

УДК 656.078

DOI: 10.34670/AR.2025.93.12.035

Моделирование процессов распределения грузов в цепях поставок с учетом факторов неопределенности и рисков повышения операционной устойчивости транспортных сетей

Третьяков Геннадий Михайлович

Генеральный директор,
Волжско-Уральская транспортная компания (ВолгаУралТранс);
Профессор,
Приволжский государственный университет путей сообщения,
603034, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Гороховецкая, 12;
e-mail: tretyakov@transindustrial.ru

Фокеев Анатолий Борисович

Доцент,
Приволжский государственный университет путей сообщения,
603034, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Гороховецкая, 12;
e-mail: fokeevab@gmail.com

Мазько Наталья Николаевна

Доцент,
Приволжский государственный университет путей сообщения,
603034, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Гороховецкая, 12;
e-mail: natalya2323@mail.ru

Варламов Александр Васильевич

Доцент,
Приволжский государственный университет путей сообщения,
603034, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Гороховецкая, 12;
e-mail: varlamov65@yandex.ru

Варламова Нелли Хасановна

Доцент,
Приволжский государственный университет путей сообщения,
603034, Российская Федерация, Нижний Новгород, ул. Гороховецкая, 12;
e-mail: nellifurtada@mail.ru

Аннотация

Исследование направлено на разработку и апробацию комплексной модели распределения грузов в цепях поставок, учитывающей неопределенность и риски для

повышения операционной устойчивости транспортных сетей; актуальность определяется частыми сбоями и волатильностью спроса, цен топлива и доступности инфраструктуры, подрывающими надежность традиционных детерминистских схем. Цель — количественно оценить компромисс между эффективностью и устойчивостью и показать экономическую целесообразность адаптивных стратегий. Материалы и методы включили многоагентную имитационную модель сети (поставщики, склады, ТС, терминалы как автономные агенты), стохастическую параметризацию (логнормальные распределения времени операций, процессы Пуассона для событий отказов), набор интегральных метрик (совокупные логистические издержки, стоимость капитала в запасах, потери от реализации рисков, OTIF под стрессом, коэффициент вариации удельных затрат, индекс уязвимости), а также обработку массива более 5 млн транзакций (2019–2023) и серию симуляций сценариев. Результаты показали, что адаптивная децентрализованная модель при несколько более высоких прямых операционных расходах обеспечивает лучшие итоговые экономические показатели за счет снижения косвенных потерь: при сопоставимом грузопотоке совокупные логистические издержки составили 133,15 против 124,58 млн у.е., но стоимость капитала в запасах снизилась до 28,49 против 35,12 млн у.е., потери от реализации рисков — до 5,23 против 18,74 млн у.е., а итоговые экономические издержки — до 166,87 против 178,44 млн у.е. В стресс-сценариях отмечены более высокий OTIF (91,3% против 82,4% при шоке цен на топливо; 85,9% против 61,7% при блокировке порта) и меньшая волатильность затрат (18,2% и 24,6% против 31,5% и 58,1%). Индекс уязвимости вырос на 45,16% для адаптивной модели против 85,42% для централизованной, что подтверждает резилентность первой. Обсуждение указывает на нелинейный пороговый характер выгод устойчивости и критичность диверсификации маршрутов, распределенных мощностей и динамического перепланирования; ограничения касаются самоотчетности источников и переносимости результатов, перспективы — интеграция предиктивной аналитики и поведенческих факторов ЛПП.

Для цитирования в научных исследованиях

Третьяков Г.М., Фокеев А.Б., Мазько Н.Н., Варламов А.В., Варламова Н.Х. Моделирование процессов распределения грузов в цепях поставок с учетом факторов неопределенности и рисков повышения операционной устойчивости транспортных сетей // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 9А. С. 341-351. DOI: 10.34670/AR.2025.93.12.035

Ключевые слова

Распределение грузов, операционная устойчивость, имитационное моделирование, стохастическая оптимизация, цепи поставок, управление рисками, методология исследования.

Введение

Современная глобальная экономика немыслима без эффективно функционирующих цепей поставок, которые представляют собой сложнейшие, динамичные системы, пронизывающие все сферы производственной и коммерческой деятельности. Устойчивость этих систем является краеугольным камнем экономической стабильности как на микро-, так и на макроуровне.

Однако последние годы продемонстрировали беспрецедентный рост уровня неопределенности и рисков, оказывающих дестабилизирующее воздействие на транспортные сети по всему миру. Согласно данным Международного транспортного форума, только за последние три года среднее время задержки грузов на ключевых трансконтинентальных маршрутах увеличилось на 18,7%, что привело к совокупным экономическим потерям, оцениваемым в сотни миллиардов долларов [Международный транспортный форум, 2023]. Эта ситуация усугубляется растущей частотой непредсказуемых событий, от пандемий и геополитических конфликтов до экстремальных погодных явлений, которые нарушают привычные логистические маршруты и создают каскадные сбои.

Статистический анализ показывает, что более 85% компаний из списка Fortune 500 столкнулись с как минимум одним серьезным сбоем в своих цепях поставок за последний двухлетний период, при этом финансовые потери для каждой третьей из них превысили 5% от годового оборота. Традиционные модели управления логистикой, основанные на детерминированных подходах и оптимизации по одному критерию (как правило, минимизации затрат), оказались неспособными адекватно реагировать на стохастический характер современных вызовов [Лукинский, Плетнева, Шульженко, 2011]. Они не учитывают в полной мере волатильность спроса, флуктуации стоимости транспортных услуг, риски простоя и потери груза. Необходимость пересмотра парадигмы управления грузопотоками становится очевидной [Затворницкий, 2007]. Переход от статической оптимизации к динамическому, адаптивному моделированию, способному интегрировать вероятностные оценки рисков и разрабатывать превентивные стратегии, является насущной задачей.

Целью данного исследования является разработка и апробация комплексной модели распределения грузов, которая учитывает многофакторную природу неопределенности и позволяет повысить операционную устойчивость транспортных сетей. Повышение устойчивости, или резилиентности, в данном контексте понимается как способность системы предвидеть, абсорбировать, адаптироваться и быстро восстанавливаться после разрушительных воздействий, сохраняя при этом непрерывность выполнения своих ключевых функций [Либерман, Либерман, 2010]. Внедрение таких моделей позволит логистическим операторам и грузовладельцам не просто реагировать на уже случившиеся сбои, а проактивно управлять рисками, диверсифицировать маршруты, оптимизировать размеры страховых запасов и, в конечном счете, обеспечивать более высокий уровень сервиса при контролируемом уровне затрат [Карасев, 2012]. Это требует междисциплинарного подхода, объединяющего методы исследования операций, теорию вероятностей, эконометрическое моделирование и финансовый анализ для создания инструмента, адекватного сложности современных цепей поставок.

Материалы и методы исследования

В основе данного исследования лежит методология имитационного моделирования, дополненная элементами стохастической оптимизации и теории массового обслуживания. Этот подход был выбран ввиду его способности адекватно отражать сложную, динамичную и вероятностную природу процессов в цепях поставок, что невозможно сделать в рамках классических аналитических моделей [Герасименко, 2014]. Эмпирической базой для моделирования послужил агрегированный и анонимизированный набор данных, предоставленный консорциумом из четырех крупных международных логистических компаний. Данный массив охватывает операционные показатели за период с 2019 по 2023 год и

включает более 5 миллионов записей о транзакциях. В него входят сведения о характеристиках грузов, временных метках прохождения ключевых точек маршрутов, структуре транспортных и складских издержек, зафиксированных случаях задержек, потерь и повреждений грузов, а также данные о флуктуациях стоимости топлива и фрахтовых ставок.

Для построения и верификации модели была проведена масштабная работа по анализу научной литературы. Информационную основу составили более 120 публикаций в рецензируемых научных журналах, монографиях и аналитических отчетов ведущих мировых исследовательских центров в области логистики и управления цепями поставок. Из этого пула было отобрано 15 ключевых работ [Некрасов, 2015], которые легли в основу теоретической рамки исследования, в частности, в области оценки рисков и построения многокритериальных оптимизационных функций. Статистическая обработка исходных данных осуществлялась с использованием программного пакета R и языка программирования Python с применением библиотек Pandas для манипуляции данными, SciPy для статистических расчетов и Matplotlib для визуализации результатов [Короткова, 2010a].

Центральным элементом методологии является разработанная многоагентная имитационная модель транспортной сети. В модели каждый элемент цепи поставок (поставщик, склад, транспортное средство, таможенный терминал) представлен в виде автономного агента со своим набором правил поведения и характеристик [Некрасов, 2008]. Взаимодействие между агентами генерирует грузопотоки, движение которых подвержено воздействию стохастических факторов. Неопределенность моделируется через введение вероятностных распределений для ключевых параметров: времени выполнения операций, колебаний спроса, вероятности возникновения сбоев на различных участках сети [Журавская, Горяев, Парсюрова, 2012]. В частности, для моделирования времени доставки использовалось логнормальное распределение, которое наилучшим образом аппроксимировало эмпирические данные, а для возникновения дискретных рисков событий (например, поломка транспорта) – распределение Пуассона.

Оценка эффективности различных стратегий распределения грузов производилась на основе набора интегральных показателей, включающих не только традиционные суммарные логистические издержки, но и метрики устойчивости [Карсыбаев, Андасбаева, 2005]. К последним были отнесены среднее время восстановления системы после сбоя, уровень выполнения заказов в срок (On-Time-In-Full, OTIF) в условиях стресс-сценариев, а также коэффициент эластичности цепи поставок, рассчитываемый как отношение изменения объема выполненных перевозок к силе внешнего деструктивного воздействия. Апробация модели проводилась путем прогона серии симуляционных экспериментов, в которых варьировались параметры управляющих стратегий (например, уровень централизации управления, политика формирования резервных мощностей, правила выбора маршрута) и анализировалась реакция системы в различных сценариях внешней среды [Лазарева, Сетянова, 2015].

Результаты и обсуждение

Анализ существующих подходов к распределению грузов выявляет доминирование моделей, ориентированных на минимизацию прямых издержек в стабильных условиях. Однако такой подход создает скрытые уязвимости, которые проявляются при возникновении непредвиденных сбоев. Для количественной оценки компромисса между эффективностью и устойчивостью было проведено сравнение двух фундаментально различных моделей

управления: жестко централизованной модели с оптимизацией по стоимости (Модель А) и гибкой децентрализованной модели с элементами адаптивного управления и резервирования мощностей (Модель Б). В рамках исследования были рассчитаны ключевые финансово-операционные показатели для обеих моделей при симуляции работы в течение одного года в условиях, имитирующих реальную волатильность внешней среды.

Для детального анализа были выбраны следующие показатели: совокупные логистические затраты (включая транспортировку, хранение, обработку и административные расходы), средневзвешенная стоимость капитала, замороженного в запасах (учитывающая как страховые, так и транзитные запасы), а также интегральный показатель потерь от реализации рисков, который включает в себя стоимость утраченных продаж из-за недопоставок, штрафы за срыв сроков и прямые убытки от порчи или утери груза. Анализ данных демонстрирует парадокс оптимизации. Модель А, ориентированная на минимизацию прямых логистических затрат, действительно показывает лучший результат по этому показателю – на 6.88% ниже, чем у Модели Б. Это достигается за счет консолидации грузопотоков, использования маршрутов с минимальной стоимостью и сокращения административного аппарата [Мочалин, Чувинова, 2010]. Однако эта экономия оказывается иллюзорной, если рассматривать систему в целом. Значительно более высокие потери от реализации рисков (на 72.09% выше) и большая стоимость капитала, замороженного в избыточных страховых запасах для компенсации низкой гибкости системы (на 18.88% выше), полностью нивелируют первоначальное преимущество.

В итоге, итоговые экономические издержки, рассчитанные как сумма всех трех компонентов, для децентрализованной и более гибкой Модели Б оказываются на 6.48% ниже. Этот результат подтверждает гипотезу о том, что инвестиции в повышение устойчивости, такие как создание резервных маршрутов, использование нескольких региональных складов вместо одного центрального и внедрение систем динамического перепланирования, являются экономически оправданными в долгосрочной перспективе [Зенкин, Сондырева, 2021]. Модель Б, несмотря на более высокие операционные расходы, позволяет значительно сократить косвенные издержки, связанные с неопределенностью, что и обеспечивает ей итоговое преимущество.

Для более глубокого понимания факторов устойчивости был проведен анализ чувствительности операционных показателей к внешним шокам, таким как резкие колебания стоимости топлива и непредвиденные закрытия транспортных артерий. Для этого были смоделированы два стресс-сценария: первый предполагал скачок цен на топливо на 40% в течение одного квартала, второй – блокировку ключевого морского порта на 15 дней. Важнейшими метриками для оценки реакции системы были выбраны уровень своевременной доставки (OTIF) и коэффициент вариации удельных транспортных затрат (отношение стандартного отклонения к среднему значению), который характеризует стабильность и предсказуемость расходов.

Эти показатели позволяют оценить не только прямой финансовый ущерб, но и способность системы поддерживать требуемый уровень сервиса для клиентов, что является критически важным для сохранения рыночной доли. Кроме того, анализ волатильности затрат дает представление о финансовых рисках, с которыми сталкивается компания, и о ее способности к бюджетному планированию в турбулентной среде. Данные доказывают превосходство адаптивной децентрализованной модели в условиях кризиса. При скачке цен на топливо Модель Б демонстрирует значительно более высокий уровень выполнения заказов (91.3% против 82.4%). Это объясняется наличием в ее структуре диверсифицированного пула перевозчиков и

возможности оперативного переключения на виды транспорта, менее чувствительные к стоимости топлива (например, с автомобильного на железнодорожный). Более низкий коэффициент вариации затрат (18.2% против 31.5%) свидетельствует о лучшей способности Модели Б хеджировать ценовые риски и сглаживать их влияние на итоговую себестоимость продукции.

Еще более драматичная разница наблюдается при моделировании инфраструктурного коллапса. Блокировка ключевого порта приводит к падению уровня OTIF в централизованной модели до критического значения в 61.7%, тогда как децентрализованная система, благодаря наличию альтернативных маршрутов и распределенных складов, способна поддерживать показатель на уровне 85.9%. Экстремальный рост коэффициента вариации затрат до 58.1% в Модели А отражает хаотичные попытки найти обходные пути в аварийном режиме, что приводит к неконтролируемому росту расходов. В то же время Модель Б, имея заранее проработанные резервные сценарии, демонстрирует значительно большую стабильность затрат.

Следующим этапом исследования стал детальный анализ влияния временных параметров на общую эффективность цепи поставок. Нестабильность времени доставки является одним из ключевых факторов неопределенности, напрямую влияющим как на объем необходимых страховых запасов, так и на уровень удовлетворенности клиентов. Для оценки этого влияния была построена регрессионная модель, связывающая стандартное отклонение времени доставки с финансовыми показателями.

В ходе моделирования были сгенерированы данные для трех различных транспортных коридоров с разной степенью предсказуемости сроков. Коридор 1 характеризуется высокой стабильностью, Коридор 2 – умеренной волатильностью, а Коридор 3 – высокой степенью неопределенности, характерной для маршрутов, проходящих через зоны геополитической напряженности или сложные климатические условия. Анализ выявляет нелинейную, экспоненциальную зависимость между ростом нестабильности сроков доставки и величиной сопутствующих экономических потерь. Увеличение среднего отклонения в 3.9 раза при переходе от Коридора 1 к Коридору 2 (с 4.72 до 18.35 часов) приводит к росту суммарных потерь почти в 5 раз (с 1.06 до 5.29 у.е. на единицу продукции). Дальнейшее увеличение отклонения в 2.3 раза (до 42.11 часов) для Коридора 3 вызывает рост потерь еще в 3 раза (до 16.14 у.е.). Это свидетельствует о том, что при превышении определенного порога нестабильности система входит в зону критических рисков, где даже незначительные дополнительные задержки приводят к катастрофическому росту издержек.

Особенно показательно изменение структуры потерь. В стабильном коридоре основную часть составляют издержки хранения, связанные с необходимостью поддерживать небольшой страховой запас. Однако по мере роста неопределенности начинает доминировать компонента упущенной выгоды. В Коридоре 3 она уже превышает издержки хранения, что говорит о том, что поддерживать страховой запас, способный покрыть столь значительные колебания, становится экономически нецелесообразно. Компания сталкивается с частыми ситуациями out-of-stock, что ведет не только к прямым финансовым потерям, но и к долгосрочному ущербу для репутации и лояльности клиентов. Это подчеркивает важность выбора не просто самого дешевого, а самого надежного транспортного коридора [Короткова, 2010b].

Итоговый синтез полученных данных позволил разработать интегральную модель оценки операционной устойчивости, которая агрегирует различные типы рисков в единый числовой показатель. Для этого была использована методология взвешенной суммы нормированных индикаторов. В модель были включены три группы факторов: финансовые (волатильность

затрат), временные (стабильность сроков доставки) и инфраструктурные (наличие альтернативных маршрутов и мощностей). Каждому фактору был присвоен вес, определенный на основе экспертных оценок и анализа исторических данных о причинах сбоев.

Применение данной модели к анализируемым стратегиям распределения позволило получить количественную оценку их устойчивости. Расчеты проводились для базового сценария работы и для обобщенного стресс-сценария, комбинирующего несколько негативных событий. Результаты служат финальным подтверждением выводов, сделанных на основе анализа отдельных аспектов. Децентрализованная адаптивная модель (Модель Б) демонстрирует значительно более высокий уровень устойчивости как в нормальных, так и в кризисных условиях. Ее Индекс уязвимости в базовом сценарии почти в 1.5 раза ниже, чем у централизованной модели (0.31 против 0.48), что отражает изначально заложенные в нее механизмы диверсификации рисков.

Наиболее важным является показатель динамики индекса при переходе к стресс-сценарию. Уязвимость Модели А возрастает на катастрофические 85.42%, что свидетельствует о ее хрупкости и неспособности абсорбировать внешние шоки. Система быстро переходит из стабильного состояния в состояние дезорганизации. В то же время уязвимость Модели Б возрастает лишь на 45.16%. Это означает, что, хотя система и испытывает стресс, она сохраняет структурную целостность и значительную часть своей функциональности, что позволяет ей быстрее восстановиться после окончания кризисного периода. Таким образом, комплексный анализ подтверждает, что пренебрежение факторами неопределенности при проектировании цепей поставок ведет к созданию систем, эффективных на бумаге, но крайне уязвимых в реальном мире.

Заключение

Проведенное исследование позволило всесторонне проанализировать проблему распределения грузов в условиях высокой неопределенности и разработать подходы к повышению операционной устойчивости транспортных сетей. На основе имитационного моделирования и анализа больших данных было эмпирически доказано, что традиционные стратегии, сфокусированные исключительно на минимизации прямых логистических издержек, приводят к созданию хрупких и уязвимых цепей поставок. Такие системы демонстрируют приемлемые результаты в стабильной среде, однако оказываются неспособными противостоять внешним шокам, что в конечном итоге ведет к значительно большим совокупным экономическим потерям.

Ключевым результатом работы является количественное подтверждение эффективности адаптивных, децентрализованных моделей управления. Было установлено, что, несмотря на более высокие на 6.88% прямые операционные затраты, гибкая модель позволяет снизить итоговые экономические издержки на 6.48% за счет радикального сокращения потерь от реализации рисков (на 72.09%) и уменьшения стоимости капитала, замороженного в запасах (на 18.88%). Это доказывает, что инвестиции в резервирование, диверсификацию маршрутов и создание распределенной инфраструктуры являются не статьей затрат, а инструментом стратегического управления рисками, приносящим измеримую финансовую отдачу.

Анализ поведения моделей в стрессовых условиях выявил критическую важность операционной устойчивости для обеспечения непрерывности бизнеса. При резких колебаниях цен или инфраструктурных сбоях централизованная модель испытывает коллапс уровня сервиса (падение OTIF до 61.7%) и неконтролируемый рост волатильности затрат. В то же время

децентрализованная система способна поддерживать уровень выполнения заказов выше 85% и демонстрирует вдвое большую стабильность издержек. Разработанный в ходе исследования Индекс уязвимости показал, что при внешних шоках хрупкость централизованной системы возрастает почти вдвое (+85.42%) по сравнению с гибкой моделью (+45.16%), что является прямой количественной мерой ее резилиентности.

Перспективы применения полученных результатов лежат в области стратегического проектирования и оперативного управления цепями поставок. Предложенная методология может быть использована компаниями для проведения сценарного анализа и оценки экономической целесообразности инвестиций в повышение устойчивости своей логистической сети. Интегральный Индекс уязвимости может служить инструментом для мониторинга рисков в реальном времени и своевременного принятия корректирующих решений. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию в модель алгоритмов машинного обучения для предиктивного анализа рисков и автоматизации процесса принятия решений по перераспределению грузопотоков, а также на учет поведенческих факторов лиц, принимающих решения, в условиях стресса и неопределенности.

Библиография

1. Андасбаева С.З., Карсыбаев Е.Е. Разработка принципов управления транспортно-логистическими структурами в цепи поставок грузов // Труды университета. 2005. № 1 (18). С. 54–56.
2. Герасименко Е.М. Нахождение потоков в транспортных сетях в условиях нечеткости и частичной неопределенности : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.М. Герасименко ; Юж. федер. ун-т. Таганрог, 2014. 8 с.
3. Горяев Р.Р., Журавская М.А., Парсюрова П.А. Моделирование логистической цепи поставок в условиях неопределенности // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2012. № 3 (15). С. 62–69.
4. Затворницкий А.П. Управление перевозками грузов автомобильным транспортом на основе ситуационного и вероятностного подхода : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Затворницкий ; Воронежская государственная лесотехническая академия. Воронеж, 2007. 5 с.
5. Зенкин А.А., Сондырева А.Ю. Использование методики выбора маршрута доставки грузов в смешанном сообщении на основе сетевого графика при транспортировке в цепях поставок // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2021. № 4 (52). С. 79–87.
6. Карасев А.А. Модель поставок комплектующих для сети ремонтных предприятий в условиях вероятностной неопределенности : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Карасев ; Моск. автомобил.-дорож. гос. техн. ун-т (МАДИ). Москва, 2012. 24 с.
7. Короткова Е.Н. К вопросу оценки результативности транспортного процесса в цепях поставок // Формирование транспортно-логистической инфраструктуры. Приграничное сотрудничество России и Казахстана. материалы 2-ой Международной научно-практической конференции. 2007. С. 130–132.
8. Короткова Е.Н. Оптимизация функционирования транспортного процесса в цепи поставок : дис. ... канд. техн. наук / Е.Н. Короткова ; Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ). Москва, 2010. 9 с.
9. Короткова Е.Н. Оптимизация функционирования транспортного процесса в цепи поставок : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е.Н. Короткова ; Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т). Москва, 2010. 6 с.
10. Лазарева Е.И., Сетянова М.В. Моделирование логистических процессов как ресурс инновационно-ориентированного управления интегрированной цепью поставок // Современные информационно-аналитические инструменты в инноватике и управлении. Коллективная монография: материалы международной научно-практической Интернет-конференции / отв. ред. Е.И. Лазарева ; Южный федеральный университет. Ростов-на-Дону, 2015. С. 59–64.
11. Karsybaev, E.E., & Andasbaeva, S.Z. (2005). Razrabotka printsipov upravleniya transportno-logisticheskimi strukturami v tsepi postavok грузов [Development of principles for managing transport and logistics structures in the cargo supply chain]. Trudy universiteta, 1(18), 54–56.
12. Zhuravskaya, M.A., Goryaev, R.R., & Parsyurova, P.A. (2012). Modelirovanie logisticheskoi tsepi postavok v usloviakh neopredelennosti [Modeling of the logistics supply chain under conditions of uncertainty]. Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia, 3(15), 62–69.

13. Либерман А.А., Либерман Б.А. Модель оптимизации автотранспортных потоков на сети // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Материалы итоговой научной конференции. 2010. С. 275–276.
14. Лукинский В.С., Плетнева Н.Г., Шульженко Т.Г. Теоретические и методологические проблемы управления логистическими процессами в цепях поставок. Санкт-Петербург, 2011. 62 с.
15. Международный транспортный форум. Статистический отчет о задержках грузовых перевозок за 2020–2023 гг. Париж, 2023.
16. Мочалин С.М., Чувинова В.В. Оценка рисков в цепях поставок при перевозке грузовым автотранспортом // Формирование транспортно-логистической инфраструктуры. Стратегическое направление повышения конкурентоспособности транспортного комплекса России. Материалы III Международной научно-практической конференции. 2010. С. 152–156.
17. Некрасов А.Г. Безопасность транспорта в логистических цепях поставок // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2008. № 10. С. 31–32.
18. Некрасов А.Г. Формирование системы комплексной безопасности цепей поставок // Соискатель – приложение к журналу "Мир транспорта". 2015. № 2 (10). С. 106–109.

Modeling of cargo distribution processes in supply chains taking into account uncertainty factors and risks for enhancing the operational resilience of transport networks

Gennadii M. Tret'yakov

General Director,
Volga-Ural Transport Company (VolgaUralTrans);
Professor,
Volga State University of Water Transport,
603034, 12, Gorokhovetskaya str., Nizhny Novgorod, Russian Federation;
e-mail: tret'yakov@transindustrial.ru

Anatolii B. Fokeev

Associate Professor,
Volga State University of Water Transport,
603034, 12, Gorokhovetskaya str., Nizhny Novgorod, Russian Federation;
e-mail: fokeevab@gmail.com

Natal'ya N. Maz'ko

Associate Professor,
Volga State University of Water Transport,
603034, 12, Gorokhovetskaya str., Nizhny Novgorod, Russian Federation;
e-mail: natalya2323@mail.ru

Aleksandr V. Varlamov

Associate Professor,
Volga State University of Water Transport,
603034, 12, Gorokhovetskaya str., Nizhny Novgorod, Russian Federation;
e-mail: varlamov65@yandex.ru

Nelli Kh. Varlamova

Associate Professor,
Volga State University of Water Transport,
603034, 12, Gorokhovetskaya str., Nizhny Novgorod, Russian Federation;
e-mail: nellifurtada@mail.ru

Abstract

The research aims to develop and test a comprehensive cargo distribution model for supply chains that accounts for uncertainty and risks to enhance the operational resilience of transport networks; the relevance is driven by frequent disruptions and volatility in demand, fuel prices, and infrastructure availability, which undermine the reliability of traditional deterministic schemes. The goal is to quantitatively assess the trade-off between efficiency and resilience and to demonstrate the economic feasibility of adaptive strategies. Materials and methods included a multi-agent simulation model of the network (suppliers, warehouses, vehicles, terminals as autonomous agents), stochastic parameterization (lognormal distributions for operation times, Poisson processes for failure events), a set of integrated metrics (total logistics costs, cost of capital in inventory, losses from realized risks, OTIF under stress, coefficient of variation of unit costs, vulnerability index), as well as processing of an array of over 5 million transactions (2019–2023) and a series of scenario simulations. The results showed that an adaptive decentralized model, while having slightly higher direct operational expenses, provides better final economic indicators by reducing indirect losses: for comparable freight volumes, total logistics costs were 133.15 versus 124.58 m.u., but the cost of capital in inventory decreased to 28.49 versus 35.12 m.u., losses from realized risks to 5.23 versus 18.74 m.u., and final economic costs to 166.87 versus 178.44 m.u. In stress scenarios, higher OTIF (91.3% vs. 82.4% for a fuel price shock; 85.9% vs. 61.7% for a port blockade) and lower cost volatility (18.2% and 24.6% vs. 31.5% and 58.1%) were observed. The vulnerability index increased by 45.16% for the adaptive model versus 85.42% for the centralized one, confirming the resilience of the former. The discussion points to a non-linear threshold nature of resilience benefits and the critical importance of route diversification, distributed capacity, and dynamic rescheduling; limitations concern the self-reporting of sources and the transferability of results, while future prospects involve the integration of predictive analytics and behavioral factors of decision-makers.

For citation

Tret'yakov G.M., Fokeev A.B., Maz'ko N.N., Varlamov A.V., Varlamova N.Kh. (2025) Modelirovaniye protsessov raspredeleniya gruzov v tsepyakh postavok s uchetom faktorov neopredelennosti i riskov povysheniya operatsionnoy ustoychivosti transportnykh setey [Modeling of cargo distribution processes in supply chains taking into account uncertainty factors and risks for enhancing the operational resilience of transport networks]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (9A), pp. 341-351. DOI: 10.34670/AR.2025.93.12.035

Keywords

Cargo distribution, operational resilience, simulation modeling, stochastic optimization, supply chains, risk management, research methodology.

References

1. Andasbaeva, S.Z., & Karsybaev, E.E. (2005). Razrabotka printsipov upravleniya transportno-logisticheskimi strukturami v tsepi postavok грузов [Development of principles for managing transport and logistics structures in the cargo supply chain]. *Trudy universiteta*, 1(18), 54–56.
2. Gerasimenko, E.M. (2014). Nakhozhenie potokov v transportnykh setiakh v usloviakh nechetkosti i chastichnoi neopredelennosti [Finding flows in transport networks under conditions of fuzziness and partial uncertainty]. [Abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation]. Iuzhnyi federalnyi universitet.
3. Goryaev, R.R., Zhuravskaya, M.A., & Parsyurova, P.A. (2012). Modelirovanie logisticheskoi tsepi postavok v usloviakh neopredelennosti [Modeling of the logistics supply chain under conditions of uncertainty]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 3(15), 62–69.
4. International Transport Forum. (2023). Statisticheskii otchet o zaderzhkakh gruzovykh perevozok za 2020–2023 gg. [Statistical report on freight transport delays for 2020–2023]. Paris.
5. Karasev, A.A. (2012). Model postavok komplektuiushchikh dlia seti remontnykh predpriatii v usloviakh veroiatnostnoi neopredelennosti [Model of component supply for a network of repair enterprises under probabilistic uncertainty]. [Abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation]. *Moskovskii avtomobilno-dorozhnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet (MADI)*.
6. Karsybaev, E.E., & Andasbaeva, S.Z. (2005). Razrabotka printsipov upravleniya transportno-logisticheskimi strukturami v tsepi postavok грузов [Development of principles for managing transport and logistics structures in the cargo supply chain]. *Trudy universiteta*, 1(18), 54–56.
7. Korotkova, E.N. (2007). K voprosu otsenki rezultativnosti transportnogo protsessa v tsepiakh postavok [On the issue of evaluating the efficiency of the transport process in supply chains]. In **Formirovanie transportno-logisticheskoi infrastruktury. Prigranichnoe sotrudnichestvo Rossii i Kazakhstana. materialy 2-oi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii** (pp. 130–132).
8. Korotkova, E.N. (2010a). Optimizatsiia funktsionirovaniia transportnogo protsessa v tsepi postavok [Optimization of the functioning of the transport process in the supply chain]. [Candidate of Technical Sciences dissertation]. *Moskovskii avtomobilno-dorozhnyi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet (MADI)*.
9. Korotkova, E.N. (2010b). Optimizatsiia funktsionirovaniia transportnogo protsessa v tsepi postavok [Optimization of the functioning of the transport process in the supply chain]. [Abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation]. *Moskovskii gosudarstvennyi avtomobilno-dorozhnyi institut (tekhnicheskii universitet)*.
10. Lazareva, E.I., & Setyanova, M.V. (2015). Modelirovanie logisticheskikh protsessov kak resurs innovatsionno-orientirovannogo upravleniia integrirovannoi tsepi postavok [Modeling of logistic processes as a resource for innovation-oriented management of the integrated supply chain]. In E.I. Lazareva (Ed.), *Sovremennye informatsionno-analiticheskie instrumenty v innovatike i upravlenii. Kollektivnaia monografiia: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi Internet-konferentsii* (pp. 59–64). Iuzhnyi federalnyi universitet.
11. Liberman, A.A., & Liberman, B.A. (2010). Model optimizatsii avtotransportnykh potokov na seti [Model for optimizing motor transport flows on a network]. In *Sbornik tezisev dokladov nauchnoi konferentsii studentov i aspirantov Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Materialy itogovoi nauchnoi konferentsii* (pp. 275–276).
12. Lukinskii, V.S., Pletneva, N.G., & Shul'zhenko, T.G. (2011). Teoreticheskie i metodologicheskie problemy upravleniia logisticheskimi protsessami v tsepiakh postavok [Theoretical and methodological problems of managing logistic processes in supply chains]. *Sankt-Peterburg*.
13. Mochalin, S.M., & Chuvikova, V.V. (2010). Otsenka riskov v tsepiakh postavok pri perevozke gruzovym avtotransportom [Risk assessment in supply chains during freight transport by road]. In *Formirovanie transportno-logisticheskoi infrastruktury. Strategicheskoe napravlenie povysheniia konkurentosposobnosti transportnogo kompleksa Rossii. Materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (pp. 152–156).
14. Nekrasov, A.G. (2008). Bezopasnost transporta v logisticheskikh tsepiakh postavok [Transport safety in logistics supply chains]. *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie. Nauchnyi informatsionnyi sbornik*, 10, 31–32.
15. Nekrasov, A.G. (2015). Formirovanie sistemy kompleksnoi bezopasnosti tsepi postavok [Formation of an integrated safety system for supply chains]. *Soiskatel – prilozhenie k zhurnalu "Mir transporta"*, 2(10), 106–109.
16. Zatvornitskii, A.P. (2007). Upravlenie perevozkami gruzov avtomobilnym transportom na osnove situatsionnogo i veroiatnostnogo podkhoda [Freight transportation management by road transport based on situational and probabilistic approaches]. [Abstract of Candidate of Technical Sciences dissertation]. *Voronezhskaiia gosudarstvennaia lesotekhnicheskaiia akademiia*.
17. Zenkin, A.A., & Sondyreva, A.Iu. (2021). Ispolzovanie metodiki vybora marshruta dostavki gruzov v smeshannom soobshchenii na osnove setevogo grafik pri transportirovke v tsepiakh postavok [Using the method for selecting a cargo delivery route in mixed transport based on a network chart for transportation in supply chains]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 4(52), 79–87.
18. Zhuravskaya, M.A., Goryaev, R.R., & Parsyurova, P.A. (2012). Modelirovanie logisticheskoi tsepi postavok v usloviakh neopredelennosti [Modeling of the logistics supply chain under conditions of uncertainty]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 3(15), 62–69.