проводился за период 2010–2026 гг. в международных и отечественных базах данных (Scopus, Web of Science, РИНЦ, Google Scholar) по ключевым словам: «морской терминал дистанционное зондирова-

ние», «портовая логистика», «maritime container terminal remote sensing», «UA port monitoring», «satellite monitoring logistics», «computer vision container stacking», «digital twin port». Поиск информации проведен в следующих научных журналах: «ГЕОМАТИКА», «Исследование Земли из космоса», «Вестник СГУГиТ», «Remote Sensing», «Remote Sensing of Environment», «European Journal of Remote Sensing», «ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing», «IEEE Instrumentation & Measurement Magazine», «IEEE Acces», «Chinese Journal of Aeronautics», «IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (JSTARS)», «Maritime Policy & Management», «Advanced Engineering Informatics», «Journal of Engineering Project and Production Management», «Journal of Marine Science and Engineering», «Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review», «Advanced Engineering Informatics», «Ocean Engineering», «Journal of Transport Geography». Было проанализировано 97 источников, из которых 68 вошли в итоговый анализ. Основное внимание уделялось работам, содержащим описание методик, алгоритмов или количественных оценок эффективности мониторинга МКТ.

Распределение публикаций по тематикам представлено в табл. 1.

Таблица 1. Распределение публикаций по тематикам (2010–2026 гг.)

Тематика исследований	Количество публикаций	Доля, %
Спутниковый мониторинг МКТ	22	32,4
Применение БВС в портах	20	29,4
Математические модели логистики	15	22,0
Экологический мониторинг	7	10,3
Комплексные системы	4	5,9
Всего	68	100,0

Анализ литературы позволил выделить несколько ключевых направлений исследований отечественных и зарубежных авторов.

Наиболее развитым направлением научных исследований является автоматизированный подсчет и идентификация контейнеров на основе методов компьютерного зрения и глубокого обучения. Ранние работы [16–18]

опирались на анализ спектральных признаков и геометрических форм на спутниковых снимках среднего разрешения (Sentinel-2, Landsat). Современные исследования используют сверточные нейронные сети и алгоритмы глубокого обучения, такие как YOLO или Faster R-CNN, для обнаружения и классификации судов [19–21], а также семантиче-

скую сегментацию и анализ сетки для подсчета контейнеров на снимках сверхвысокого разрешения (WorldView, Pleiades, данные БВС) [22–24]. Высокая точность современных алгоритмов применительно к свободно стоящим контейнерам ожидаемо снижается при плотном штабелировании или сложных условиях освещения. Данная проблема может быть решена путем использования открытых размеченных наборов данных для обучения моделей под специфику разных портов.

Спутниковая съемка с высокой периодичностью эффективна для мониторинга транспортных потоков и активности техники, отслеживания долгосрочных изменений и общей загруженности терминала [25]. Для тактического управления в реальном времени применяются БВС, позволяющие отслеживать траектории движения кранов, автомобильных контейнерных погрузчиков, транспортно-складских тележек и автотранспорта [26]. Комбинируя данные GPS/ГЛОНАСС с видеопотоком с БВС, исследователи строят модели транспортных потоков для выявления «узких мест» [27]. Однако для корреляции данных ДЗЗ разного пространственно-временного масштаба с внутренними бизнес-процессами терминала необходима разработка семейства моделей разного уровня и детализации элементов оборудования.

Данные стереосъемки и лидарного сканирования с БВС или самолетов используются для построения цифровых моделей рельефа и местности [28] и создания 3D-моделей штабелей контейнеров [29, 30]. Это позволяет точно оценивать заполняемость складских площадок и оптимизировать вертикальное хранение. Спутниковые интерферометрические методы применяются для мониторинга деформаций инфраструктуры (причалов, крановых путей) [31]. Недостатком данного подхода являются высокая стоимость регулярного получения данных лидарной съемки и специализированного программного обеспечения для их обработки [32].

Для решения специальных задач мониторинга МКТ возможно применение методов спектрального анализа. Так, тепловая инфракрасная съемка используется для мониторинга работы рефрижераторных контейнеров

по тепловым аномалиям [33]. Мульти- и гиперспектральная съемка помогает в обнаружении разливов нефтепродуктов на акватории [34] и оценке состояния растительности на прилегающих территориях. Однако низкое пространственное разрешение общедоступных спектральных данных (например, Sentinel-3) не позволяет использовать их для детального анализа на уровне отдельного контейнера.

Перспективные исследования посвящены интеграции потоков данных ДЗЗ в геоинформационные системы, системы поддержки принятия решений и платформы цифровых двойников [35, 36]. Такие подходы позволяют визуализировать текущее состояние МКТ, проводить симуляции сценариев (например, прибытие судна-гиганта) и оценивать их влияние на логистические показатели. Недостатки данного направления исследований связаны со сложностью создания динамических, самообновляемых моделей, требующих автоматического потока данных от ДЗЗ и датчиков IoT (Internet of Things).

Существующие публикации в области использования аэро- и космических съемок для мониторинга МКТ описывают применение конкретного типа данных для решения отдельной задачи. При этом отсутствует системная методология, которая позволила бы определять необходимые требования к данным ДЗЗ (разрешение, периодичность, латентность) на основе формализованного описания задачи управления МКТ (например, «оперативная оценка времени разгрузки судна» или «выявление контейнеров с превышением срока хранения»), а также применять количественные модели или четкие экспертные правила для выбора оптимального носителя или комбинации носителей с учетом экономических и операционных ограничений.

Таким образом, проведенный анализ научной литературы, посвященной методам применения данных ДЗЗ для мониторинга МКТ, позволил сформулировать ключевую методологическую проблему: отсутствие систематизированных критериев и количественных моделей для обоснованного выбора типа носителя (спутник, самолет, БВС) и параметров

съемки под конкретные технологические задачи управления МКТ.

Сравнительный анализ возможностей носителей данных ДЗЗ и формулировка методологической проблемы

Данные аэро- и космических съемок можно использовать для решения широкого спектра задач мониторинга МКТ. От автоматического подсчета количества и расположения контейнеров в интересах определения загрузки отдельных функциональных зон МКТ, выявления «узких мест» технологического процесса, повреждений инфраструктуры, контроля санитарных зон до планирования строительства новых объектов и мониторинга строительных проектов [37].

Каждая из задач определяет требования к эффективности ДЗЗ, частными показателями которой являются результативность,

оперативность и ресурсоемкость процесса получения данных. Частные показатели в свою очередь определяются характеристиками средств ДЗЗ.

Аэро- и космические съемки превращают контейнерный терминал в «умный» объект с прозрачными процессами и минимизированными рисками. Получаемые геопространственные данные, обработанные с использованием специализированных алгоритмов, становятся важной аналитикой, позволяющей повысить эффективность функционирования МКТ и планирования его развития. При этом наиболее эффективен гибридный подход, комбинирующий данные, получаемые со спутников, самолетов и БВС, учитывающий присущие им недостатки и преимущества.

На основе обзора и анализа характеристик (показателей качества) носителей данных ДЗЗ (табл. 2) можно сделать вывод, что универсального решения не существует.

Таблица 2. Сравнительная характеристика носителей данных ДЗЗ для мониторинга МКТ

Показатели	КА	Самолет	БВС	Ключевое влияние на задачи МКТ
Тип покрытия	Глобальное, региональное	Региональное, локальное	Локальное (до 10–20 км ²)	Спутник – для стратегического мониторинга нескольких терминалов; БВС – для тактических задач в рамках одного МКТ
Пространственное разрешение r	Средне-сверхвысокое (0,3–10 м)	Сверхвысокое (0,1–0,5 м)	Сверхвысокое (0,01–0,1 м)	Разрешение < 0,5 м необходимо для детектирования отдельных контейнеров и техники
Периодичность съемки	От 1 раза в день до 2 недель	По заказу (часы-дни)	По требованию (минуты)	Для контроля динамичных процессов (разгрузка судна) требуется периодичность от 15 мин. до 1 часа
Оперативность получения данных	Низкая-средняя (часы-сутки)	Средняя (часы после съемки)	Высокая (минуты после съемки)	Критична для реагирования на инциденты (аварии, пожары)
Стоимость (за единицу площади)	Низкая (архив), средняя (заказ)	Высокая	Низкая-средняя	Определяет экономическую целесообразность для рутинного мониторинга
Стоимость (для точечной задачи)	Высокая	Высокая	Низкая-средняя	Определяется важностью задачи
Возможности 3D-моделирования	Ограниченные (стереопары)	Высокие (лидар, стерео)	Высокие (лидар, SfM-фотограмметрия)	Необходимы для оценки объемов штабелей и планирования
Спектральные возможности	Широкие (мульти-, гипер-, TIR)	Широкие (зависит от сенсора)	Широкие (зависит от сенсора)	Определяют возможность решения спец. задач (мониторинг рефрижераторов)

Так как эффективность мониторинга МКТ оценивается с использованием набора комплексных показателей качества данного процесса (результативности, оперативности и ресурсоемкости), то выбор между спутником, самолетом и БВС представляет собой многокритериальную оптимизационную задачу [38].

Для определения значений весовых коэффициентов показателей качества средств ДЗЗ использовался экспертный метод.

Отбор экспертов осуществлялся на основе их профессиональной компетентности, академической квалификации и практического опыта. Для оценивания компетентности экспертов использовался тестовый метод, включающий анкетирование по вопросам теории и практики ДЗЗ, самооценку эксперта, анализ публикационной активности в тематической области, учет рецензий и отзывов коллег.

Формирование экспертной комиссии проводилось в результате решения оптимизационной задачи динамического программирования выбора группы наиболее компетентных экспертов при ограниченном бюджете на проведение опроса. Окончательный вариант состава экспертной группы включал 15 экспертов.

Для проведения экспертизы использовался метод Дельфи – итерационная процедура экспертного оценивания, обеспечивающая последовательное приближение к согласованному мнению группы экспертов при сохранении анонимности суждений.

На первом туре экспертного опроса экспертам был предложен для анализа исходный перечень из 20 показателей качества средств ДЗЗ, в том числе их пространственно-временные, оперативно-технические, эксплуатационные и экономические характеристики. Необходимо было провести ранжирование показателей по значимости и исключить незначимые для задач мониторинга МКТ показатели.

К показателям, исключенным более чем 70 % экспертов, относились радиометрическое разрешение, стабильность калибровки,

наличие гиперспектрального режима, чувствительность приемника излучения (соотношение «сигнал/шум»), стоимость оборудования (дублируется показателем «стоимость 1 км²»), ширина полосы захвата (дублируется показателем «площадь покрытия»).

Таким образом, экспертный опрос проводился с целью получения количественных оценок значимости (весовых коэффициентов) 14 показателей качества средств ДЗЗ применительно к задачам мониторинга МКТ.

Для каждого показателя рассчитывалось среднее арифметическое оценок всех экспертов. Для оценки степени согласованности мнений экспертов использовался коэффициент конкордации Кендалла. Статистическая значимость коэффициента конкордации проверялась с использованием критерия χ^2 .

Для получения итогового ранжирования показателей использовался метод медианы Кемени для метризованных ранжирований. После получения предварительных оценок проводилась проверка условия аддитивности, в соответствии с которым совместному осуществлению альтернатив должна соответствовать сумма их численных оценок.

Получение численных оценок альтернатив производилось по методу Черчмена – Акофа. После получения предварительных оценок альтернатив и их нормирования проводилась проверка на выполнение условия аддитивности, согласно которому совместному осуществлению альтернатив соответствует сумма их численных оценок.

Высокая согласованность экспертов и устойчивость результатов подтверждают надежность полученных весовых коэффициентов, которые могут быть использованы в качестве основы для многокритериального выбора средств ДЗЗ при мониторинге МКТ.

Результаты экспертного опроса, при котором были определены весовые коэффициенты показателей качества средств ДЗЗ, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Показатели качества средств ДЗЗ

Показатели	Единица измерения	Весовой коэффициент
Пространственное разрешение	м/пиксель	0,15
Периодичность съемки	часы	0,12
Стоимость 1 км ²	руб.	0,10
Оперативность получения данных	минуты	0,09
Точность позиционирования	м	0,08
Спектральные каналы	количество	0,07
Площадь покрытия	км ² /сутки	0,07
Работа в облачность	баллы (1–5)	0,06
Автоматизация анализа	%	0,06
Разрешение на полеты	баллы (1–5)	0,05
Энергопотребление	кВт·ч	0,05
Долговечность	года	0,04
Ремонтопригодность	баллы (1–5)	0,03
Экологичность	баллы (1–5)	0,03

Предлагается следующий алгоритм выбора средств ДЗЗ на основе многофакторного анализа.

1. Определение задачи мониторинга (1 из 5 групп):

- стратегический мониторинг грузопотока и логистики МКТ (Z_1);
- тактический мониторинг МКТ: оперативное планирование и управление (Z_2);
- безопасность и охрана МКТ (Z_3);
- экологический и технологический надзор территории МКТ (Z_4);
- планирование развития и строительства МКТ (Z_5).

2. Расчет коэффициента эффективности для каждого средства ДЗЗ:

$$K_c = \sum_{i=1}^{14} w_i q_i,$$

где w_i – весовой коэффициент i -го показателя качества;

q_i – нормализованное значение показателя качества.

Значения весовых коэффициентов w_i рассчитываются для каждой задачи индивидуально либо усредняются по группам задач или по всем задачам.

При определении показателей качества q_i используется линейное нормирование относительно лучшего значения среди сравниваемых средств ДЗЗ по каждому показателю.

3. Выбор оптимального средства по максимальному значению коэффициента эффективности K_c , $c = \{КА, самолет, БВС\}$.

Пример результатов расчета коэффициентов эффективности K_c для типовых задач мониторинга МКТ (по одной из каждой группы) на основе условно-реальных значений параметров представлены в табл. 4.

Таблица 4. Рекомендации по выбору средств ДЗЗ

Задача	Оптимальное средство	Коэффициент эффективности	Альтернатива/коэффициент эффективности
Подсчет контейнеров (Z_1)	БВС ($r = 5$ см)	0,95	Самолет ($r = 10$ см) 0,33
Определение неэффективного использования площадей (Z_2)	КА ($r = 1$ м)	0,87	КА ($r = 5$ м) 0,49
Инспекция кранового оборудования (Z_3)	БВС ($r = 5$ см)	0,92	Наземная съемка 0,73
Обнаружение разливов нефти (Z_4)	КА (мультиспектр.)	0,78	БВС (тепловизор) 0,48
Мониторинг строительства (Z_5)	БВС + КА	0,84	Самолет 0,39

Перспективы исследований: от обзора к моделированию

Ключевая методологическая проблема заключается в отсутствии систематизированных критериев и количественных моделей для обоснованного выбора средства ДЗЗ и параметров съемки под конкретные технологические задачи управления МКТ.

Для решения сформулированной проблемы предлагается следующий путь дальнейших исследований.

Этап 1. Разработка формализованной схемы декомпозиции задач управления МКТ. Необходимо создать классификатор задач (стратегические, тактические, оперативные) и для каждой определить значения весовых коэффициентов w_i , а также правила нормирования и значения показателей качества q_i .

Этап 2. Создание математической модели «задача – данные – решение». Модель должна устанавливать функциональную зависимость ключевых показателей эффективности KPI МКТ от параметров, полученных при обработке данных ДЗЗ:

$$KPI = F(P_1, P_2, \dots, P_n),$$

где P_i – параметры, получаемые при обработке данных ДЗЗ (интенсивность потоков, количество объектов, геометрические характеристики).

$$P_i = G(X_i),$$

где X_i – характеристики (показатели качества) данных ДЗЗ (разрешение, точность геопривязки, латентность);

G – алгоритм обработки (детектирование, трекинг, классификация).

В дальнейшем необходимо определить, как характеристики X_i зависят от выбора носителя и режима съемки.

Этап 3. Разработка и верификация методики. На данном этапе требуется выполнить следующие операции.

1. Создать или адаптировать алгоритмы компьютерного зрения для извлечения параметров P_i из реальных данных аэро- и космических съемок для тестового терминала.

2. Провести численный эксперимент: используя разработанную модель и реальные (либо синтезированные) данные, сравнить расчетные KPI с фактическими данными терминала.

3. На основе моделирования предложить рекомендации по выбору конфигурации системы мониторинга (например: «Для ежедневной оценки заполненности склада A достаточно спутниковых данных с разрешением 0,5 м; для почасового контроля разгрузки у причала B необходимо БВС с облетом каждые 30 минут»).

Заключение

Проведенный аналитический обзор подтвердил высокий потенциал применения данных аэро- и космических съемок в целях повышения эффективности логистики МКТ. Однако переход от демонстрации возможностей к их системному внедрению сдерживается отсутствием обоснованной методологии выбора средств ДЗЗ.

Основным научным результатом данной работы является сформулированная исследовательская проблема: отсутствие математических моделей для обоснованного выбора средства ДЗЗ и параметров съемки под конкретные технологические задачи управления МКТ.

Практическая значимость решения этой проблемы заключается в возможности разработки инструментов поддержки принятия решений для менеджеров портов и логистических компаний, позволяющих обоснованно проектировать и внедрять системы мониторинга на основе аэро- и космических съемок.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на реализацию предложенного трехэтапного плана, начиная с разработки детализированной классификации задач управления МКТ и заканчивая созданием и апробацией математической модели.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gharehgozli, A., Mileski, J., Duru, O. (2017). Heuristic estimation of container stacking and re-shuffling operations under the containershp delay factor and mega-ship challenge. *Maritime Policy & Management*, Vol. 44(3), pp. 373–391. DOI 10.1080/03088839.2017.1295328.
2. Yang, Y., Zhong, M., Yao, H., Yu, F., & Fu, X. (2018). Internet of Things for Smart Ports: Technologies and Challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 21(1), pp. 34–43. DOI 10.1109/MIM.2018.8278808.
3. Кулик Е. Н., Байкин Д. А. Разливы нефтепродуктов на водной поверхности: методы анализа данных дистанционного зондирования Земли при их выявлении. *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27, № 4. С. 61–73. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73.
4. Port performance and maritime trade and transport facilitation. (2023). *Review of Maritime Transport 2023*. United Nations Conference on Trade and Development. New York: United Nations Publications. 126 p. eISBN: 978-92-1-358456-9.
5. Ducruet, C. (2020). The Geography of Maritime Networks: A Critical Review. *Journal of Transport Geography*, Vol. 88, Issue 3: 102824. DOI 10.1016/j.jtrangeo.2020.102824.
6. Сквазников М. А., Колыгин Д. Л. Подход к расчету интенсивности транспортных потоков при организации наземных перевозок в районе ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций по данным дистанционного зондирования Земли. *Вестник СГУГиТ*. 2023. Т. 28, № 3. С. 77–91. DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-77-91.
7. Тимченко Т. Н., Глушко С. Н. Морские контейнерные терминалы как составляющая часть транспортной системы РФ. *Современные аспекты экономики*. 2016. № 5 (225). С. 14–19.
8. Приходько Ф. Н., Радчин С. П., Тимошенко К. А. Анализ контейнерного терминала НУТЭП Новороссийского морского порта и его роли в экспортно-импортных отношениях России и Турции. *Молодой ученый*. 2024. № 37 (536). С. 20–26.
9. Notteboom, T., Pallis, A., Rodrigue, J.-P. (2022). *Port Economics, Management and Policy*. London: Routledge. 690 с. DOI 10.4324/9780429318184.
10. Рева Я. С., Винокур Л. Б. О повышении пропускной способности владивостокского контейнерного терминала. *Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады XII научно-практической конференции*. 2017. Т. 1. С. 292–296.
11. Карпик А. П., Мусихин И. А., Ветошкин Д. Н. Интеллектуальные информационные модели территорий как эффективный инструмент пространственного и экономического развития. *Вестник СГУГиТ*. 2021. Т. 26, № 2. С. 155–163. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163.
12. Mi, C., Huang Y., Fu, C., Zhang, Z. (2021). Vision-based measurement: Actualities and developing trends in automated container terminals. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24(6), pp. 65–76. DOI 10.1109/MIM.2021.9448257.
13. Vasileiadis, S., Asiam, Sh., Orphanides, K., Cassera, O. (2025). Real-time container tracking and damage detection at seaports using deep learning. *Proceedings of the 20th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS)*, Vol. 43, pp. 277–285. DOI 10.15439/2025F5518.
14. Li, Y., Tian, Y., Yuan, C. et al. (2025). YOLO-UAV Ship: An effective method and dataset for multi-view ship detection in UAV images. *Remote Sensing*, Vol. 17(17). DOI 10.3390/rs17173119.
15. Hsieh, C.-C., Chen, C.-A., Huang, W.-H. (2026). A real-time YOLO based container grapple slot detection and classification system. *Computers, Materials & Continua*, Vol. 86(3). DOI 10.32604/cmc.2025.072514.
16. Labib, S., Harris, A. (2018). The potentials of Sentinel-2 and LandSat-8 data in green infrastructure extraction, using object based image analysis (OBIA) method. *European Journal of Remote Sensing*. Vol. 51(1), pp. 231–240. DOI 10.1080/22797254.2017.1419441.
17. Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 65(1), pp. 2–16. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.
18. Kanjir, U., Greidanus, H., Oštir, K. (2018). Vessel Detection and Classification from Spaceborne Optical Images: A Literature Survey. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 207, pp. 1–26. DOI 10.1016/j.rse.2017.12.033.

19. Liu, Y., Cui, H., & Li, G. (2017). A novel method for ship detection and classification on remote sensing images. *Proceedings of 26th International Artificial Neural Networks and Machine Learning Symposium (ICANN)*, pp. 556–564. Springer International Publishing, Algero, Italy, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-68612-7-63.
20. Zakharov, I., Lavigne, D. A., Warren, S., Henschel, M. D., Power, D., & Howell, M. (2021). Ship detection and classification in EO/IR VHR satellite imagery. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. pp. 3561–3564. Springer International Publishing, Brussels, Belgium, 2021. DOI 10.1109/IGARSS47720.2021.9553254.
21. Li, B., Xie X., Wei X., & Tang, W. (2020). Ship Detection and Classification from Optical Remote Sensing Images: A Survey. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 34(3), pp. 145–163. DOI 10.1016/j.cja.2020.09.022.
22. Zhou, B., Wang, Z. (2024). An Automated Method for Container Counting in Satellite Images Based on Grid Analysis and Shadow Recognition. *IEEE Acces.* P. 99. DOI 10.1109/access.2024.3440041.
23. Yasuda, K., Shibasaki, R., Yasuda, R., Murata, H. (2024). Terminal Congestion Analysis of Container Ports Using Satellite Images and AIS. *Remote Sensing*, Vol. 16, No 6, p. 1082. DOI 10.3390/rs16061082.
24. Afiq, A., Jasmee, J., Khairul, N.-T., Hezri, R. (2019). Shipping container counting approach using unmanned aerial vehicle (UAV) and ArcGIS. *Built Environment Journal*, Vol. 16(2): 15, pp. 120–129. DOI 10.24191/bej.v16i2.9693.
25. Murata, H., Shibasaki, R., Imura N., Nishinari, K. (2023). Identifying the operational status of container terminals from high-resolution nighttime-light satellite image for global supply chain network optimization. *Remote Sensing*, Vol. 4, pp. 21–31. DOI 10.3389/frsen.2023.1229745.
26. Tanga, G., Guoa, Y., Qib, Y., Fangb, Z., Zhaoa, Z., Lia, M., Zhenab, Z. (2025). Real-time twin automated double cantilever rail crane scheduling problem for the U-shaped automated container terminal using deep reinforcement learning. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 5, Part A. DOI 10.1016/j.aei.2025.103193.
27. Arfakhsyad, A. A., Rahman, A. N., Kinanti, L. et al. (2023). Unmanned aerial vehicle (UAV) data-driven modelling software with integrated 9-axis IMU-GPS sensor fusion and data filtering algorithm. *The 15th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, Chiang Mai, Thailand, 2023, pp. 167–173. DOI 10.1109/ICITEE59582.2023.10317781.
28. Chelioti, K. H., Tsaimou, C. N., Tsoukala, V. K. (2023). Unmanned aerial vehicles: A survey on monitoring advancements for port infrastructure applications. *Journal of Engineering Project and Production Management*, Vol. 13(3), 0023. DOI 10.32738/JEPPM-2023-0023.
29. Baraldi, A., Tiede, D. (2015). Geospatial 2D and 3D object-based classification and 3D reconstruction of ISO-containers depicted in a LiDAR data set and aerial imagery of a harbor. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Springer International Publishing, Milan, Italy, 2015. DOI 10.1109/IGARSS.2015.7326747.
30. Martinez, J. G., Alarcon, L. A., Wandahl, S. (2024). Unmanned Aerial Systems (UAS)-Derived 3D Models for Digital Twin Construction Applications. *Applications of Point Cloud Technology*. DOI 10.5772/intechopen.1004746.
31. Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. (2016). Time Series Analysis of InSAR Data: Methods and Trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 115, pp. 90–102. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003.
32. Алтынцев М. А. Методика интеграции данных мобильного лазерного сканирования и аэрофотосъемки для создания цифровой модели местности. *Вестник СГУГиТ*. 2022. Т. 27, № 5. С. 5–18. DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-5-18.
33. Kan, A., Chen, Z., Ye, Z., Zhang, J. (2025). Thermal behavior investigation on marine reefer container envelopes embedded with vacuum insulation panel. *Thermal Science and Engineering*, Vol. 8(2), pp. 115–126. DOI 10.24294/tse11631.
34. Leifer, I. et al. (2012). State of the Art Satellite and Airborne Marine Oil Spill Remote Sensing: Application to the BP Deepwater Horizon Oil Spill. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 124, pp. 185–209. DOI 10.1016/j.rse.2012.03.024.

35. Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A.Y.C. (2019). Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, Vol. 5(4), pp. 653–661. DOI 10.1016/j.eng.2019.01.014.
36. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In book: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. pp. 85-113. Springer International Publishing. 327 p. DOI 10.1007/978-3-319-38756-7.
37. Tang, G., Wang, C., Zhang, Z., Men, S. (2024). UAV Path Planning for Container Terminal Yard Inspection in a Port Environment. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 12, No 1, 128. DOI 10.3390/jmse12010128.
38. Alvares-Vanhard, E., Corpetti, T., Houet, T. (2021) UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. *Science of Remote Sensing*, Vol. 3, pp. 100019. DOI 10.1016/j.srs.2021.100019. HAL Id: hal-03137315.

REFERENCES

1. Gharehgozli, A., Mileski, J., Duru, O. (2017). Heuristic estimation of container stacking and re-shuffling operations under the containership delay factor and mega-ship challenge. *Maritime Policy & Management*, Vol. 44(3), pp. 373–391. DOI 10.1080/03088839.2017.1295328.
2. Yang, Y., Zhong, M., Yao, H., Yu, F., & Fu, X. (2018). Internet of Things for Smart Ports: Technologies and Challenges. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol. 21(1), pp. 34–43. DOI 10.1109/MIM.2018.8278808.
3. Kulik, E. N., Baikin, D. A. (2022). Oil spills on the water surface: methods of remote sensing data analysis for their identification. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 27, No 4, pp. 61–73, DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-4-61-73 [in Russian].
4. Port performance and maritime trade and transport facilitation. (2023). Review of Maritime Transport 2023. United Nations Conference on Trade and Development. New York: United Nations Publications. 126 p. eISBN: 978-92-1-358456-9.
5. Ducruet, C. (2020). The Geography of Maritime Networks: A Critical Review. *Journal of Transport Geography*, Vol. 88, Issue 3: 102824. DOI 10.1016/j.jtrangeo.2020.102824.
6. Skvaznikov, M. A., Kolygin, D. L. (2023) An approach to traffic flows intensity calculating in the organization of ground transportation in the area of emergency response based on the Earth remote sensing data. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 28, No 3, pp. 77–91, DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-3-77-91 [in Russian].
7. Timchenko, T. N., Glushko, S. N. (2016). Sea container terminals as an integral part of the Russian Federation's transport system. *Sovremennye aspekty ekonomiki [Modern aspects of economics]*, No 5 (225), pp. 14–19 [in Russian].
8. Prikhod'ko, F. N., Radchin, S. P., Timoshenko, K. A. (2024) Analysis of the NUTEP container terminal of the Novorossiysk seaport and its role in export-import relations between Russia and Turkey. *Molodoi uchenyi [Young scientist]*, No 37 (536), pp. 20–26 [in Russian].
9. Notteboom, T., Pallis, A., Rodrigue, J.-P. (2022). *Port Economics, Management and Policy*. Routledge. 690 p. DOI 10.4324/9780429318184.
10. Reva, Ya. S., Vinokur, L. B. (2017). On increasing the throughput capacity of the Vladivostok container terminal. *Problemy transpota Dal'nego Vostoka. Doklady XII nauchno-prakticheskoy konferencii [Transport problems in the Far East. Reports of the XII scientific and practical conference]*. Vladivostok, 2017. Vol. 1, pp. 292–296 [in Russian].
11. Karpik, A. P., Musikhin, I. A., Vetoshkin D. N. (2021) Smart information models as an effective tool of regional spatial and economic development. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 26, No 2, pp. 155–163, DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-2-155-163 [in Russian].
12. Mi, C., Huang Y., Fu, C., Zhang, Z. (2021). Vision-based measurement: Actualities and developing trends in automated container terminals. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 24(6), pp. 65–76. DOI 10.1109/MIM.2021.9448257.

13. Vasileiadis, S., Asiam, Sh., Orphanides, K., Cassera, O. (2025). Real-time container tracking and damage detection at seaports using deep learning. *Proceedings of the 20th Conference on Computer Science and Intelligence Systems (FedCSIS)*, Vol. 43, pp. 277–285. DOI 10.15439/2025F5518.
14. Li, Y., Tian, Y., Yuan, C. et al. (2025). YOLO-UAVShip: An effective method and dataset for multi-view ship detection in UAV images. *Remote Sensing*, Vol. 17(17). DOI 10.3390/rs17173119.
15. Hsieh, C.-C., Chen, C.-A., Huang, W.-H. (2026). A real-time YOLO based container grapple slot detection and classification system. *Computers, Materials & Continua*, Vol. 86(3). DOI 10.32604/cmc.2025.072514.
16. Labib, S., Harris, A. (2018). The potentials of Sentinel-2 and LandSat-8 data in green infrastructure extraction, using object based image analysis (OBIA) method. *European Journal of Remote Sensing*. Vol. 51(1), pp. 231–240. DOI 10.1080/22797254.2017.1419441.
17. Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 65(1), pp. 2–16. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004.
18. Kanjir, U., Greidanus, H., Oštir, K. (2018). Vessel Detection and Classification from Spaceborne Optical Images: A Literature Survey. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 207, pp. 1–26. DOI 10.1016/j.rse.2017.12.033.
19. Liu, Y., Cui, H., & Li, G. (2017). A novel method for ship detection and classification on remote sensing images. *Proceedings of 26th International Artificial Neural Networks and Machine Learning Symposium (ICANN)*. pp. 556–564. Springer International Publishing, Algero, Italy, 2017. DOI 10.1007/978-3-319-68612-7-63.
20. Zakharov, I., Lavigne, D. A., Warren, S., Henschel, M. D., Power, D., & Howell, M. (2021). Ship detection and classification in EO/IR VHR satellite imagery. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. pp. 3561–3564. Springer International Publishing, Brussels, Belgium, 2021. DOI 10.1109/IGARSS47720.2021.9553254.
21. Li, B., Xie X., Wei X., & Tang, W. (2020). Ship Detection and Classification from Optical Remote Sensing Images: A Survey. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 34(3), pp. 145–163. DOI 10.1016/j.cja.2020.09.022.
22. Zhou, B., Wang, Z. (2024). An Automated Method for Container Counting in Satellite Images Based on Grid Analysis and Shadow Recognition. *IEEE Acces*. p. 99. DOI 10.1109/access.2024.34440041.
23. Yasuda, K., Shibasaki, R., Yasuda, R., Murata, H. (2024). Terminal Congestion Analysis of Container Ports Using Satellite Images and AIS. *Remote Sensing*, Vol. 16, No 6, p. 1082. DOI 10.3390/rs16061082.
24. Afiq, A., Jasmee, J., Khairul, N.-T., Hezri, R. (2019). Shipping container counting approach using unmanned aerial vehicle (UAV) and ArcGIS. *Built Environment Journal*, Vol. 16(2): 15, pp. 120–129. DOI 10.24191/bej.v16i2.9693.
25. Murata, H., Shibasaki, R., Imura N., Nishinari, K. (2023). Identifying the operational status of container terminals from high-resolution nighttime-light satellite image for global supply chain network optimization. *Remote Sensing*, Vol. 4, pp. 21–31. DOI 10.3389/frsen.2023.1229745.
26. Tanga, G., Guoa, Y., Qib, Y., Fangb, Z., Zhaoa, Z., Lia, M., Zhenab, Z. (2025). Real-time twin automated double cantilever rail crane scheduling problem for the U-shaped automated container terminal using deep reinforcement learning. *Advanced Engineering Informatics*. Vol. 5, Part A. DOI 10.1016/j.aei.2025.103193.
27. Arfakhsyad, A. A., Rahman, A. N., Kinanti, L. et al. (2023). Unmanned aerial vehicle (UAV) data-driven modelling software with integrated 9-axis IMU-GPS sensor fusion and data filtering algorithm. *The 15th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Chiang Mai, Thailand, 2023*, pp. 167–173. DOI 10.1109/ICITEE59582.2023.10317781.
28. Chelioti, K. H., Tsaimou, C. N., Tsoukala, V. K. (2023). Unmanned aerial vehicles: A survey on monitoring advancements for port infrastructure applications. *Journal of Engineering Project and Production Management*, Vol. 13(3), 0023. DOI 10.32738/JEPPM-2023-0023.
29. Baraldi, A., Tiede, D. (2015). Geospatial 2D and 3D object-based classification and 3D reconstruction of ISO-containers depicted in a LiDAR data set and aerial imagery of a harbor. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Springer International Publishing, Milan, Italy, 2015. DOI 10.1109/IGARSS.2015.7326747.

30. Martinez, J. G., Alarcon, L. A., Wandahl, S. (2024). Unmanned Aerial Systems (UAS)-Derived 3D Models for Digital Twin Construction Applications. *Applications of Point Cloud Technology*. DOI 10.5772/intechopen.1004746.
31. Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. (2016). Time Series Analysis of InSAR Data: Methods and Trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 115, pp. 90-102. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003.
32. Altyntsev, M. A. (2022) Integration of mobile laser scanning and aerial imagery data for generating digital surface models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, Vol. 27, No 5, pp. 5-18, DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-5-5-18 [in Russian].
33. Kan, A., Chen, Z., Ye, Z., Zhang, J. (2025). Thermal behavior investigation on marine reefer container envelopes embedded with vacuum insulation panel. *Thermal Science and Engineering*, Vol. 8(2), pp. 115-126. DOI 10.24294/tse11631.
34. Leifer, I. et al. (2012). State of the Art Satellite and Airborne Marine Oil Spill Remote Sensing: Application to the BP Deepwater Horizon Oil Spill. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 124, pp. 185-209. DOI 10.1016/j.rse.2012.03.024.
35. Tao, F., Qi, Q., Wang, L., Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, Vol. 5(4), pp. 653-661. DOI 10.1016/j.eng.2019.01.014.
36. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In book: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. pp. 85-113. *Springer International Publishing*. 327 p. DOI 10.1007/978-3-319-38756-7.
37. Tang, G., Wang, C., Zhang, Z., Men, S. (2024). UAV Path Planning for Container Terminal Yard Inspection in a Port Environment. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 12, No 1, 128. DOI 10.3390/jmse12010128.
38. Alvares-Vanhard, E., Corpetti, T., Houet, T. (2021) UAV & satellite synergies for optical remote sensing applications: *A literature review*. *Science of Remote Sensing*, Vol. 3, pp. 100019. DOI 10.1016/j.srs.2021.100019. HAL Id: hal-03137315.

Об авторах

Михаил Алексеевич Сквазников – кандидат технических наук, доцент кафедры оптико-электронных средств.

Дмитрий Леонидович Колыгин – преподаватель кафедры оптико-электронных средств.

Author details

Mikhail A. Skvaznikov – Ph. D., Associate Professor, Department of Optoelectronic Devices and Systems.

Dmitrii L. Kolygin – Lecturer, Department of Optoelectronic Devices and Systems.

Получено / Received 21.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.05.2026

Принята к публикации / Accepted 13.05.2026