

УДК 656.073

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-4-94-103

EDN: IINOMN

Научная статья

Генезис теории надежности транспортно-логистической инфраструктуры в контексте устойчивого развития Арктической зоны и Северного морского пути

С. Е. Барыкин^{✉1}, О. В. Компанийцева²

¹Высшая школа сервиса и торговли

Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50

²Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского
197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

Аннотация. Интерпретация надежности как омниканальной синхронизации логистической экосистемы, в которой устойчивость достигается через согласованное взаимодействие физических, цифровых, организационных и институциональных компонентов, позволяет учесть реальную специфику арктической инфраструктуры, включая климатические риски, фрагментарность сети, цифровое неравенство и необходимость гибкой маршрутизации.

Цель исследования – теоретически обосновать эволюцию концепции надежности транспортно-логистической инфраструктуры в контексте устойчивого развития Арктической зоны и Северного морского пути, выявить методологические ограничения существующих подходов и предложить теоретически аргументированную модель надежности с позиции омниканальной логистической синхронизации, адаптированной к макрологистическим условиям Арктики.

Методы. Методологическая база включает сравнительно-аналитический и системный подходы, а также принципы арктического регионального анализа.

Результаты. В статье рассмотрена эволюция подходов к теории надежности транспортно-логистической инфраструктуры с акцентом на специфику Арктической зоны и Северного морского пути. Обоснована необходимость перехода от инженерных трактовок надежности к когнитивной модели, основанной на предиктивной аналитике и цифровых двойниках. Надежность интерпретируется как омниканальная синхронизация логистической экосистемы, обеспечивающая устойчивость и адаптивность при высокой степени территориальной и климатической неопределенности. Представлено пять этапов развития категории надежности: от инженерного уровня до цифровой и платформенной надежности.

Выводы. Предложенный подход раскрывает потенциал активного управления логистической надежностью с помощью когнитивных цифровых платформ, что может лечь в основу стратегического планирования арктической логистики.

Ключевые слова: логистика, надежность, когнитивные модели, Арктика, цифровая платформа, пространственное развитие, устойчивость, транспортно-логистическая инфраструктура

Поступила 26.06.2025, одобрена после рецензирования 04.07.2025, принята к публикации 28.07.2025

Для цитирования. Барыкин С. Е., Компанийцева О. В. Генезис теории надежности транспортно-логистической инфраструктуры в контексте устойчивого развития Арктической зоны Северного морского пути // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 4. С. 94–103. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-4-94-103

Origin of transport and logistics infrastructure reliability theory in the context of sustainable development of the Arctic zone and the Northern Sea Route

S.E. Barykin^{✉1}, O.V. Kompaniitseva²

¹Graduate School of Service and Trade
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorosiyskaya street

²Mozhaisky Military Space Academy
197198, Russia, St. Petersburg, 13 Zhdanovskaya street

Abstract. Interpreting reliability as an omnichannel synchronization of a logistics ecosystem, where sustainability is achieved through coordinated interaction between physical, digital, organizational, and institutional components, enables us to take into account the unique characteristics of the Arctic infrastructure, including climate-related risks, network fragmentation, digital inequalities, and the need for flexible routing strategies.

Aim. The paper theoretically justifies the evolution of the concept of transport and logistics infrastructure reliability in the context of sustainable development of the Arctic zone and the Northern Sea Route. It identifies the methodological limitations of existing approaches and proposes a theoretically grounded model for reliability based on omnichannel logistics synchronization that is adapted to the macro-logistical conditions of the Arctic.

Methods. The methodological basis includes comparative-analytical and systematic approaches, as well as the principles of regional analysis of the Arctic.

Results. The paper explores the advancement approaches to the theory of transport and logistics infrastructure reliability, focusing on the specific challenges of the Arctic region and the Northern Sea Route. The article argues for a shift from traditional engineering interpretations of reliability towards a cognitive model that incorporates predictive analytics and the use of digital twins. Reliability is defined as the omnichannel synchronization of the logistics system, ensuring stability and resilience in the face of high levels of territorial and climatic uncertainty. The paper outlines five stages in the development of the concept of reliability: from an engineering-based approach to a more digital and platform-driven paradigm.

Conclusions. The proposed approach highlights the potential of actively managing logistics reliability through the cognitive digital platforms, which can form the foundation for strategic planning of Arctic logistics.

Keywords: logistics, reliability, cognitive models, Arctic, digital platform, spatial development, sustainability, transport and logistics infrastructure

Submitted 26.06.2025,

approved after reviewing 04.07.2025,

accepted for publication 28.07.2025

For citation. Barykin S.E., Kompaniitseva O.V. Origin of transport and logistics infrastructure reliability theory in the con-text of sustainable development of the Arctic zone and the Northern Sea Route. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS*. 2025. Vol. 27. No. 4. Pp. 94–103. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-4-94-103

ВВЕДЕНИЕ

Развитие транспортно-логистической инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), в том числе в рамках реализации потенциала Северного морского пути, актуализирует необходимость переосмысления теоретических оснований надежности. На фоне высокой степени климатической изменчивости, инфраструктурной изолированности и институциональной фрагментарности становится очевидным, что традиционные инженерные трактовки надежности как отказоустойчивости и технической стабильности

оказываются методологически недостаточными для описания функционирования логистических систем в условиях Арктики¹.

Современные исследования подчеркивают необходимость системной интерпретации надежности как способности логистической инфраструктуры обеспечивать бесперебойность и согласованность транспортных, информационных и управленческих процессов в условиях многокомпонентной неопределенности. В этом контексте надежность рассматривается не как характеристика отдельного элемента инфраструктуры, а как свойство всей логистической системы, включающей физические, цифровые, институциональные и организационные компоненты [1–4].

Центральным тезисом настоящей статьи является интерпретация надежности как результат эволюции логистических парадигм: от инженерных представлений о безотказности к концепции омниканальной синхронизации, предполагающей высокую степень согласованности всех уровней логистической экосистемы [5]. Такая трактовка особенно значима применительно к условиям Северного морского пути, где функционирование логистических узлов требует не только прочности, но и гибкости, отказоустойчивости, цифровой сопряженности и устойчивого управления [6].

Цель исследования – теоретически обосновать эволюцию концепции надежности транспортно-логистической инфраструктуры в контексте устойчивого развития Арктической зоны и Северного морского пути, выявить методологические ограничения существующих подходов и предложить теоретически аргументированную модель надежности с позиции омниканальной логистической синхронизации, адаптированной к макрологистическим условиям Арктики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Настоящее исследование базируется на концептуально-историческом подходе, предполагающем анализ эволюции научных представлений о надежности как категории, используемой в инженерии, логистике и инфраструктурном управлении. Основной задачей методологического аппарата является выявление смысловых трансформаций понятия «надежность» на разных этапах формирования логистической науки и их адаптация к специфике функционирования транспортно-логистической инфраструктуры в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

Для обоснования перехода к современной интерпретации надежности как омниканальной синхронизации использованы:

- **сравнительно-аналитический метод** – для сопоставления различных научных подходов к оценке надежности логистических систем, включая исследования в области supply chain resilience, robustness, redundancy (Sheffi, 2007; Christopher, 2011) [7, 8], а также теории логистического сервиса и управления цепями поставок [9];
- **системный подход** – для выявления взаимосвязей между компонентами инфраструктурной надежности: техническими, цифровыми, институциональными, климатическими и организационными элементами;
- **тематическое структурирование научных источников** – для выделения пяти ключевых этапов развития концепции надежности (инженерный, логистический, инфраструктурный, цифровой, омниканальный), что позволило обосновать эволюционный характер ее понимания;

¹Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. N 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года" (с изменениями и дополнениями 27 февраля 2023), URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972> (дата обращения: 10.05.2025)

• **принципы арктического регионального анализа** – для обоснования специфики надежности транспортно-логистической инфраструктуры в условиях высокой территориальной изоляции, климатических рисков и институциональных ограничений.

Информационную базу составили англоязычные и российские научные публикации, посвященные устойчивости логистических систем, цифровизации логистики и функционированию Северного морского пути, включая статьи из международных изданий (*Sustainability, Environmental Pollution, Engineering Science, Frontiers in Energy Research* и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Этап инженерной надежности. Проблематика надежности в логистических системах традиционно формировалась в рамках инженерных наук, где ключевым фокусом являлась отказоустойчивость оборудования и технических объектов (Haines Y.Y., 2009) [10]. На раннем этапе развития логистики понятие надежности формировалось в рамках инженерной дисциплины и трактовалось как способность технической системы функционировать безотказно в течение определенного времени при заданных условиях эксплуатации. Эта трактовка применялась преимущественно к отдельным объектам инфраструктуры: транспортным средствам, оборудованию, средствам погрузки и хранения. Основное внимание уделялось отказоустойчивости, прочности, резервированию и техническому регламенту эксплуатации [11]. Однако с развитием логистики как междисциплинарной области возникает необходимость синтетического подхода, объединяющего инженерную, управленческую, цифровую и институциональную компоненты. Современные исследования подчеркивают важность смещения акцента от технической стабильности к способности системы адаптироваться и восстанавливаться после нарушений – парадигма *resilience* приобретает все большее значение в условиях территориальной и климатической неопределенности. В этом контексте важнейшими являются вопросы обеспечения самопроверяемости и контролепригодности компонентов на микро- и макроуровнях, поскольку позволяют логистической системе своевременно адаптироваться под новые условия функционирования при фиксации критических изменений в ее составляющих [12, 13]. В арктических условиях инженерный аспект надежности по-прежнему остается значимым, однако он не охватывает сложности пространственно-распределенных логистических систем.

2. Логистическая надежность: поведенческий уровень. С развитием логистики как самостоятельной области знания категория «надежность» расширилась за пределы технических характеристик и стала пониматься как устойчивость логистических операций. Надежность логистической системы определялась способностью обеспечивать стабильное выполнение заказов, соблюдение сроков, точность поставок и минимизацию сбоев. В работах Д. Бауэрсокса и соавт. надежность входит в число базовых логистических сервисных характеристик наряду с комплектностью, частотой и скоростью обслуживания [9].

На этом этапе формируются основные показатели логистической надежности: своевременность доставки, точность заказа, среднее время отклонения, отклонение от графика поставки. Эти параметры легли в основу современных стандартов логистического сервиса (KPI) и применяются в логистике Северного морского пути при оценке операционной устойчивости в условиях сезонной навигации.

3. Инфраструктурный уровень: пространственная надежность. В начале 2000-х годов на фоне глобализации цепей поставок и формирования трансрегиональных логистических коридоров понятие надежности начало интерпретироваться в более широком, пространственном контексте. Надежность стала характеристикой не только потоков, но и самих инфраструктурных систем, включая транспортные узлы, терминалы, порты, а также их взаимодействие с цифровыми и институциональными платформами.

Логистика Арктической зоны характеризуется инфраструктурной изолированностью, экстремальными погодными условиями и высокой сезонностью. В исследовании Stephenson и др. представлена количественная модель изменения транспортной доступности в условиях изменения климата, где обоснованно указывается на необходимость адаптивного проектирования логистической инфраструктуры с учетом сокращения зимних дорог и увеличения открытых морских участков [14]. Это дополняется пространственно-системными подходами, предложенными в географии транспорта (Rodrigue J.-P., 2006), подчеркивающими важность оценки не только путей, но и узлов транспортной сети как элементов, определяющих общую надежность [15]. Как показано в работе Chen et al. (2024), климатическая неопределенность, связанная с интенсивностью ледообразования и погодными окнами, требует прогнозной оценки надежности маршрутов на уровне всей системы, а не только отдельных перевозчиков [16]. Согласно модели, предложенной Zhang и Li (2015), при проектировании логистических сетей надежность объектов инфраструктуры может быть учтена через вероятностные параметры в условиях неопределенности [17].

4. Цифровой уровень: алгоритмическая и платформенная надежность. Цифровизация логистических процессов вызвала активное развитие когнитивных платформ и цифровых двойников. Исследования (Tao F., 2019; Zhang Y., 2016) показывают, что цифровые двойники способны обеспечивать высокоточную симуляцию физических объектов в виртуальной среде, позволяя не только прогнозировать сбои, но и оперативно формировать стратегии управления [18, 19]. Особенно это важно для условий Арктики, где дистанционный мониторинг и цифровое моделирование становятся ключевыми средствами обеспечения надежности (Barykin et al., 2024) [20]. Цифровая надежность проявляется как способность логистической системы функционировать при частичных отказах связи, информационной задержке или искажении данных. Это требует новых моделей оценки – на основе симуляции, цифровых двойников и предиктивной аналитики.

5. Омниканальная надежность: синхронизация экосистемы. На современном этапе надежность трактуется как способность логистической инфраструктуры обеспечить согласованную, непрерывную и гибкую работу всей экосистемы – от порта до цифрового интерфейса клиента. Это состояние авторы предлагают назвать омниканальной надежностью. В этой парадигме логистика рассматривается как совокупность физического, цифрового и управленческого взаимодействия между всеми участниками цепи, включая пользователей, перевозчиков, операторов и регуляторов.

Как отмечается в Barykin et al. (2022), омниканальность – это не маркетинговый термин, а логистическая модель, обеспечивающая устойчивость через кросс-платформенную интеграцию и резервные логистические траектории [21]. В условиях Севера это проявляется, например, в гибкости маршрутов, дублировании логистических узлов, возможности перехода на альтернативные виды транспорта или управлении распределением ресурсов в режиме реального времени.

Для оценки надежности в арктических логистических системах критически важны такие параметры, как автономность функционирования при отсутствии связи, отказоустойчивость при низких температурах, способность к быстрому восстановлению логистических каналов после нарушения, а также интеграция с системами пространственной координации потоков. Это требует формирования унифицированных метрик надежности, включающих такие параметры, как среднее время отказа (MTBF), коэффициент восстановления, логистическая доступность и индекс адаптивности, адаптированные к арктическим условиям.

Таким образом, надежность становится функцией согласованности и координации, а не только стабильности отдельных компонентов. Это формирует новую научную нишу, ориентированную на оценку способности логистической системы функционировать в условиях многоконтурной неопределенности, свойственной СМП и АЗРФ.

НАУЧНАЯ ДИСКУССИЯ

В российской научной традиции наблюдается тенденция к трактовке надежности преимущественно через технические параметры и показатели логистического сервиса. Это упрощает системное восприятие логистики как экосистемы. Таким образом, научная новизна предложенного подхода заключается в смещении акцента на способность логистической инфраструктуры координировать разнородные каналы взаимодействия в условиях нестабильной среды, что обеспечивает ее устойчивость и адаптивность.

В условиях Арктической зоны РФ, особенно на маршрутах Северного морского пути, применение таких моделей требует адаптации, так как характерные риски отличаются высокой природной неопределенностью, инфраструктурной изолированностью и сезонностью логистических операций. Поэтому предложенная в статье трактовка надежности как омниканальной синхронизации является развитием существующих концептов и отвечает на вызовы, обусловленные спецификой макрологистических пространств.

Вопрос интерпретации надежности логистических систем остается предметом активной научной дискуссии. Широкое распространение получили модели устойчивости цепей поставок, в которых надежность рассматривается как способность системы к адаптации, возврату в стабильное состояние после нарушений (resilience) или сохранению функциональности при сбоях (robustness). Однако эти подходы, как указывает Y. Sheffi (2007), в основном ориентированы на высокоразвитые рынки с устойчивыми институциональными и цифровыми системами [7].

Современная научная литература фрагментирована в части подходов к оценке надежности: в одних исследованиях превалирует инженерный аспект (физический отказ), в других – стратегические риски. Практически отсутствует синтез, в котором надежность рассматривалась бы как комплексное свойство когнитивно-логистической платформы, объединяющей предиктивные ИИ-модели, цифровые двойники и управляемую устойчивость потоков в реальном времени. Особый дефицит наблюдается в области интеграции моделей технической диагностики, когнитивных ИИ-систем и территориального управления логистикой, что особенно важно для арктических макрологистических пространств. Это создает методологический пробел, который и закрывается предлагаемым подходом.

Существенное значение имеют и институциональные факторы. В условиях Арктики надежность макрологистической инфраструктуры оказывается тесно связанной с институциональной координацией между субъектами, режимами доступа к инфраструктуре и нормативными требованиями. Теория институциональных изменений (North, 1990) применима здесь для анализа устойчивости логистических решений к институциональной фрагментации [22]. Таким образом, формирование целостной модели надежности требует выхода за рамки технической диагностики и интеграции цифровых, организационных и территориальных параметров.

Ключевым остается вопрос оценки надежности поставок с учетом динамики интенсивности отказов. Методика, предложенная П. А. Бочкаревым (Бочкарев П. А., 2015), предлагает уточненные формулы расчета наработки на отказ, коэффициента готовности и вероятности безотказной работы с учетом нормального распределения интенсивности сбоев, что приближает модель к реальным условиям снабжения [1]. Такой подход позволяет идентифицировать критические интервалы в логистическом процессе и предсказывать вероятности наступления дефицитных ситуаций на основании динамических данных.

В табл. 1 представлена типология параметров, применяемых в литературе для оценки надежности логистических систем.

Таблица 1. Параметры оценки надежности логистической системы (в интерпретации У Цзин)**Table 1.** Parameters for assessing the logistics reliability (according to Wu Jing's interpretation)

Категория	Параметры оценки
Надежность элементов	Производственная стабильность, финансовое состояние, отказоустойчивость
Логистические затраты	Стоимость транспортировки, убытки от возвратов и простоев
Качество логистических процессов	Точность заказов, соблюдение сроков, количество жалоб
Время логистического цикла	Обработка заказов, транспортировка, погрузочно-разгрузочные операции
Комплектность	Полнота поставок, точность конфигурации заказов

Выявляется ряд недостатков существующих теоретических моделей:

- ограниченность техническими или стоимостными параметрами;
- игнорирование специфики макрологистических пространств, таких как Арктика;
- слабая связка между логистической надежностью и стратегическим управлением развитием инфраструктуры;
- неразработанность критериев надежности применительно к цифровым и институциональным компонентам.

Эти выводы обосновывают необходимость разработки собственной методологии оценки надежности транспортно-логистической инфраструктуры СМП, учитывающей региональные, системные и экосистемные особенности функционирования логистических процессов в арктическом пространстве. Китайские ученые акцентируют внимание на необходимости повышения предсказуемости времени транспортировки по СМП, рассматривая ее как ключевой параметр логистической надежности с точки зрения грузоотправителя. В модели, предложенной в [23], обосновывается зависимость между точностью предиктивных расчетов и уровнем доверия к маршруту. В рамках российской научной традиции в [24] исследователи подчеркивают историческую эволюцию института СМП как инфраструктурной системы национального масштаба и предлагают комплексный взгляд на надежность как многослойную категорию, включающую технические, организационные и институциональные аспекты.

Формирование целостной модели надежности требует выхода за рамки технической диагностики и интеграции цифровых, организационных и территориальных параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что концепция надежности транспортно-логистической инфраструктуры претерпела существенные изменения: от инженерной трактовки как отказоустойчивости к комплексной характеристике, отражающей согласованность функционирования всех элементов логистической системы в условиях высокой неопределенности. В условиях Арктической зоны Российской Федерации, и особенно при развитии Северного морского пути, надежность приобретает критически важное значение как фактор устойчивости и предсказуемости логистических потоков.

Предложена интерпретация надежности как **омниканальной синхронизации логистической экосистемы**, в которой устойчивость достигается через согласованное взаимодействие физических, цифровых, организационных и институциональных компонентов. Этот

подход позволяет учесть реальную специфику арктической инфраструктуры, включая климатические риски, фрагментарность сети, цифровое неравенство и необходимость гибкой маршрутизации.

Особое значение в новых моделях надежности приобретает предиктивная аналитика, позволяющая не только фиксировать текущие сбои в логистических системах, но и прогнозировать их с учетом многослойных факторов: от климатических и инфраструктурных до поведенческих. Ключевым направлением становится формирование систем самодиагностики, основанных на цифровых двойниках и когнитивных механизмах на базе логического анализа и ИИ [25].

В отличие от традиционных представлений, где надежность логистической инфраструктуры трактуется как «заданное техническое состояние», современный подход требует перехода к активным моделям управления надежностью в реальном времени. В этом контексте надежность следует интерпретировать не как статичное состояние, а как динамический процесс управления, где цифровая среда функционирует как система адаптивного реагирования. Это включает: адаптивную маршрутизацию, динамическое перераспределение ресурсов, прогнозирование рисков в онлайн-режиме и автоматическое принятие решений системой на основе непрерывной самодиагностики.

Таким образом, дальнейшее развитие теории надежности должно ориентироваться на междисциплинарную модель, учитывающую системные свойства логистики в условиях территориальной и инфраструктурной уязвимости. Это направление требует создания новых методик оценки, адаптированных к условиям СМП, и может стать теоретической основой для стратегического управления арктической логистикой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бочкарев А. А., Бочкарев П. А. Надежность и устойчивость цепей поставок: модели и алгоритмы: монография. СПб.: Скифияпринт, 2022. 200 с. EDN: YQDGV L
Bochkarev A.A., Bochkarev P.A. Reliability and stability of supply chains: models and algorithms: monograph. SPb.: Scythiaprint. 2022. 200 p. EDN: YQDGV L. (In Russian)
2. Шурпатов И. Г., Зайцев Е. И. О методах расчета уровня надежности элементов цепи поставок // Логистика и управление цепями поставок. 2011. № 1. С. 31–37. EDN: NXUQGB
Shurpatov I.G., Zaitsev E.I. On methods for calculating the reliability level of supply Chain elements. *Logistics and Supply Chain Management*. 2011. No. 1. Pp. 31–37. EDN: NXUQGB. (In Russian)
3. Компанийцева О. В. Логистическая интеграция системы управления проектом и инфраструктуры региона // Аудит и финансовый анализ. 2014. № 4. С. 230–233. EDN: TJSKEJ
Kompaniitseva O.V. Logistical integration of the project management system and the region's infrastructure. *Audit and financial analysis*. 2014. No. 4. Pp. 230–233. EDN: TJSKEJ. (In Russian)
4. Barykin S.E., Wu J. Designing a logistics network in international trade. *Globus: Economy and Law*. 2021. Vol. 7. No. 1 (41). Pp. 33–37. EDN: COPJTT
5. Шульженко Т. Г. Эволюция концепции глобальной логистики в контексте современных условий интернационализации мировой экономики // Логистические системы в глобальной экономике. 2016. № 6. С. 391–395. EDN: VUWPZB
Shulzhenko T.G. Evolution of the global logistics concept in the context of contemporary internationalization of the world economy. *Logistics Systems in the Global Economy*. 2016. No. 6. Pp. 391–395. EDN: VUWPZB. (In Russian)
6. Шумаев В. А., Мешалкин В. П., Бородин В. А., Белозерский А. Ю. Экономико-математические методы оптимизации материальных потоков в цепях поставок // Ученые записки Российской академии предпринимательства. 2011. № 27. С. 101–116. EDN: ОКМКАХ

Shumaev V.A., Meshalkin V.P., Borodin V.A., Belozersky A.Yu. Economic and mathematical methods for optimizing material flows in supply chains. *Scientific Notes of the Russian Academy of Entrepreneurship*. 2011. No. 27. Pp. 25–29. EDN: OKMKAX. (In Russian)

7. Sheffi Y. The Resilient enterprise: overcoming vulnerability for competitive advantage. MIT Press, 2007.

8. Christopher M. Logistics and supply chain management: strategies for reducing cost and improving service. Pearson Education Limited, 2011.

9. Bowersox D.J., Closs D.J., Cooper M.B. Supply Chain logistics management. McGraw-Hill, 2011.

10. Haimes Y.Y. Risk modeling, assessment, and management. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2009. 1040 p. ISBN: 978-0-470-42248-9

11. Efanov D.V., Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I. Boolean-complement based fault-tolerant electronic device architectures. *Automation and Remote Control*. 2021. Vol. 82. No. 8. Pp. 1403–1417. DOI: 10.1134/S0005117921080075

12. Efanov D.V., Yelina Y.I. Design of self-checking digital devices with boolean signals correction using weight-based bose–lin codes. *Control Sciences*. 2024. No. 4. Pp. 22–36. DOI: 10.25728/cs.2024.4.3

13. Efanov D.V., Pivovarov D.V. Design of Self-checking discrete devices based on polynomial codes with computation control via several diagnostic attributes. *Automation and Remote Control*. 2025. Vol. 86. No. 5. Pp. 402–416. DOI: 10.31857/S0005117925050038

14. Stephenson S.R., Smith L.C., Agnew J.A. Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic. *Nature Climate Change*. 2011. Vol. 1. Pp. 156–160. DOI: 10.1038/nclimate1120

15. Rodrigue J.-P., Notteboom T. The geography of transport systems. London: Routledge, 2006.

16. Chen J., Kang S., Wu A., Chen L. Projected emissions and climate impacts of Arctic shipping along the northern sea route. *Environmental Pollution*. 2024. No. 341. ID 122848. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.122848

17. Zhang D., Li X., Huang Y. et al. A robust optimization model for green regional logistics network design with uncertainty in future logistics demand. *Advances in Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 7. No. 12. DOI: 10.1177/1687814015620518

18. Zhang Y., Ren S., Liu Y., Si S. A big data analytics architecture for cleaner manufacturing and maintenance processes of complex products. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 142. Pp. 626–641. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.123

19. Tao F., Qi Q., Wang L., Nee A.Y.C. Digital twins and cyber–physical systems toward smart manufacturing and industry 4.0: correlation and comparison. *Engineering*. 2019. Vol. 5. Pp. 653–661. DOI: 10.1016/j.eng.2019.01.014

20. Barykin S.E., Sergeev S.M., Provotorov V.V. et al. Sustainability analysis of energy resources transport based on a digital n-d logistics network. *Engineered science*. 2024. Vol. 29. ID 1093. DOI: 10.30919/es1093

21. Barykin S.E., Chursin A.A., Barykin A.S. et al. Energy efficient digital omnichannel marketing: managerial and technological dimensions. *Frontiers in Energy Research*. 2022. No. 10. ID: 946588. DOI: 10.3389/fenrg.2022.946588

22. North D.C. Institutions, institutional change and economic performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

23. Gao X., Ge W., Yu Q., Zhao X. Optimizing northern sea route transportation times: a study from Chinese shipper's perspective. *OMAE Conference Proceedings*. 2024. Vol. 6. DOI: 10.1115/OMAE2024-127804

24. Goldin V.I. Northern sea route: past, present, and future. results of the international scientific megaproject. *Arctic and North*. 2024. No. 57. Pp. 244–253. DOI: 10.37482/issn2221-2698.2024.57.244

25. Yelina Y.I., Efanov D.V. Weight-based bose–lin codes in concurrent error-detection circuit based on boolean signal correction. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2025. Vol. 64. No. 1. Pp. 17–35. DOI: 10.1134/S1064230725700029

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Вклад авторов:

Барыкин С. Е. – научное руководство исследованием, постановка целей и задач исследования, формулирование практической значимости исследования.

Компанийцева О.В. – сбор и аналитика данных и проведение обзора литературы, проведение критического анализа материалов, подготовка начального варианта текста.

Contribution of the authors:

Barykin S.E. – scientific supervision, setting the goals and objectives, formulating the practical significance of the study.

Kompaniitseva O.V. – data collection and analysis and literature review, critical analysis of materials, initial version of the text.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторах

Барыкин Сергей Евгеньевич, д-р экон. наук, профессор, профессор Высшей школы сервиса и торговли, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого;

195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новороссийская, 50;

sbe@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>, SPIN-код: 9382-2074

Компанийцева Оксана Вячеславовна, канд. экон. наук, доцент кафедры Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского;

197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13

oks1@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0068-0411>, SPIN-код: 3019-1038

Information about the authors

Sergey E. Barykin, Doctor of Economic Sciences, Professor, Graduate School of Service and Trade, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University;

195251, Russia, St. Petersburg, 50 Novorosiyskaya street;

sbe@list.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9048-009X>, SPIN-code: 9382-2074

Oksana V. Kompaniitseva, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the Department Mozhaisky Military Space Academy;

197198, Russia, St. Petersburg, 13 Zhdanovskaya street;

oks1@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-0068-0411>, SPIN-code: 3019-1038