

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МОРСКИХ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК

Н.Ю. Мутовкина (Тверь)

Введение

Современные морские транспортные системы сталкиваются со множеством вызовов, одним из которых является определение наименее затратного варианта доставки грузов по морю с учетом влияния неблагоприятных факторов, усиливающегося за последние годы. Такое негативное воздействие делает динамику морского товаропотока неоднозначной. Так, в 2023 году наблюдался рост мирового объема морских перевозок после незначительного сокращения в 2022 году. По прогнозам ЮНКТАД в период с 2025 по 2029 годы объемы морских перевозок в среднем будут расти на 2,4% в год, а контейнерных перевозок – на 2,7%. Рост будет стимулироваться техническим прогрессом, переходом на более чистую энергию и развитием инфраструктуры [1, с. 2]. Однако пока нет достаточно достоверной статистики, свидетельствующей об ожидаемом росте. Множество факторов, включая геополитическую напряженность и экономическую неопределенность, негативно влияют на доставку грузов по морю, снижая ее эффективность. Наиболее острыми проблемами в работе морских транспортных систем являются: задержки и простои, потери или порча груза, аварийность, снижение уровня безопасности для экипажа и груза вследствие ухудшения геополитической обстановки, экологических бедствий, военных конфликтов, разночтений в нормативно-правовых документах. Для понимания механизма преодоления некоторых из перечисленных проблем действенным инструментом представляется имитационное моделирование. Оно позволяет анализировать морские транспортные системы, учитывать множество факторов и тестировать различные сценарии без риска для реальных операций. Этот метод помогает оптимизировать логистические процессы, снижать издержки, повышать пропускную способность и прогнозировать последствия управленческих решений. В частности, имея некоторую статистику по продолжительности доставки груза из одного порта в другой, а также зная, какие негативные явления наблюдались во время рейса и каким образом они повлияли на время судна в пути, можно построить модель, в результате работы которой получить прогнозное значение времени доставки груза морским транспортом с учетом воздействия негативных факторов и рассчитать затраты на доставку.

Целью исследования выступает анализ возможностей имитационного моделирования, в частности, применения метода Монте-Карло для оценки эффективности эксплуатации морских транспортных систем.

В статье рассмотрены преимущества и недостатки данного метода, особенности его применения в обозначенной области; разработана имитационная модель для прогнозирования времени судна в пути и величины затрат на транспортировку груза; продемонстрирована работа данной модели и прокомментированы полученные результаты.

Материалы и методы

Задержки и простои судна являются наиболее существенными проблемами, приводящими к высоким непроизводительным затратам. Заказчики терпят серьезные убытки из-за срыва сроков доставки, а перевозчики – из-за проведения дополнительного времени в море, наступления штрафных санкций за несвоевременную доставку груза и т.п. На рис. 1 представлены основные причины, по которым возникают задержки морского транспорта.



Рис. 1. Группировка факторов задержки морского транспорта в пути
(составлено автором по [2–6])

Для целей моделирования были выбраны следующие причины, наиболее соответствующие анализируемому маршруту:

- погодные факторы;
- технические проблемы;
- проблемы с портами и инфраструктурой.

В первую группу «Погодные факторы» включены погодные явления, из-за которых судоходство в определенных регионах может быть полностью парализовано. Штормы, ураганы, тропические циклоны представляют реальную опасность для судов и их грузов и являются первостепенными причинами смены курса, что влечет увеличение времени в пути. Туманы ограничивают видимость, что затрудняет навигацию, особенно в прибрежных зонах и в районах с высокой плотностью судоходства. Они также являются причиной снижения скорости судна или отклонения от курса.

Пролегание маршрута судна через арктические и субарктические районы требует помощи ледоколов, что увеличивает как затраты на транспортировку груза, так и время в пути. Резкие перепады температуры в тропических и субтропических районах влияют на условия хранения и транспортировки продуктов питания, медицинских препаратов и т.п.

Наиболее распространенными техническими проблемами являются поломки судового оборудования и необходимость буксировки судна в ближайший порт для ремонта.

В третью группу факторов задержки входят заторы. Они часто возникают в периоды пиковых нагрузок в крупных портах. Например, сезонные тропические дожди в Бангладеш в августе–октябре усложняют разгрузочные работы. Запрет на выход из порта может возникнуть в случае выявления нарушений требований, связанных с экологическими стандартами, технологическими нормативами или другими правилами. Технические неисправности портового оборудования возникают при устаревших системах управления, аналитики и связи; отсутствии сертификаций и плановых проверок, что по сей день наблюдается в портах развивающихся стран.

Основной задачей является выяснение того, какие из перечисленных причин на конкретном маршруте оказывают наибольшее влияние на увеличение времени судна в пути и на сколько увеличивается продолжительность плавания.

Пусть длина маршрута составляет 10 785 км, которые контейнерное судно, идущее со скоростью 23 узла, при самых благоприятных условиях (хорошая погода, отсутствие технических, портовых и инфраструктурных проблем) преодолевает примерно за 11 дней. Средние затраты одного дня в пути составляют 249 315 руб.

Исходной информацией для моделирования являются данные по 130 рейсам контейнеровоза: время в пути (дни) и уровни влияния трех факторов (оценки команды судна), представленные в табл. 1.

Таблица 1

Описание факторов влияния (составлено автором)

Уровень фактора	Значение уровня
Погодные условия	
Хорошие	0
Удовлетворительные	1
Плохие	2
Технические проблемы	
Незначительные	1
Средней сложности	2
Сложные	3
Проблемы с портами и инфраструктурой	
Незначительные	1
Средней сложности	2
Сложные	3

По средним оценкам плохие погодные условия увеличивают время контейнеровоза в пути на данном маршруте примерно на два дня, сложные технические проблемы или проблемы с портом, портовой инфраструктурой – на три дня. Если время в пути увеличивается на день, то такая задержка считается незначительной. Если время в пути увеличивается на 2–4 дня, такая ситуация допустима. Задержка на 5–6 дней интерпретируется как существенная, а более шести дней – как критическая. Фрагмент исходных данных – оценочных значений уровней факторов и связанной с их влиянием продолжительности рейсов показан в табл. 2.

Таблица 2

Фрагмент исходных данных (составлено автором)

№ рейса	Время доставки, дней	Погодные условия	Технические проблемы	Проблемы с портами и инфраструктурой	Затраты на рейс, руб.
1	15	0	2	2	3 739 725
2	14	0	2	1	3 490 410
3	16	1	1	3	3 989 040
4	14	1	1	2	3 490 410
5	14	0	2	2	3 490 410
6	15	1	3	2	3 739 725
7	15	2	1	1	3 739 725
8	17	1	3	2	4 238 355
9	16	1	2	2	3 989 040
10	15	1	1	2	3 739 725
11	16	1	1	2	3 989 040
12	15	1	1	1	3 739 725
13	17	2	2	2	4 238 355
14	14	0	1	2	3 490 410
15	15	1	2	1	3 739 725

129	13	0	1	1	3 241 095
130	14	1	1	1	3 490 410
Сумма	1929	89	220	205	480 928 635
Среднее значение	14,84	0,68	1,69	1,58	3 699 451
Оценка	Допустимая задержка	Ближе к удовлетворительным	Средняя сложность	Средняя сложность	Допустимые средние затраты

В качестве метода моделирования продолжительности рейса выбран метод Монте-Карло, который является численным методом моделирования случайных процессов. Этот метод широко применяется в различных областях, включая анализ эффективности функционирования морских транспортных систем. Метод Монте-Карло позволяет анализировать стохастические задачи, где присутствуют неопределенность, взаимодействие множества факторов и элементов рассматриваемой системы. Название метода происходит от района Монте-Карло в княжестве Монако, известного своими казино. Рулетка в казино – один из самых известных генераторов случайных чисел [7]. Суть метода заключается в многократной реализации состояний моделируемой системы с последующей обработкой информации методами математической статистики. Вероятность того, что средние показатели результатов будут лишь незначительно отличаться от показателей реальной системы, достаточно высока при большом количестве испытаний. Итак, моделируется некоторая случайная величина. Сначала из опытных данных определяется количество появлений возможных значений этой величины в единицу времени. По частотам вычисляются вероятности, по значениям этих вероятностей – кумулятивные вероятности. Зная кумулятивные вероятности, можно установить соответствие между случайными числами и значениями случайной величины. Берется несколько случайных чисел из специальной таблицы, по которым восстанавливаются значения случайной величины и определяются нужные характеристики. Естественно, как и любой метод, метод Монте-Карло имеет как достоинства, так и недостатки (табл. 3).

Таблица 3

Достоинства и недостатки метода Монте-Карло (составлено автором по [7, 8])

Достоинства	Недостатки
Позволяет заменить сложные вычисления простыми статистическими экспериментами	Необходимость большого объема данных, которые учитываются при моделировании
Гибкий и универсальный, подходит для решения широкого круга задач	Зависимость вычислений от генератора случайных чисел, вероятность искажения результатов
Позволяет учитывать влияние случайных событий	Сложность интерпретации, метод не дает однозначного результата, а только показывает вероятности событий
Доступный, поскольку может быть реализован в табличной программной среде общего назначения, например, как MS Excel	Для более сложных моделей с большим количеством переменных нужны высокие вычислительные мощности, MS Excel может оказаться недостаточно.

Тем не менее возможности современного пакета Microsoft Excel позволяют проводить большое число статистических испытаний, что вполне может быть использовано для решения некоторых конкретных задач, например, для прогнозирования продолжительности транспортировки груза по морскому пути.

Результаты

Соответствующие частоты по погодным условиям, техническим и инфраструктурным проблемам, вероятности и кумулятивные вероятности, а также случайные числа представлены на рис. 2.

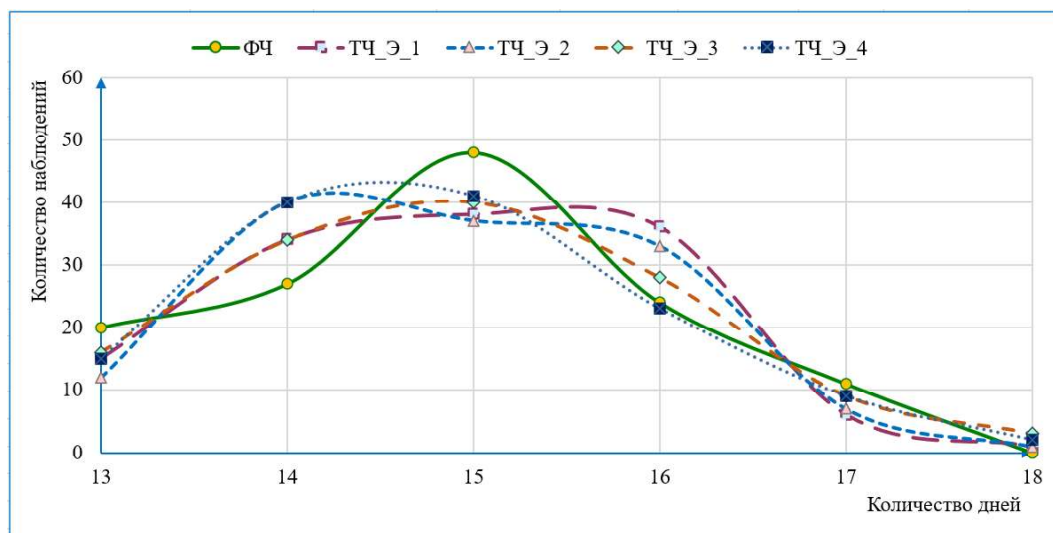


Рис. 4. Распределения времени доставки груза по результатам моделирования (составлено автором)

В большинстве случаев модальные значения времени доставки наблюдаются в окрестности 15 дней: среднее время контейнеровоза в пути варьируется от 14,82 до 14,92 дней при среднем квадратическом отклонении от 1,1 до 1,2 дня.

Обсуждение результатов

Задержка контейнеровоза в пути на один день влечет для компании-перевозчика дополнительные средние затраты в размере 249 315 руб. В эту сумму входят незапланированные топливные и эксплуатационные расходы, в т.ч. плата за сверхнормативное использование контейнера, за задержку судна, штрафы, оплата услуг по ремонту и других восстановительных вмешательств. Чем сложнее маршрут, тем больше риски для перевозчика. И, как показывает практика, а также результаты работы имитационной модели, увеличение времени транспортировки на данном маршруте сверх запланированного (11 дней) на четыре дня можно принять за норму при неизменном влиянии рассмотренных факторов. Распределение уровня влияния негативных факторов на увеличение времени транспортировки груза в первых четырех выборках представлено на рис. 5.

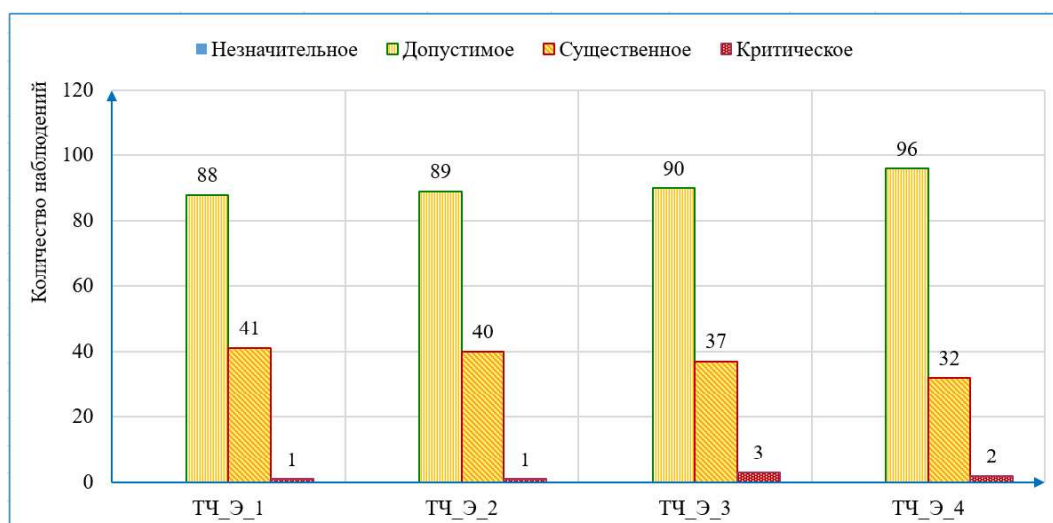


Рис. 5. Распределения уровня влияния совокупности негативных факторов по результатам моделирования (составлено автором)

Как видно из рис. 5, во всех экспериментах превалирует допустимое увеличение времени судна в пути, поскольку погодные факторы, а также портовые и инфраструктурные проблемы компания-перевозчик, как и команда судна, предотвратить не могут по объективным причинам. Однако в структуре негативных факторов по имеющимся наблюдениям наибольшую долю составляют технические проблемы – 43% (рис. 6). Чаще всего появляются проблемы с оборудованием и техническими системами судна: поломки судового оборудования, неисправности грузовых устройств и грузоподъемных механизмов, проблемы с электрооборудованием в грузовых помещениях, сбои в работе навигационных систем [9]. И эти проблемы вполне реально решить силами компании-перевозчика и команды судна. По крайней мере, снизить вероятность их наступления во время транспортировки груза.

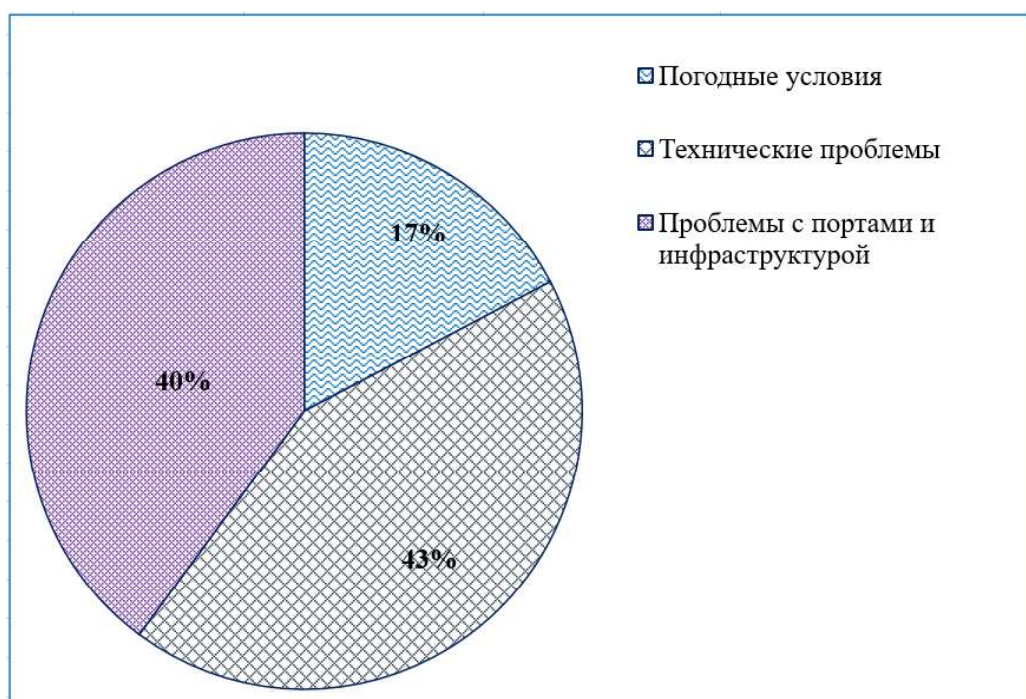


Рис. 6. Структура системы негативных факторов
(составлено автором по результатам наблюдений за рейсами)

Устранение технических проблем на судне, перевозящем грузы по морю, требует системного подхода, включающего подготовку судна, техническое обслуживание, контроль состояния оборудования, соблюдение нормативных требований и оперативное реагирование на возникающие неполадки. При четырехдневной задержке убытки компании составят 997 260 руб., из них примерно 428 822 руб. приходится на устранение технических неполадок. Однако эти затраты можно снизить, соблюдая правила эксплуатации морских судов. Например:

1) проверка технического состояния. До начала рейса необходимо убедиться в технической годности судна к плаванию, включая проверку корпуса, систем, устройств, агрегатов и механизмов. Проверка включает: осмотр корпуса на предмет коррозии, оценивание водонепроницаемости и прочности конструкций, состояния люковых закрытий, осушительных систем, шпигатов и льял [10, ст. 124];

2) проверка грузоподъемных средств. Судовые грузоподъемные устройства, гаки, скобы, блоки и другие детали, используемые для перегрузки и крепления грузов, должны соответствовать требованиям правил технической эксплуатации и иметь соответствующие паспорта и сертификаты;

3) своевременное выполнение планово-предупредительных и поддерживающих ремонтных работ. Планово-предупредительный ремонт включает текущий и капитальный ремонт отдельных механизмов, комплектов, узлов и элементов судна. Ремонтные работы зачастую не могут выполняться силами экипажа судна и требуют привлечения сторонних специалистов. Как правило, ремонт выполняется на специализированных судоремонтных предприятиях в соответствии с правилами технической эксплуатации [11];

4) четкое исполнение предписанных законодательных норм и правил эксплуатации грузового судна. Основными нормативно-правовыми документами, действующими на территории Российской Федерации, являются: Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций [12], Кодекс торгового мореплавания РФ [13], Технический регламент о безопасности объектов морского транспорта [14];

5) систематическая подготовка экипажа к действиям в аварийных ситуациях, включая меры по обеспечению непотопляемости, борьбе с пожарами, сохранению остойчивости и прочности судна. Регулярное повышение квалификации членов команды необходимо для выработки навыков использования комплектов аварийного имущества и материалов. Все члены экипажа должны уметь оказывать первую медицинскую помощь, оперативно реагировать на чрезвычайные ситуации и, по возможности, предотвращать их.

Успешное устранение технических проблем либо минимизация их влияния возможны только при сплоченной работе команды, владельца судна и контролирующих структур. Регулярный мониторинг состояния судна и соблюдение нормативных требований помогают минимизировать риски аварий, обеспечить безопасность и своевременность доставки грузов.

Заключение

Безусловно, компания-перевозчик и команда судна не могут повлиять на погодные условия, а также контролировать портовые и инфраструктурные проблемы, но могут усилить контроль за техническим состоянием судна. Своевременное проведение мероприятий по повышению безопасности эксплуатации судна способствует не только комфортной работе экипажа, но и снижению затрат, которые образуются из-за задержек судна в пути вследствие технических неисправностей.

Одним из эффективных инструментов имитационного моделирования работы морских транспортных систем выступает метод Монте-Карло, который основан на генерации большого числа реализаций случайных величин и анализе их статистических характеристик. В данном исследовании метод применен для генерации значений негативных факторов, влияющих на увеличение времени судна в пути, на основе выборки из 130 наблюдений. Имитационная модель позволила выявить наиболее вероятную продолжительность рейса в условиях воздействия погодных, технических, портовых и инфраструктурных проблем. Эта информация может использоваться для планирования затрат на рейс и расчета его прибыльности. При комплексном проведении технического обслуживания судна и других технико-профилактических мероприятиях можно снизить количество технических проблем, что позволит уменьшить время задержки судна в пути. Для определения новых сроков также может применяться имитационная модель.

Метод Монте-Карло обладает широкими возможностями для анализа эффективности морских грузоперевозок. Так, он может найти применение в оценке эффективности использования бюджета рабочего времени морского терминала, анализе пропускной способности морских портов и терминалов, в оценке необходимого числа технологических линий для перегрузки грузов, в выборе оптимальной логистической стратегии. Для реализации метода применяется как специализированное программное обеспечение, так и любые табличные процессоры, имеющие генератор случайных чисел. Этот факт делает метод Монте-Карло популярным методом для разработки имитационных моделей.

Литература

1. Обзор морского транспорта – 2024 год. Лавирование по стратегически важным морским коридорам. Организация Объединенных Наций: Конференция ООН по торговле и развитию. Женева, 2024 г. 40 с. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2024overview_ru.pdf (дата обращения: 14.05.2026).
2. **Бхагват Д.** Судоходство на Северном морском пути: необходимо уделять больше внимания сотрудничеству и безопасности. Часть I // Арктика и Север. 2020. № 39. С. 5–25.
3. **Бхагват Д.** Судоходство на Северном морском пути: необходимо уделять больше внимания сотрудничеству и безопасности. Часть II // Арктика и Север. 2020. № 40. С. 5–25.
4. **Елисеев Д.О., Наумова Ю.В.** Моделирование транзитных перевозок по Северному морскому пути в условиях климатических изменений // Проблемы прогнозирования. 2021. № 2 (185). С. 63–74.
5. **Ермаков И.А., Подоляко А.А.** Проблемы и перспективы развития «зеленой» логистики на морском транспорте в Российской Федерации // Вестник университета. 2024. № 3. С. 54–62.
6. Прогноз динамики логистических задержек в морских перевозках на фоне эскалации конфликта на Ближнем Востоке и сценарии развития: статья от 05.03.2026 г. // Cargotime: аналитика. URL: <https://cargotime.ru/useful/prognoz-dinamiki-logisticheskikh-zaderzhek-v-morskih-perevozkah-na-fone-eskalacii-konflikta-na-blizhnem-vostoke-i-scenarii-razvitiya> (дата обращения: 14.05.2026).
7. **Фатхутдинова Д.** Метод Монте-Карло: статья от 22.05.2024 г. // Словарь маркетолога. URL: <https://www.unisender.com/ru/glossary/cto-takoe-method-monte-carlo/?ysclid=mgsgru1k7441753636#anchor-3> (дата обращения: 15.05.2026).
8. Метод Монте-Карло простыми словами: суть и применение в жизни // Sky.pro. URL: <https://sky.pro/wiki/analytics/metod-monte-karlo-prostymi-slovami-sut-i-primeneniye-v-zhizni/?ysclid=mgshge1gyb403102343> (дата обращения: 15.05.2026).
9. **Кулецкая А.** Танкеры теряются между двух берегов: статья от 20.06.2025 г. // Коммерсантъ: электронное издание. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7830837> (дата обращения: 11.05.2026).
10. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 N 81-ФЗ (ред. от 31.07.2025) // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22916/ (дата обращения: 11.05.2026).
11. **Попов В.В., Ольшевский А.Р.** Управление безопасной эксплуатацией судов: конспект лекций. Керчь: изд-во ФГБОУ ВО «КГМТУ», 2023. 115 с. URL: <https://lib.kgmtu.ru/wp-content/uploads/no-category/5570.pdf> (дата обращения: 12.05.2026).
12. РД 31.21.30-97. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: официальный сайт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041473?ysclid=mp86zzv83u420287294> (дата обращения: 12.05.2026).
13. Кодекс торгового мореплавания Российской Федерации от 30.04.1999 N 81-ФЗ (ред. от 31.07.2025) // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22916/ (дата обращения: 12.05.2026).
14. Постановление Правительства РФ «Об утверждении технического регламента о безопасности объектов морского транспорта» от 29.08.2025 N 1307 // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_513447/ (дата обращения: 12.05.2026).