

ВЕСТНИК НАУКИ  
И ТВОРЧЕСТВА

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СБОЕВ  
В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК КРИТИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ НА КРИТИЧЕСКИЙ  
ПУТЬ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ  
МЕГАПРОЕКТОВ**

*Валиева Мария,  
руководитель направления  
закупок и выбора поставщиков,  
ГК «Миррико», Россия, г. Казань*

*E-mail: mariya.valieva08@gmail.com*

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема управления рисками инфраструктурных мегапроектов, возникающая из-за сбоев в цепях поставок критически важного оборудования, обладающего длительными циклами производства и сложной логистикой. Актуальность исследования обусловлена возрастающей волатильностью глобальных рынков и геополитической нестабильностью, которые многократно увеличивают вероятность разрывов логистических маршрутов и срыва контрактов. Целью работы является разработка имитационной модели, позволяющей количественно оценить влияние различных сценариев сбоев в поставках на формирование, смещение и деградацию критического пути проекта. В качестве методологической базы использованы методы стохастического сетевого планирования, дискретно-событийного моделирования и статистических испытаний, что позволило учесть вероятностную природу задержек и их каскадный эффект на взаимосвязанные этапы строительства. В результате исследования предложен алгоритм идентификации уязвимых узлов в логистических цепочках и расчета оптимальных буферов времени и стоимости, необходимых для парирования негативных воздействий. Доказано, что интеграция предложенной модели в систему календарного планирования мегапроекта позволяет прогнозировать сдвиги критического пути с высокой степенью точности и формировать превентивные стратегии митигации рисков, включая диверсификацию поставщиков, создание буферных запасов и динамическую оптимизацию графика производства работ. Практическая значимость работы заключается в предоставлении стейкхолдерам научно обоснованного инструмента для повышения устойчивости и предсказуемости реализации сложных инфраструктурных инициатив в условиях высокой неопределенности внешней среды.

**Ключевые слова:** инфраструктурные мегапроекты, цепи поставок, критическое оборудование, критический путь, имитационное моделирование,

управление рисками, стохастическое сетевое планирование, метод Монте-Карло, устойчивость проекта, логистические сбои.

**Актуальность исследования.** Актуальность исследования обусловлена фундаментальными изменениями в глобальной макроэкономической и геополитической среде, которые привели к беспрецедентной волатильности международных логистических маршрутов и разрыву устоявшихся производственно-сбытовых связей.

Инфраструктурные мегапроекты, такие, как строительство крупных энергетических объектов, транспортных магистралей, портовых комплексов и промышленных кластеров, характеризуются колоссальными бюджетами, длительными жизненными циклами и жесткой взаимозависимостью технологических этапов. Сердцевиной подобных проектов является критическое оборудование (например, уникальные турбины, силовые трансформаторы, специализированные тоннелепроходческие комплексы), которое отличается штучным производством, длительными сроками изготовления и сложной мультимодальной логистикой.

В условиях, когда традиционные детерминированные методы календарного планирования, такие как классический метод критического пути (СРМ), не способны адекватно учесть стохастическую природу современных рисков, любой сбой в поставке такого оборудования неизбежно вызывает эффект домино [3]. Задержка даже одного критического компонента приводит к каскадному смещению критического пути, простоям смежных подрядных организаций, росту косвенных издержек и срыву сроков ввода объекта в эксплуатацию, что влечет за собой не только прямые финансовые убытки, но и макроэкономические потери из-за недополученного инфраструктурного эффекта.

Таким образом, возникает острая научная и практическая необходимость в переходе от реактивного управления задержками к проактивному моделированию сценариев сбоев, что требует разработки новых математических и имитационных подходов, способных интегрировать логистические риски непосредственно в архитектуру сетевого графика мегапроекта.

**Цель исследования.** Цель исследования заключается в разработке комплексной имитационной модели, позволяющей количественно оценить влияние различных сценариев сбоев в цепях поставок критического оборудования на динамику, смещение и деградацию критического пути инфраструктурных мегапроектов, а также в формировании на ее основе методического инструментария для превентивной митигации рисков.

Для достижения данной цели решается ряд взаимосвязанных задач, включающих идентификацию уязвимых узлов в глобальных логистических цепочках, формализацию вероятностных характеристик задержек на этапах производства, таможенного оформления и транспортировки, а также расчет оптимальных временных и стоимостных буферов.

Исследование направлено на создание алгоритма, который позволит стейкхолдерам и руководителям проектов не просто констатировать факт срыва сроков, но и математически обосновывать стратегии адаптации, такие как диверсификация пула поставщиков, создание стратегических буферных запасов, пересмотр последовательности строительно-монтажных работ и динамическое перераспределение ресурсов в режиме, приближенном к реальному времени.

**Материалы и методы исследования.** Материалы и методы исследования базируются на синтезе теоретических положений теории управления проектами, теории вероятностей и математической статистики, а также на эмпирических данных, собранных в ходе реализации крупных инфраструктурных инициатив.

В качестве информационной базы исследования использованы исторические данные о фактических сроках поставок тяжелого и уникального оборудования за последние пять лет, статистика логистических сбоев на ключевых транспортных коридорах, технические спецификации и циклограммы изготовления критических активов, а также нормативно-справочная документация по сетевому планированию.

Методологический аппарат работы включает методы стохастического сетевого планирования и дискретно-событийного моделирования (DES), которые позволили воссоздать пошаговую логику движения оборудования от завода-изготовителя до монтажной зоны с учетом множества случайных факторов.

Ключевым аналитическим инструментом выступил метод статистических испытаний Монте-Карло, применение которого дало возможность провести тысячи итераций реализации сетевого графика мегапроекта при различных вероятностных распределениях задержек (логнормальном, бета- и распределении Вейбулла), что обеспечило получение надежных доверительных интервалов для сроков завершения проекта.

Наряду с этим, для оценки каскадного эффекта и выявления скрытых зависимостей применялись методы теории графов и анализа чувствительности, позволившие ранжировать логистические риски по степени их воздействия на критический путь. Такой комбинированный подход обеспечил высокую репрезентативность полученных результатов и их пригодность для практического внедрения в контур управления сложными инженерными проектами.

**Результаты исследования.** В современной практике управления инфраструктурными мегапроектами традиционные детерминированные методы сетевого планирования уступают место передовым цифровым механизмам, базирующимся на концепциях Индустрии 4.0 и технологиях больших данных.

Ключевую роль в моделировании логистических сбоев играет внедрение концепции цифровых двойников (Digital Twins) и информационного моделирования в расширенных измерениях 4D (календарное планирование) и 5D (управление стоимостью) [10]. Эти механизмы позволяют создать виртуальную

копию всего жизненного цикла проекта, где логистические цепочки поставок критического оборудования, такого как энергетические турбины, уникальные трансформаторы или тоннелепроходческие комплексы, жестко интегрированы в сетевой график (рис. 1).

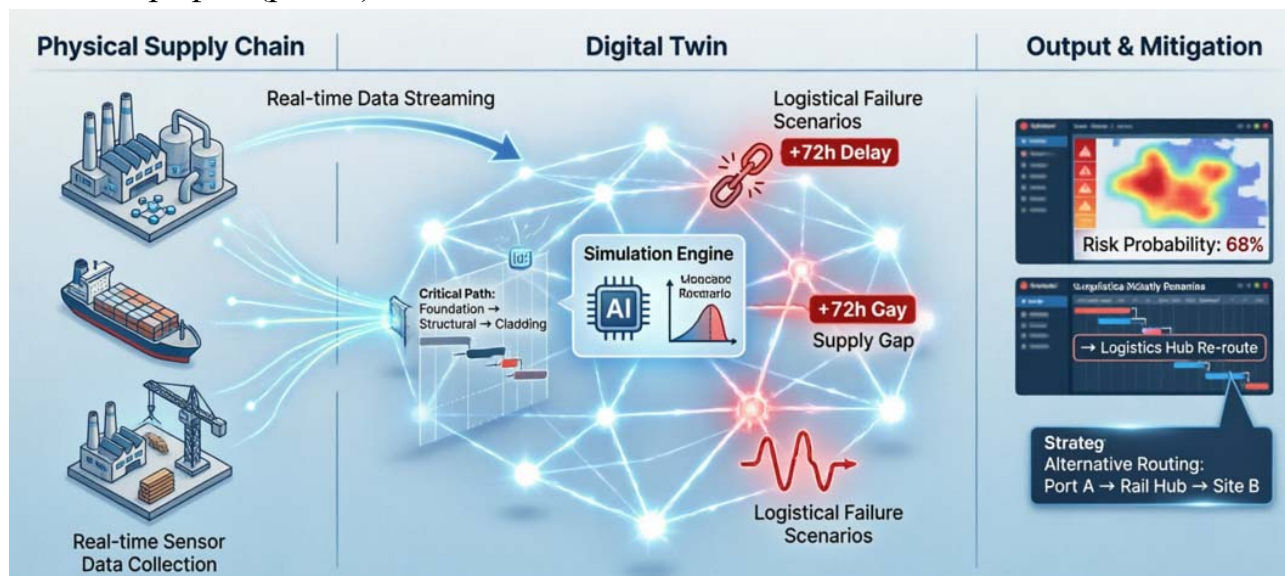


Рис. 1 Процесс моделирования логистических сбоев посредством цифровых двойников

Важнейшим современным инструментом выступает предиктивная аналитика на базе алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта, которые в режиме реального времени обрабатывают массивы данных от систем интернета вещей (IoT), отслеживающих геолокацию, температурные режимы и таможенный статус грузов [5]. При возникновении сбоя нейросетевые модели мгновенно пересчитывают вероятности завершения проекта, выявляя новые формирующиеся критические пути и предлагая оптимальные сценарии перераспределения ресурсов (табл. 1).

Дополнительно применяется дискретно-событийное моделирование в связке с облачными вычислительными мощностями, что позволяет проводить тысячи сценариев стресс-тестирования цепочки поставок с учетом геополитических шоков, погодных аномалий и производственных рисков, обеспечивая высокую точность прогнозов.

Эффективность применения данных механизмов ярко иллюстрируется статистикой и реальными примерами из мировой практики реализации мегапроектов. Согласно масштабным исследованиям, таким как фундаментальный анализ, проведенный экспертами Оксфордского университета, около 90% инфраструктурных мегапроектов по всему миру сталкиваются с превышением сметы более чем на 20%, при этом до 40% срывов сроков напрямую коррелируют с задержками в поставках уникального оборудования

[1]. В энергетическом секторе, особенно в проектах строительства крупных электростанций и магистральных подстанций, статистика показывает, что в период глобальных логистических кризисов средние сроки производства и доставки высоковольтного оборудования и газовых турбин возросли с традиционных 40-50 недель до 120-150 недель, то есть увеличились более чем в три раза.

Таблица 1

Искусственный интеллект в моделировании логистических сбоев [4; 6]

| Направление применения ИИ                                      | Используемые методы и алгоритмы                                                                               | Функции в процессе моделирования                                                                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Предиктивная аналитика производственных задержек               | Машинное обучение (Random Forest, Gradient Boosting), рекуррентные нейронные сети (LSTM).                     | Анализ исторических данных заводов-изготовителей, выявление скрытых паттернов, прогнозирование вероятности срыва сроков производства уникального оборудования (например, кастомизированных турбин или трансформаторов). |
| Мониторинг внешних макроэкономических и геополитических рисков | Обработка естественного языка (NLP), анализ тональности, семантический поиск.                                 | Непрерывный скрининг новостных лент, санкционных списков, таможенных регламентов и погодных сводок для оценки влияния внешних шоков на глобальные логистические маршруты.                                               |
| Динамическая оптимизация критического пути                     | Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning), генетические алгоритмы, эвристический поиск.               | Поиск оптимальных стратегий перераспределения ресурсов, изменения технологической последовательности работ и активации резервных маршрутов в условиях наступившего логистического сбоя.                                 |
| Генерация экстремальных сценариев «Что-если»                   | Генеративно-состязательные сети (GAN), глубокое обучение с подкреплением.                                     | Создание тысяч реалистичных, но редких каскадных сценариев сбоев (например, одновременный производственный брак на заводе и блокировка ключевого транспортного узла), неочевидных для традиционного анализа.            |
| Интеграция с IoT и предиктивное обслуживание грузов            | Компьютерное зрение, алгоритмы обнаружения аномалий (Anomaly Detection), нейросетевой анализ временных рядов. | Анализ телеметрии с датчиков, отслеживающих состояние критического оборудования в транзите (вибрация, температура, влажность), для предотвращения физических повреждений.                                               |
| Автоматизация обработки претензий и контрактных рисков         | Экспертные системы, NLP для анализа контрактной документации.                                                 | Моделирование юридических и контрактных последствий логистических сбоев (штрафы, приостановка работ, судебные разбирательства) и их интеграция в стоимостную модель проекта (5D).                                       |

Например, при реализации проекта строительства крупного газоперерабатывающего комплекса задержка в поставке трех кастомизированных силовых трансформаторов всего на 4,5 месяца привела к смещению критического пути на 135 дней. Применение имитационного моделирования позволило еще на этапе проектирования выявить эту уязвимость: алгоритмы Монте-Карло показали, что вероятность срыва сроков ввода в эксплуатацию без создания буферов составляет 87%, а внедрение механизма параллельного резервирования и раннего бронирования производственных слотов на заводах-изготовителях снизило этот риск до 12%, сэкономя проекту около 45 миллионов долларов на избежании штрафов и простоев смежных подрядчиков.

Другим показательным примером служит транспортное строительство, в частности, возведение метрополитенов и подводных тоннелей, где критическим оборудованием выступают щитовые комплексы. Статистика международных проектов указывает, что срыв сроков поставки или пусконаладки тоннелепроходческих щитов в среднем увеличивает общую продолжительность критического пути на 15-25%, а стоимость простоя специализированной бригады достигает 1,5-2 миллионов долларов в неделю. В одном из проектов строительства морской переправы задержка доставки специализированных узлов для щита из-за разрыва логистических цепочек составила 8 месяцев.

Интеграция цифрового двойника логистической цепочки с графиком производства работ позволила в режиме онлайн отслеживать отставание и автоматически перестраивать график: модель предложила механизм оптимизации, заключающийся в изменении технологии проходки на начальных участках и привлечении дополнительных смен на смежных работах, что позволило сократить отставание критического пути до 2,5 месяцев и предотвратить колоссальный рост косвенных издержек [8].

Следует отметить, что фундаментальной проблемой в области моделирования влияния сбоя цепей поставок на критический путь инфраструктурных мегапроектов остается острый *дефицит репрезентативных и достоверных эмпирических данных*, необходимых для калибровки вероятностных моделей. Статистика задержек в поставках уникального и критического оборудования часто носит фрагментарный, закрытый или субъективный характер, поскольку компании неохотно делятся информацией о своих логистических неудачах и контрактных конфликтах [7]. Из-за этого исследователям и аналитикам приходится опираться на экспертные оценки, которые подвержены когнитивным искажениям, либо использовать усредненные отраслевые данные, не учитывающие специфику конкретного региона или уникальность самого оборудования.

Серьезным технологическим и методологическим барьером выступает проблема *интеграции разрозненных информационных сред* и вычислительная сложность динамических моделей. Системы управления цепями поставок (SCM и ERP-системы) и программные комплексы календарного планирования (такие,

как Oracle Primavera) функционируют на основе различных математических аппаратов, структур данных и онтологий, что создает «информационные silos» (изолированные хранилища данных).

Синхронизация логистических статусов в реальном времени с сетевым графиком проекта требует создания сложных кастомных интерфейсов, которые часто работают с задержками или теряют данные при трансформации. Более того, при моделировании мегапроектов, сетевые графики которых могут содержать десятки и сотни тысяч операций, учет ресурсных ограничений и динамическое пересчитывание критического пути при каждом сценарии сбоя требуют колоссальных вычислительных мощностей.

Значительные трудности вызывает *формализация поведенческих, контрактных и макроэкономических факторов*, которые в реальности оказывают на критический путь не меньшее влияние, чем чисто логистические сбои.

Большинство имитационных моделей базируются на допущении о рациональном поведении участников проекта и неизменности контрактных условий, однако на практике задержка поставки оборудования неизбежно порождает цепочку претензий, судебных разбирательств, приостановку смежных работ и стратегическое искажение информации (например, намеренное занижение сроков поставщиками для получения контракта с последующим их срывом). Модели крайне плохо учитывают человеческий фактор, коррупционные риски, бюрократические задержки при таможенном оформлении и изменение нормативно-правовой базы в ходе реализации проекта.

Все вышеперечисленные факторы формируют глубокий разрыв между передовыми теоретическими разработками в области риск-ориентированного моделирования и их рутинным практическим внедрением на строительных площадках [9]. Создаваемые академической средой модели зачастую оказываются либо излишне упрощенными и не отражающими реальной сложности мегапроекта, либо чрезмерно громоздкими, требующими для своей эксплуатации узкопрофильных специалистов по математическому моделированию, которых нет в штате традиционных инжиниринговых или строительных компаний.

Для решения данных проблем нами предлагается структурированная методология оценки поставщиков (SSEF). Настоящая методика создана для того, чтобы сделать выбор поставщика понятным, единообразным и учитывающим риски. Данный механизм применяется при закупках промышленного оборудования, материалов и компонентов для инфраструктурных проектов – в том числе систем водоподготовки, промышленных процессов и технически сложного оборудования. Она основана на общих принципах управления рисками в цепях поставок и не привязана к конкретной национальной системе стандартов. Она может применяться в любой юрисдикции и адаптироваться под требования международных проектов [2].

Следует подчеркнуть, что методика основана на следующих допущениях: имеется достаточная и достоверная информация о поставщиках; оценку проводит специалист необходимой квалификации; веса факторов могут корректироваться под конкретный проект, но базовая структура (главные вопросы / дополнительные факторы) остается неизменной.

Практическое внедрение предложенной методики обеспечивает транснациональным компаниям беспрецедентную гибкость, позволяя нивелировать влияние локальных регуляторных и инфраструктурных шоков. Дальнейшее развитие данного направления требует создания гибридных архитектур, способных гармонично интегрировать универсальность алгоритмов машинного обучения с безусловным соблюдением базовых императивов международного права, что в конечном счете гарантирует высокую резильентность глобальных логистических сетей.

**Заключение.** Проведенное исследование подтвердило, что сбои в цепях поставок критического оборудования являются одним из наиболее значимых факторов риска для инфраструктурных мегапроектов, способным вызывать каскадные смещения критического пути и приводить к существенному превышению сроков и бюджетов. Разработанная имитационная модель позволила количественно оценить вероятностную природу логистических задержек и их влияние на динамику проекта, продемонстрировав высокую эффективность предиктивного подхода по сравнению с традиционными детерминированными методами.

Установлено, что интеграция цифровых двойников, предиктивной аналитики и технологий интернета вещей в систему календарного планирования обеспечивает возможность раннего выявления уязвимостей и формирования превентивных стратегий митигации рисков, включая диверсификацию поставщиков, создание буферных запасов и динамическую оптимизацию графика работ.

Вместе с тем выявлены существенные проблемы, ограничивающие широкое практическое применение данных механизмов: дефицит достоверных эмпирических данных, сложность интеграции разрозненных информационных систем, вычислительная трудоемкость моделей и недостаточный учет поведенческих и макроэкономических факторов.

**Литература:**

1. Борисова В. В. Цифровое администрирование логистических процессов в цепях поставок // Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ). – 2021. – №. 3 (75). – С. 12-17.
2. Валиева М. Формирование адаптивной методики оценки рисков в глобальных цепях поставок без привязки к национальным стандартам // Роль науки и высоких технологий в обеспечении социально-экономического развития государства : сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 13 сентября 2021г. Белгород : ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2021. URL: <https://apni.ru/article/12630-formirovanie-adaptivnoj-metodiki-ocenki-riskov-v-globalnyh-czepyah-postavok-bez-privyazki-k-naczionalnym-standartam>.
3. Некрасов А. Г., Синицына А. С. Цифровая эволюция процессов жизненного цикла цепей поставок // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. – 2021. – №. 4-1. – С. 483-492.
4. Носков А. А. Методы оценки эффективности транспортно-логистических операций в цепях поставок // СПб.: СПбГИЭУ. – 2012.
5. Попов П. В. Организация и развитие логистической инфраструктуры региона в условиях глобализации цепей поставок: монография // Москва: РУСАЙНС. – 2019. – Т. 198.
6. Савостьянов Д. А. Применение системной динамики для анализа социальных и экономических выгод инфраструктурных проектов // Вестник СамГУПС. – 2021. – №. 1. – С. 36-46.
7. Ценина Е. В., Ценина Т. Т. Стратегия смягчения рисков в глобальных цепях поставок // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2014. – №. 5 (89). – С. 69-74.
8. Eriksson P. E., Pesämaa O., Larsson J. Governing technical and organizational complexity through supply chain integration: A dyadic perspective on performance in infrastructure projects // International Journal of Project Management. – 2023. – Т. 41. – <sup>1</sup>. 4. – С. 102479.
9. Kumar S., J. Himes K., P. Kritzer C. Risk assessment and operational approaches to managing risk in global supply chains // Journal of Manufacturing Technology Management. – 2014. – Т. 25. – <sup>1</sup>. 6. – С. 873-890.
10. Naim M. M., Gosling J., Hewlett B. Rethinking infrastructure supply chain management – a manifesto for change // International Journal of Logistics Research and Applications. – 2022. – Т. 25. – <sup>1</sup>. 10. – С. 1359-1380.