



## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТАВОК В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ И ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Михайлова С. А. ORCID ID 0009-0004-5884-6559,

Горшков К. А. ORCID ID 0000-0003-4872-2195

*Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования  
«Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации», Москва,  
Российская Федерация, e-mail: sofya.mixajlova.12@mail.ru*

В статье рассматривается проблема устойчивости функционирования многозвенной цепи поставок в условиях ограниченной информации и децентрализованного принятия управленческих решений. Объектом исследования является логистическая цепь, состоящая из производителя, дистрибьютора, оптового продавца и розничного магазина, в которой каждый участник принимает решения автономно, опираясь исключительно на локальную информацию о текущих запасах, поступающих заказах и величине дефицита. Целью работы является анализ динамики функционирования многозвенной цепи поставок в условиях ограниченной информации и децентрализованного принятия управленческих решений, а также выявление системных эффектов, влияющих на её устойчивость. В качестве методов исследования использованы натурный игровой эксперимент, являющийся аналогом классической «игры с пивом», а также имитационное моделирование на основе системной динамики по Дж. Форрестеру. Построена модель цепи поставок в среде AnyLogic, формализующая процессы управления запасами, размещения заказов, поставок и формирования дефицита с учетом логистических задержек. Результаты моделирования и игрового эксперимента показали, что даже незначительные изменения спроса конечного потребителя приводят к усилению колебаний объемов заказов и запасов на последующих уровнях цепи. Данное явление интерпретируется как проявление эффекта хлыста, снижающего устойчивость и эффективность функционирования децентрализованной цепи поставок.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, цепь поставок, эффект хлыста, децентрализация, запасы, дефицит, логистика

## SIMULATION MODELING OF THE SUPPLY CHAIN UNDER CONDITIONS OF INFORMATIVE DEFICIENCY AND DECENTRALIZED DECISION-MAKING

Mikhailova S. A. ORCID ID 0009-0004-5884-6559,

Gorshkov K. A. ORCID ID 0000-0003-4872-2195

*Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education  
“Financial University under the Government of the Russian Federation”,  
Moscow, Russian Federation, e-mail: sofya.mixajlova.12@mail.ru*

The article deals with problems arising in conjunction with the functional sustainability of multiple-links' supply chain under conditions of informative deficiency and decentralized administrative decision making. The object of the study is one logistic chain, formed out of the manufacturer, distributor, wholesaler and a retailer, each of which decides autonomously, according only to the local, particular information relating to the state of current stocks, incoming orders and the deficiency parameters. The aim of this article is to analyze the dynamics of the multi-link supply chain's functioning as well as clarification of those system effects, that arise due to the lack of coordination and information exchange. The research methods used were a full-scale game experiment analogical to the proverbial “beer distribution game” and simulation of the J. Forrester's system dynamics. Also, one supply chain was modelled within AnyLogic conditions, which formalized the processes of residue and deficiency management, placement of new orders and renewing supplies taking in consideration the logistic delays. The results of those research methods proved that even smallest changes of consumers' behavior cause an increased fluctuation of order volumes and subsequently of residue in the further chains' links. This fact may be interpreted as a manifestation of the bullwhip effect, reducing the sustainability and efficiency of one functioning deliverance chain.

**Keywords:** simulation modeling, deliverance chain, bullwhip effect, decentralization, stocks, deficiency, logistics

### Введение

Современные производственно-сбытовые системы представляют собой многоуровневые логистические цепочки поставок, где каждый участник (производитель, дистрибьютор, оптовик, розничный продавец) должен принимать решения на основе локальной информации и в режиме меня-

ющихся данных. Из-за сложности организационной структуры часто приходится прибегать к распределенному (децентрализованному) управлению [1]. При таком управлении и недостаточной видимости данных возникают характерные системные эффекты, прежде всего эффект хлыста (bullwhip) [2], связанный с нарастанием ко-

лебаний заказа и запасов по мере продвижения вверх по цепи. Этот эффект обусловлен тем, что звенья цепи пытаются предугадать спрос, оптимизируя собственные издержки, но при этом не учитывают состояние всей цепочки поставок. В ряде источников [1; 3] показано, что даже при незначительных изменениях конечного спроса амплитуда заказов у производителя может значительно увеличиваться.

Поиск методов, позволяющих безопасно проверять различные сценарии и стратегии без реальных затрат, выявляя потенциальные проблемы и эффективные решения, является важной задачей современной логистики и подтверждает актуальность исследования. Для прогнозирования и предотвращения негативных системных эффектов применяются методы априорного моделирования [4], включая предиктивные модели на основе нейронных сетей [5]. В частности, имитационное моделирование цепей поставок позволяет учитывать задержки доставки, вариативность спроса, логистические ограничения и стратегию управления запасами [3]. В отличие от упрощённых аналитических подходов, динамические модели отражают поведение системы во времени и показывают влияние управленческих политик на всю цепь [6]. Например, системная динамика Форрестера описывает систему через запасы и потоки, позволяя выявлять условия неустойчивости [7], а «игра с пивом» (beer distribution game) демонстрирует последствия отсутствия обмена информацией, когда задержки усиливают эффект хлыста [2].

**Целью исследования** является анализ динамики функционирования многозвенной цепи поставок в условиях ограниченной информации и децентрализованного принятия управленческих решений, а также выявление системных эффектов, влияющих на её устойчивость.

#### **Материалы и методы исследования**

Исследование выполнено в формате натурального игрового эксперимента с участием 4 человек, выполнявших роли звеньев цепи поставок: производитель (завод), дистрибьютор, оптовый продавец и розничный магазин. Эксперимент построен как аналог классической «beer distribution game» и реализован с дискретным по времени шагом в 1 неделю при отсутствии обмена информацией между участниками. Каждое звено принимает решения автономно, располагая исключительно локальной информацией о собственных запасах, поступающих заказах и величине накопленного дефицита [8].

Начальные условия были одинаковыми для всех звеньев: начальные запасы на складах равнялись 12 единицам, ранее размещённые заказы составляли 4 единицы. Задержка между размещением заказа и поступлением поставки к следующему участнику составляла 2 недели, что моделировало логистическую задержку в цепи.

Для проверки результатов, полученных в ходе проведения натурального эксперимента, дополнительно применялось имитационное моделирование на основе системной динамики Дж. Форрестера в среде AnyLogic с использованием тех же параметров (шаг – 1 неделя, задержка – 2 недели, одинаковые стартовые запасы и правила формирования поставок при дефиците). Анализ проводился по показателям динамики заказов, запасов, дефицита и денежных затрат (денежно-го потока) участников цепи.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Организация информационных и товарных потоков в исследуемой четырёхзвенной цепи поставок представлена на рисунке 1. На схеме показано направление движения материальных потоков продукции от производителя к розничному магазину, а также встречное движение информационных потоков заказов от потребителя к вышестоящим звеньям цепи. Отсутствие горизонтальных информационных связей между участниками отражает децентрализованный характер управления и информационные ограничения, заложенные в условиях эксперимента [9].

В ходе натурального эксперимента участники последовательно выполняли действия на каждом «недельном» шаге: учитывали приход товара (с учётом логистической задержки), определяли доступный запас, удовлетворяли входящий заказ в пределах доступного количества, фиксировали дефицит при превышении спроса над запасом, а затем формировали новый заказ поставщику. Пошаговый алгоритм, использованный всеми участниками для обеспечения единообразия правил принятия решений, приведён в таблице.

Для интерпретации полученных в натурном эксперименте эффектов и формализации динамики цепи поставок была реализована имитационная модель на основе системной динамики Дж. Форрестера [10]. Применение данного подхода позволило описать нелинейные взаимодействия между запасами, потоками заказов и поставок, а также учесть временные задержки как ключевой источник неустойчивости многозвенных логистических систем [11].

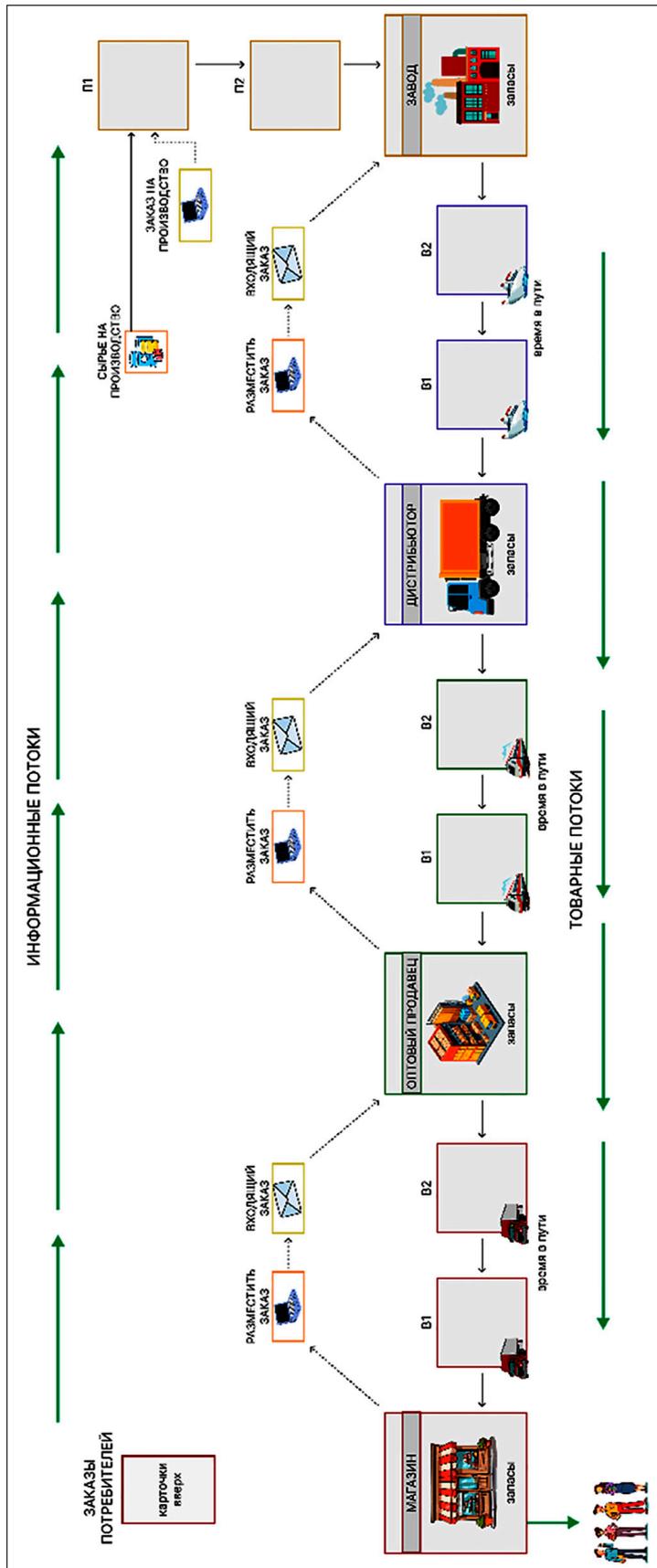


Рис. 1. Структура протекания информационных потоков в четырехзвенной цепи поставок  
 Источник: составлено авторами

Алгоритм принятия решений о поставках и заказах участником цепи поставок в дискретном временном шаге

	Входящие товары	Доступно на складе	Заказ потребителя	Надо отгрузить	Ваша поставка	Дефицит	Запасы	Ваш заказ	Заграты
Неделя	(Первое движение каждого хода) <b>1 шаг</b>	(После первого движения) <b>2 шаг</b>	(Входящий заказ потребителей или предыдущего звена) <b>3 шаг</b>	(Нужно учесть дефицит прошлых ходов) <b>4 шаг</b>	(Дефицит и заказ должны быть удовлетворены если есть возможность) <b>5 шаг</b>	(То, что не смогли отгрузить в этот ход, без знака «->») <b>6 шаг</b>	(Запас до размещения заказа) <b>7 шаг</b>	(Ваше решение) <b>8 шаг</b>	<b>9 шаг</b>
	1	1+7 (с предыдущей недели)	3+6			5-4 Если 5-4, то «0»	2-5		7 шаг*1 + 6 шаг*2

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

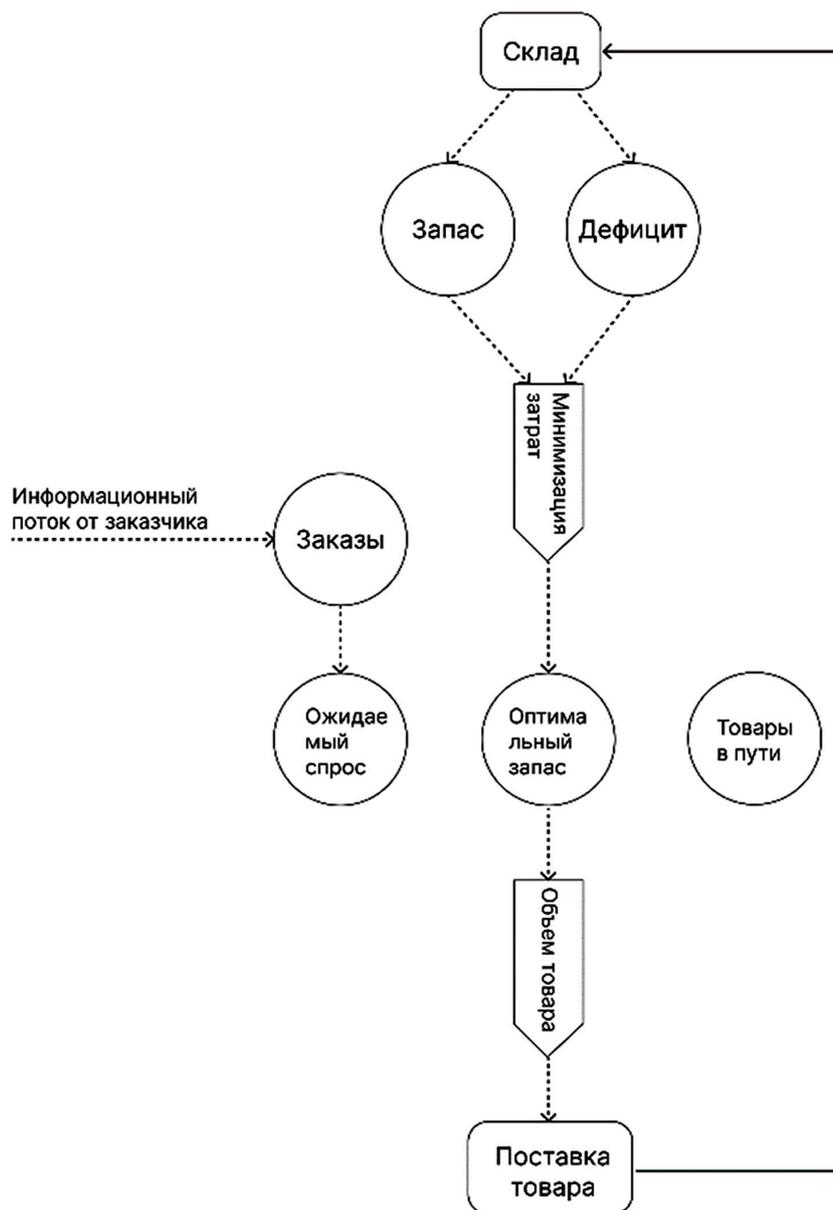


Рис. 2. Структурная модель принятия решения о размере заказа одного из участников цепи  
 Источник: составлено авторами

Результаты построения структурной модели принятия решений о размере заказа для каждого участника представлены на рисунке 2. Концептуальная схема показывает, что решение о заказе формируется через сопоставление ожидаемого спроса, текущего уровня запасов, накопленного дефицита и товаров, находящихся в пути [12]. В условиях отсутствия глобальной информации о состоянии цепи каждое звено стремится локально минимизировать риск дефицита, что приводит к завышению заказов и усиливает колебания потоков [13].

Для количественного анализа динамики цепи поставок была разработана

модель системной динамики Форрестера, реализованная в среде AnyLogic. Структура модели представлена на рисунке 3 и включает запасы (накопители), потоки заказов и поставок, а также контуры обратных связей, формирующие поведение системы во времени [14].

В модели выделены экзогенные и эндогенные переменные [15]. К экзогенным параметрам относятся спрос конечного потребителя, исходные уровни запасов, а также временные задержки размещения и получения заказов. Эндогенные переменные описывают динамику запасов, поставок и дефицита для каждого звена цепи.



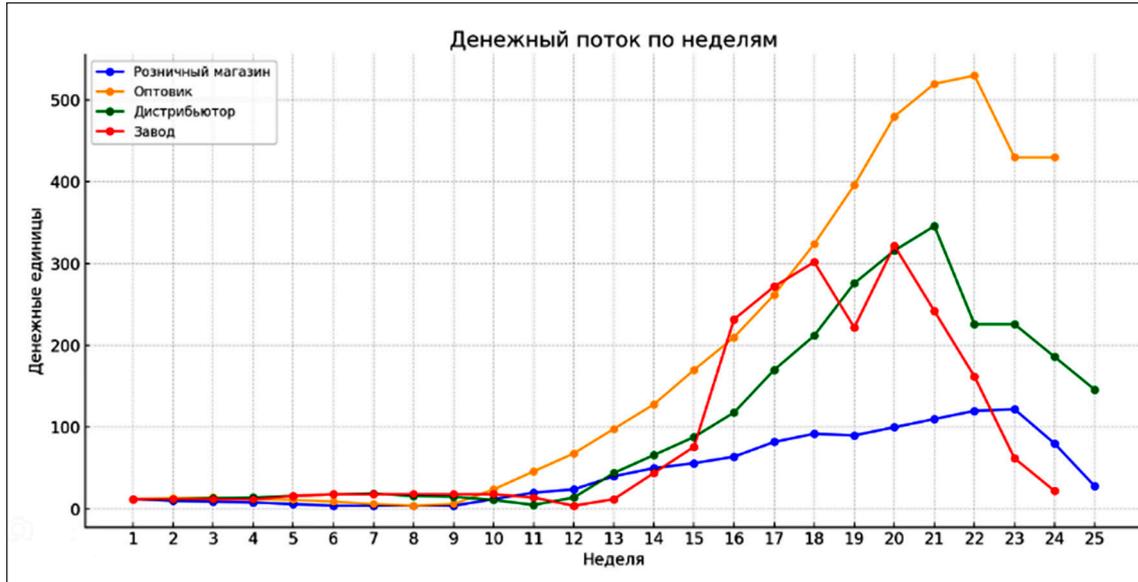


Рис. 4. Денежный поток по неделям для участников цепи поставок  
Источник: составлено авторами

В обобщённом виде динамика запасов любого звена может быть представлена следующим выражением:

$$I(t) = I(t-1) - S(t-1) + O(t-\tau),$$

где  $I(t)$  – уровень запасов в момент времени  $t$ ,  
 $S(t-1)$  – фактическая поставка в предыдущем периоде,

$O(t-\tau)$  – заказ, поступивший с учетом логистической задержки  $\tau$ .

Формирование дефицита описывается логическим условием ограничения поставок текущими запасами, что отражает физическую невозможность удовлетворения заказов сверх доступного объёма продукции [16]. Такая постановка задачи позволяет адекватно моделировать реальные ограничения логистических систем.

Результаты имитационного моделирования демонстрируют неустойчивость цепи поставок в условиях децентрализованного принятия решений и отсутствия информационного обмена. Даже при относительно стабильном спросе конечного потребителя наблюдается усиление колебаний заказов и запасов по мере продвижения вверх по цепи – от магазина к заводу [17].

Динамика денежных потоков по результатам натурального игрового эксперимента представлена на рисунке 4. В начале эксперимента денежные потоки всех участников сопоставимы и остаются на относительно низком уровне. По мере накопления логистических задержек наблюдаются рост и дифференциация потоков между звеньями цепи: наиболее заметное увеличение фикси-

руется у оптового продавца и дистрибьютора, что связано с запаздывающей реакцией на рост заказов нижестоящих участников. Денежный поток производителя более волатилен, с выраженными пиками и последующим спадом, отражая влияние нестабильных заказов и накопленного дефицита.

Полученные результаты согласуются с классическим описанием эффекта хлыста (bullwhip effect), согласно которому незначительные изменения спроса на розничном уровне трансформируются в значительные колебания заказов и запасов на уровне производителя [18]. В рамках проведённого исследования данный эффект усиливается за счёт фиксированных временных задержек, а также стремления каждого участника компенсировать прошлые дефициты за счёт увеличенных заказов.

Интерпретация структурной модели принятия решений (рис. 2) позволяет выделить ключевой источник неустойчивости – наличие запаздывающих обратных связей. Поскольку решения о размере заказа принимаются на основе информации о спросе и запасах с временным сдвигом, формируется систематическое «перерегулирование» системы: чередование периодов избыточных запасов и дефицита, ухудшающее операционную и финансовую эффективность [19].

С точки зрения системной динамики модель Форрестера (рис. 3) позволяет интерпретировать эффект хлыста как результат сложного взаимодействия усиливающих и балансирующих контуров обратной свя-

зи, формирующих динамическое поведение цепи поставок. Усиливающие контуры связаны прежде всего с накоплением дефицита и последующим компенсирующим ростом объемов заказов, когда участники цепи стремятся не только удовлетворить текущий спрос, но и восполнить недопоставки предыдущих периодов. Балансирующие контуры, напротив, обусловлены физическими ограничениями запасов и фактическими возможностями поставок, что сдерживает реализацию избыточных заказов [20].

Результаты имитационного моделирования, выполненного в среде AnyLogic, показывают, что несогласованность временных лагов в указанных контурах, прежде всего задержек размещения и получения заказов, приводит к возникновению выраженного колебательного режима функционирования системы. Стоит отметить, что даже при детерминированном и относительно стабильном спросе конечного потребителя модель демонстрирует нарастание амплитуды колебаний заказов и запасов на последующих уровнях цепи.

### Заключение

В ходе проведенного исследования была проанализирована динамика функционирования четырехзвенной цепи поставок в условиях ограниченной информации и децентрализованного принятия управленческих решений. На основе натурного игрового эксперимента и имитационного моделирования системной динамики Форрестера показано, что даже при простых правилах управления запасами система демонстрирует выраженную неустойчивость.

Ключевым результатом исследования является подтверждение и количественное описание эффекта хлыста, проявляющегося в усилении колебаний заказов, запасов и денежных потоков по мере продвижения от розничного звена к производителю. Показано, что основными факторами, усиливающими данный эффект, являются логистические задержки, отсутствие обмена информацией и ориентация участников цепи исключительно на локальные показатели эффективности.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности использования разработанной модели для тестирования альтернативных стратегий управления цепями поставок, включая механизмы информационной координации, сглаживания заказов и адаптивного управления запасами. В перспективе дальнейшие исследования могут быть направлены на анализ влияния централизованных и гибридных схем управления, а также на оцен-

ку эффектов цифровизации и интеграции информационных платформ в логистических системах, включая методы машинного обучения и искусственного интеллекта.

### Список литературы

1. Михалева Д. Н., Соколова О. В. Эффект хлыста – как избежать ошибок в управлении запасами предприятия // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 86-4. С. 151-153. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_49211144\\_19840676.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_49211144_19840676.pdf) (дата обращения: 16.12.2025).
2. Козлова Е. И., Ахмед В. Н. А. «Эффект кнута» в управлении цепочкой поставок // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Экономика и управление. 2022. № 3 (59). С. 267-276. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Elena-Kozlova-17/publication/365116134\\_THE\\_WHIP\\_EFFECT\\_IN\\_SUPPLY\\_CHAIN\\_MANAGEMENT/links/6517f1a93ab6cb4ec6ace06f/THE-WHIP-EFFECT-IN-SUPPLY-CHAIN-MANAGEMENT.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Elena-Kozlova-17/publication/365116134_THE_WHIP_EFFECT_IN_SUPPLY_CHAIN_MANAGEMENT/links/6517f1a93ab6cb4ec6ace06f/THE-WHIP-EFFECT-IN-SUPPLY-CHAIN-MANAGEMENT.pdf) (дата обращения: 16.12.2025).
3. Рогулин Р. С. Систематический обзор проблемы управления цепями поставок: будущее и прошлые подходы к моделированию // Научные труды Вольного экономического общества России. 2023. № 240 (2). С. 228-256. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistematicheskiy-obzor-problemy-upravleniya-tsepyami-postavok-budushee-i-proshlye-podhody-k-modelirovaniyu/viewer> (дата обращения: 16.12.2025).
4. Pay В. Г., Горшков К. А., Поляков С. А., Pay Т. Ф., Кисляков А. Н., Тогунов И. А., Тихонюк Н. Е. Исследование теории групп нарушенной симметрии в природных, биологических и социально-экономических системах // Владимирский филиал РАНХиГС. 2020. С. 261. URL: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_42915277\\_10281197.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_42915277_10281197.pdf) (дата обращения: 16.12.2025).
5. Khasanov I. I., Alyunov A. N., Gorshkov K. A., Veliyev E. F. Application of long short-term memory neural networks for predicting paraffin deposition in crude oil pipelines // SOCAR Proceedings Special Issue. 2025. № S1. P. 1–7. URL: [https://proceedings.socar.az/uploads/pdf/109/001\\_007\\_OGP2025SI101114.pdf](https://proceedings.socar.az/uploads/pdf/109/001_007_OGP2025SI101114.pdf) (дата обращения: 17.12.2025).
6. Лычкина Н. Н. Имитационные модели организаций и их применение в стратегическом управлении и информационных бизнес-системах // Управленческие науки в современной России. 2014. № 2 (2). С. 396-400. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_21818064\\_11570718.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_21818064_11570718.pdf) (дата обращения: 16.12.2025).
7. Данилов А. С., Шорников Ю. В. Разработка и исследование моделей системной динамики в методологии гибридных систем // XIV Международная научно-практическая конференция студентов аспирантов и молодых ученых «Молодежь и современные информационные технологии». 2016. С. 116. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_28946613\\_63699471.pdf#page=116](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_28946613_63699471.pdf#page=116) (дата обращения: 16.12.2025).
8. Евсеев А. Д., Романчик К. В., Трухан Ю. Л. Влияние эффекта «хлыста» на управление запасами в цепях поставок // 80-я Научная конференция студентов и аспирантов БГУ (г. Минск, 27–28 апреля 2023 г.). Белорусский государственный университет. Институт бизнеса БГУ. С. 361-364. URL: <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/304796/1/80IB.pdf#page=361> (дата обращения: 17.12.2025).
9. Щепетова С. Е., Сатдыков А. И. Применение игровых технологий в преподавании «системных» дисциплин // Высшее образование в России. 2018. № 4. С. 127-134. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-igrovyyh-tehnologiy-v-prepodavanii-sistemnyh-distiplin/viewer> (дата обращения: 17.12.2025).
10. Рамазанов Р. Р. Сравнительная характеристика подходов имитационного моделирования общественных процессов // Вестник УГНТУ. Наука, образование, экономика. Серия: Экономика. 2017. № 2 (20). С. 67-77. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitel'naya-harakteristika-podkhodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-obshchestvennykh-protsessov>

podhodov-imitatsionnogo-modelirovaniya-obschestvennyh-protssosov/viewer (дата обращения: 17.12.2025).

11. Косников С. Н., Джамалян А. Г., Полещук М. А. Системная динамика: моделирование сложных экономических систем // Журнал прикладных исследований. 2025. № 4. С. 125-129. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistemnaya-dinamika-modelirovanie-slozhnyh-ekonomicheskikh-sistem/viewer> (дата обращения: 17.12.2025).

12. Николокин М. С., Обухов А. Д., Алексеев В. В. Моделирование поддержки принятия решений в системе управления складским комплексом // Правовая информатика. 2023. № 3. С. 54-64. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-podderzhki-prinyatiya-resheniy-v-sisteme-upravleniya-skladskim-kompleksom/viewer> (дата обращения: 17.12.2025).

13. Muthana A., Athanasios M. The impact of information sharing factors on the bullwhip effect mitigation: a systematic literature review // Operational Research. 2025. Vol. 25. Article 36. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12351-025-00915-3> (дата обращения: 18.12.2025). DOI: 10.1007/s12351-025-00915-3.

14. Хроль Е. В., Уварова А. Г., Кужильный А. В. Разработка имитационных моделей с помощью AnyLogic // Современные инновации, системы и технологии. 2023. Т. 3. № 4. С. 0119-0130. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-imitatsionnyh-modeley-s-pomoschu-anylogic/viewer> (дата обращения: 19.12.2025).

15. Кислицын Е. В., Городничев В. В. Имитационное моделирование развития отдельных отраслей тяжелой промышленности // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 1. С. 59-77. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/imitatsionnoe-modelirovanie-razvitiya-otdelnykh-otrasley-tyazheloy-promyshlennosti> (дата обращения: 19.12.2025).

modelirovanie-razvitiya-otdelnyh-otrasley-tyazheloy-promyshlennosti/viewer (дата обращения: 19.12.2025).

16. Леонтьев А. С. Задача управления запасами в условиях неопределённости. Модель оптимального выбора стратегии управления запасами при случайном спросе и ненадёжных поставщиках // Актуальные исследования. 2024. № 15 (197). С. 51-57. URL: <https://apni.ru/article/9001-zadacha-upravleniya-zapasami-v-usloviyakh> (дата обращения: 19.12.2025).

17. Федченко Д. А., Тупикова О. А. Подход к эффекту хлыста со стороны логистики // Вологодские чтения. 2009. № 74. С. 29. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podhod-k-effektu-hlysta-so-storony-logistiki/viewer> (дата обращения: 19.12.2025).

18. Sarkar M. The impact of information sharing and bullwhip effects on improving consumer services in dual-channel retailing // Journal of retailing and consumer services. 2023. Vol. 73. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969698923000541> (дата обращения: 19.12.2025).

19. Романова И. В., Игишев А. В. Управление запасами на высокотехнологичных производствах с учетом колебаний спроса // Экономика и управление. 2025. Т. 14. № 4. С. 81-92. URL: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_82566600\\_58605935.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_82566600_58605935.pdf) (дата обращения: 20.12.2025).

20. de Gooyert V., Awan A., Gürsan C., Swennenhuis F., Janipour Z., Gonella S. Building on and contributing to sustainability transitions research with qualitative system dynamics // Sustainability science. 2024. Т. 19. № 6. P. 1949-1962. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11625-024-01548-9> (дата обращения: 20.12.2025).

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.