

МЕТОДИКА ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ НЕДОСТАТКОВ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ



А.И. Лёвина

*Профессор Высшей школы бизнес-инжиниринга Института промышленного менеджмента, экономики и торговли ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доктор экономических наук, доцент
alyovina@gmail.com*



А.С. Дубгорн

*Доцент Высшей школы бизнес-инжиниринга Института промышленного менеджмента, экономики и торговли ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кандидат экономических наук
alissa.dubgori@gmail.com*

А.И. Лёвина

Окончила Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. В 2008 г. защитила диссертацию на соискание степени к.э.н., в 2020 г. – на соискание степени д.э.н. в том же университете. Область научных интересов связана с проектированием комплексных архитектурных решений по автоматизации, цифровизации, роботизации бизнеса, включающим системы управления на основе данных, комплексов математических моделей.

А.С. Дубгорн

Окончила Санкт-Петербургский государственный университет в 2009. В 2020 г. защитила диссертацию на соискание степени к.э.н. в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого. Область научных интересов связана с управлением ИТ-сервисами, проектированием архитектуры предприятий различных отраслей, разработкой систем поддержки принятия решений на основе данных.

Аннотация. Современные региональные логистические системы характеризуются высокой сложностью и динамичностью, при этом доступные данные об их функционировании используются недостаточно эффективно для обоснования решений по развитию инфраструктуры. Традиционные методы проектирования опираются на заданные параметры потоков, что ограничивает их применимость в условиях эндогенной динамики. Целью работы является разработка data-driven подхода к анализу и развитию логистических сетей на основе интеграции онтологического моделирования, системной динамики и агентно-ориентированного моделирования. Предложена онтология логистической системы, обеспечивающая интеграцию разнородных данных, и гибридная имитационная модель, позволяющая анализировать как макродинамику системы, так и поведение её участников. В качестве результата сформулирован подход к выявлению аномалий функционирования сети (перегрузки, задержки, дисбалансы потоков) на основе анализа данных и их интерпретации как индикаторов структурной недостаточности. Показано, что интеграция методов анализа больших данных и имитационного моделирования позволяет обосновывать направления развития логистической инфраструктуры.

Ключевые слова: логистические системы, развитие логистической инфраструктуры, системная динамика, агентное моделирование, управление на основе данных

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-78-10190, <https://rscf.ru/project/23-78-10190/>

Введение. Современные региональные логистические системы представляют собой сложные распределённые сети, функционирующие в условиях высокой неопределённости, сезонности и ограниченности инфраструктурных ресурсов. В процессе функционирования региональных логистических сетей генерируются и накапливаются большие массы разнородных данных: информации о перемещении грузов, загрузке транспортных маршрутов, работе портовой и складской инфраструктуры, а также параметрах спроса со стороны хозяйствующих субъектов и населения. Несмотря на наличие таких данных, их использование для анализа и развития логистических систем остаётся фрагментарным и недостаточно формализованным.

Существующие логистические сети не всегда эффективны: при их проектировании и строительстве пользуются только расчётными данными. В условиях реальной эксплуатации могут возникать такие узкие места, как перегрузка отдельных узлов, формирование очередей транспортных средств, превышение складских мощностей, увеличение времени доставки и пространственная неравномерность потоков. Подобные эффекты отражают несоответствие структуры сети фактическим потокам. Таким образом, параметры функционирования системы являются эндогенными и могут быть выявлены только на основе анализа данных о её реальном поведении.

Традиционные подходы к развитию логистической инфраструктуры опираются на нормативные модели, экспертные оценки или задачи оптимального размещения объектов при заданных параметрах спроса. В условиях доступности больших данных представляется целесообразным переход к data-driven подходам, в рамках которых структура логистической сети выводится из анализа её наблюдаемой динамики. В данной работе предлагается методологический подход, основанный на выявлении аномалий в функционировании логистической системы и интерпретации их как индикаторов структурной недостаточности сети.

Целью исследования является разработка методологии анализа и развития логистических сетей региона на основе интеграции онтологического представления данных и имитационного моделирования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: формализация предметной области логистической сети в виде онтологии; интеграция разнородных источников данных; построение имитационной модели, воспроизводящей функционирование системы; выявление аномалий поведения на основе анализа данных; формирование и проверка гипотез о развитии структуры сети.

Методология исследования. Предлагаемая методология основывается на интеграции методов управления данными, онтологического моделирования и

имитационного анализа, что позволяет реализовать data-driven подход к исследованию и развитию логистических систем. Ключевой особенностью подхода является использование больших данных о функционировании сети не только для описания текущего состояния системы, но и для выявления закономерностей её динамики и структурных ограничений.

На 1-ом этапе осуществляется формализация предметной области в виде онтологической модели. Онтология задаёт согласованную структуру данных, определяя классы объектов (транспортные узлы, маршруты, грузовые потоки, инфраструктурные элементы), их атрибуты и взаимосвязи. Это позволяет интегрировать разнородные источники данных – статистические, операционные и геопространственные – в единую семантическую модель. Таким образом, онтология выступает не только средством описания предметной области, но и инструментом обеспечения качества, сопоставимости и интероперабельности данных, необходимых для последующего моделирования.

На 2-ом этапе на основе интегрированных данных строится имитационная модель существующей логистической сети. В работе предлагается комбинированное использование методов системной динамики и агентно-ориентированного моделирования. Системная динамика применяется для анализа макроуровневых закономерностей функционирования системы, включая накопление запасов, формирование задержек и влияние ограничений пропускной способности. Агентное моделирование, в свою очередь, позволяет воспроизводить поведение отдельных участников логистического процесса (транспортных средств, инфраструктурных объектов, грузов) и локализовать структурные проблемы на уровне конкретных взаимодействий.

Важным аспектом является то, что модель калибруется и верифицируется на основе реальных данных, что обеспечивает её адекватность и практическую применимость. В процессе моделирования формируются временные ряды показателей функционирования системы: загрузка маршрутов, длина очередей, уровень использования складских мощностей, время доставки грузов и другие характеристики. Анализ этих данных позволяет выявлять устойчивые отклонения поведения системы, интерпретируемые как аномалии.

На 3-ем этапе осуществляется выявление аномалий (структурных несовершенств логистической сети) с использованием методов анализа данных, включая статистические подходы, анализ временных рядов и методы выявления выбросов. При анализе данных для выявления аномалий уделяется внимание устойчивым, систематически воспроизводимым отклонениям, отражающим структурные ограничения сети. Пространственно-временная локализация таких аномалий позволяет определить места системы, в которых возникают перегрузки или дефицит инфраструктурных мощностей.

На 4-ом этапе на основе выявленных аномалий формируются гипотезы о развитии логистической сети, включая добавление новых узлов, изменение топологии маршрутов или перераспределение потоков. Эти гипотезы проверяются с использованием имитационной модели, что позволяет количественно оценить их влияние на показатели функционирования системы. Таким образом, предлагаемый подход обеспечивает переход от анализа данных к обоснованию управленческих решений в области развития региональной логистической инфраструктуры.

Предлагаемая методология сочетает методы больших данных, онтологического моделирования и имитационного моделирования. Такое сочетание позволяет сформировать новый класс инструментов для исследования сложных экономических систем (к которым относятся и логистические системы), в которых структура определяется динамикой взаимодействия элементов, выявляемой на основе данных.

Онтология логистической системы. Формализация предметной области в виде онтологий становится всё более востребованным инструментом формализации и систематизации предметной области – её основных сущностей и их взаимосвязей. Онтология представляет собой формальное, явное описание концептуализации предметной области [1], Классики этой области отмечают роль онтологий как средства обеспечения

семантической согласованности моделей и данных [2]. Онтологии позволяют перейти от неструктурированного описания системы к формальной модели, задающей составляющие её сущности, их атрибуты и отношения [3]. В прикладном аспекте онтологии выполняют функцию интеграционного слоя, объединяющего разнородные источники данных (в т.ч. статистические, операционные и геопространственные данные), что особенно важно в условиях работы с большими данными.

При управлении на основе данных онтология выступает в качестве каркаса, обеспечивающего интерпретируемость и согласованность информации.

В отличие от традиционных схем хранения данных, ориентированных на конкретные приложения, онтологическая модель задаёт семантическую структуру, в рамках которой могут быть реализованы различные методы анализа – от статистических моделей до имитационного моделирования и методов машинного обучения.

Таким образом, онтология является связующим элементом между данными и математическим аппаратом, позволяя «запускать» различные аналитические и моделирующие процедуры на единой концептуальной основе.

Особую значимость онтологическое моделирование приобретает при анализе логистических систем, характеризующихся высокой степенью гетерогенности данных и сложной структурой взаимодействий.

В таких системах данные о потоках, инфраструктуре, ограничениях и внешней среде поступают из различных источников и имеют различную структуру и уровень детализации. Онтология позволяет унифицировать эти данные, обеспечивая их совместное использование в рамках аналитических и имитационных моделей.

В рамках настоящего исследования разработана онтология логистической одного из приморских регионов Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), отражающая основные элементы и взаимодействия, определяющие её функционирование (рисунок 1). В онтологии выделены следующие классы верхнего уровня:

- **Инфраструктура:** Класс включает стационарные элементы системы (порты, транспортные узлы, складские и перевалочные базы). Данные объекты определяют пространственную структуру сети и выступают в качестве точек концентрации и перераспределения потоков.

- **Мобильные агенты:** Класс включает объекты, непосредственно участвующие в перемещении грузов: суда, речные караваны (баржи) и грузовые партии. Эти элементы являются носителями динамики системы, формируя потоки и определяя загрузку инфраструктуры.

- **Связи:** класс включает маршруты (морские и речные) и логистические операции, обеспечивающими взаимодействие между элементами системы. Сущности этого класса задают топологию сети и определяют возможные траектории движения потоков.

- **Контекст:** Класс включает внешние по отношению к системе факторы, влияющие на её функционирование – спрос, навигационные окна и природно-климатические условия. Эти факторы задают ограничения и условия функционирования системы, определяя допустимые режимы её работы

Разработанная онтология формирует основу для последующего построения имитационной модели и анализа данных.

Она обеспечивает согласованное представление всех элементов системы и их взаимосвязей, что позволяет интегрировать разнородные данные и использовать их для анализа динамики логистической сети, выявления аномалий и обоснования направлений её развития.

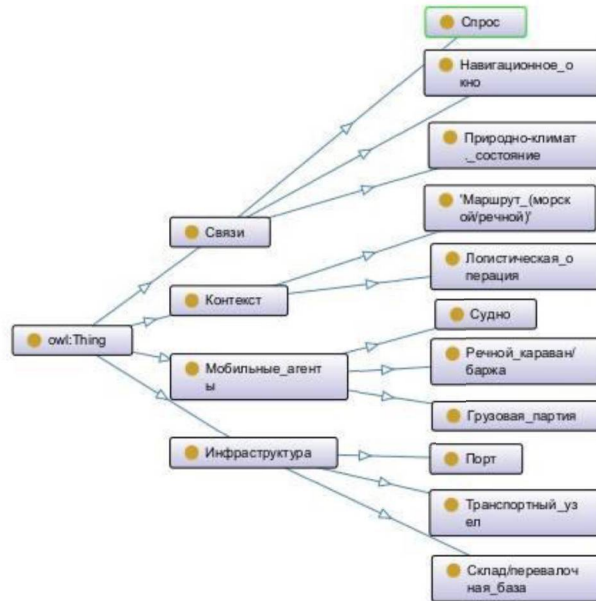


Рисунок 1. Онтология региональной логистической сети АЗРФ

Имитационная модель и работа с данными. Имитационная часть исследования опирается на комбинирование системной динамики (SD) и агентного моделирования (ABM) как взаимодополняющих методов анализа сложных экономических систем. Системная динамика, сформулированная в работах Дж. Форрестера [4] и развитая в классическом учебнике Дж. Стермана [5], предназначена для описания накоплений и потоков, задержек, обратных связей и неустойчивых режимов функционирования системы. Агентное моделирование, как показано в обзорной работе С. Macal и М. North [6], используется для моделирования систем, состоящих из автономных взаимодействующих агентов, и позволяет наблюдать коллективные эффекты, возникающие из локальных правил поведения и микровзаимодействий. Современная литература по гибриднему моделированию подчёркивает, что SD и ABM могут и должны сочетаться, а способы их соединения обычно описываются как интерфейсные, интегрированные и последовательные гибридные схемы [7-11].

В рамках рассматриваемой логистической задачи системная динамика используется для анализа макроуровневой эволюции сети. В этой постановке моделируются такие агрегированные переменные, как объём грузов в системе, уровень запасов на складах, очереди в портах, загрузка транспортных маршрутов, время оборота груза и длительность задержек. Уравнения баланса потоков позволяют описывать накопление и перераспределение ресурсов, а также выявлять условия, при которых система переходит в режим устойчивой перегрузки. Иначе говоря, SD отвечает на вопрос, почему логистическая сеть становится неустойчивой: из-за превышения пропускной способности, нарастания очередей, эффекта накопления незавершённого потока или запаздывания реакции на рост спроса. Для арктического узла это особенно важно, поскольку сезонность навигации и ограниченность инфраструктуры усиливают чувствительность сети к небольшим изменениям параметров.

Агентное моделирование, напротив, позволяет детализировать микрорешения участников логистического процесса и локализовать структурные проблемы сети. В модели агентами выступают суда, грузовые партии, портовые и складские объекты, а также, при необходимости, пункты спроса. Их поведение задаётся локальными правилами: выбор маршрута с учётом стоимости и риска, ожидание обслуживания, приоритет разгрузки,

принятие решений о накоплении или выпуске груза, реакция на погодные ограничения и изменение загрузки соседних узлов. Именно АВМ позволяет учесть неоднородность участников, конкуренцию за ограниченные ресурсы и формирование нелинейных эффектов в цепочке взаимодействий. В логистике и управлении цепями поставок это особенно ценно, поскольку агентный подход хорошо подходит для анализа динамичных и сложных сетей, где традиционные аналитические схемы требуют слишком жёстких допущений и плохо отражают реальное поведение участников.

Для конкретного арктического логистического узла предлагается связать оба метода в единую гибридную схему. На уровне данных онтология задаёт семантический каркас предметной области и обеспечивает сопоставимость разнородных источников информации; на уровне моделей SD обрабатывает агрегированные ряды и оценивает системные эффекты, а АВМ воспроизводит поведение отдельных агентов и выявляет узкие места в потоках. Такая архитектура позволяет использовать реальные данные не только для параметризации модели, но и для её калибровки и верификации. Важнейшими наблюдаемыми характеристиками становятся устойчивые отклонения между фактическим и модельным поведением: длительное превышение очередей, недозагрузка или, напротив, переполнение складов, рост времени доставки, частые перенаправления потоков и появление зон хронической перегрузки. Если такие аномалии воспроизводятся при допустимых значениях параметров и не устраняются локальной перенастройкой правил агентов, они интерпретируются как признаки структурной недостаточности сети и становятся основанием для выдвижения гипотез о её изменении. Современные работы по гибридной симуляции как раз подчёркивают, что именно на стадии концептуального моделирования необходимо формально определить, какие переменные и какие уровни системы должны описываться системной динамикой, а какие – агентным моделированием.

Для исследуемого арктического узла это означает следующее распределение задач моделирования. Системная динамика должна описывать сезонный приток грузов, накопление запасов, загрузку причалов, динамику очередей, дефицит складских ёмкостей и влияние навигационных окон на пропускную способность сети. Агентное моделирование должно воспроизводить индивидуальные решения судов и операторов инфраструктуры, маршрутизацию грузов, поведение складов как буферов, реакцию на погодные и ледовые ограничения, а также перераспределение потоков между узлами. Такое соединение методов позволяет перейти от статического описания сети к data-driven анализу её поведения и, следовательно, к обоснованному выявлению аномалий, которые указывают на необходимость появления новых логистических элементов или изменения характеристик существующих.

Математическая постановка гибридной модели. Рассматривается региональная логистическая сеть как ориентированный граф $G=(V,E)$, где множество вершин V включает инфраструктурные узлы и пункты спроса, а множество рёбер E описывает транспортные связи между ними. Вершины делятся на типы: порты, склады (перевалочные базы), узлы спроса. Рёбра соответствуют морским и речным маршрутам. Модель строится в дискретном времени $t=0,1,\dots,T$ и объединяет два уровня описания: макроуровень системной динамики и микроуровень агентного поведения.

Вершины делятся на типы: порты, склады (перевалочные базы), узлы спроса. Рёбра соответствуют морским и речным маршрутам. Модель строится в дискретном времени $t = 0,1,\dots,T$ и объединяет два уровня описания: макроуровень системной динамики и микроуровень агентного поведения.

Переменные модели:

Для каждого узла $i \in V$ и маршрута $e \in E$ вводятся следующие переменные:

$S_i(t)$ – запас груза в узле i ,

$Q_i(t)$ – очередь на обслуживание в узле i ,

$L_e(t)$ – загрузка маршрута e ,

$F_e(t)$ – фактический поток по маршруту e ,

C_i – пропускная способность узла i ,

C_e – пропускная способность маршрута e ,

$D_i(t)$ – спрос в точке i ,

$\Delta_i(t)$ – дефицит удовлетворения спроса.

Для каждого агента $a \in A$ определяются состояние $x_a(t)$ и правило принятия решения $u_a(t)$. В состав агентов входят суда, грузовые партии, порты, склады и, при необходимости, пункты спроса.

Блок системной динамики

Системная динамика используется для описания агрегированного движения потоков, накопления запасов и образования очередей. Для каждого узла баланс запасов задаётся уравнением:

$$S_i(t + 1) = S_i(t) + In_i(t) - Out_i(t),$$

где $In_i(t)$ – входящий поток груза, а $Out_i(t)$ – выходящий поток.

Очередь в узле изменяется по правилу:

$$Q(t + 1) = Q_i(t) + Arr_i(t) - Serv_i(t),$$

где $Arr_i(t)$ – число прибывших единиц груза или транспортных средств, а $Serv_i(t)$ – обслуженный объём за шаг времени.

Загрузка маршрута определяется как:

$$L_e(t) = \frac{F_e(t)}{C_e}$$

Если $L_e(t) > 1$, маршрут находится в состоянии перегрузки. Для узлов аналогично вводится коэффициент загрузки:

$$U_i(t) = \frac{S_i(t) + Q_i(t)}{C_i}$$

Для узла спроса дефицит описывается выражением:

$$\Delta_i(t) = D(t) - Out_i(t), \quad \Delta_i(t) \geq 0$$

Тем самым системная динамика фиксирует устойчивые макроэффекты: накопление запасов, рост очередей, перегрузку маршрутов и дефицит удовлетворения спроса. Эти зависимости отвечают на вопрос, почему система теряет устойчивость.

Блок агентного моделирования

Агентное моделирование используется для описания локального поведения участников логистического процесса и объяснения того, где именно возникает структурная недостаточность сети. Ниже описаны ключевые агенты, выделенные в АВМ-модели:

1. Судно:

Каждое судно $v \in A_v$ выбирает маршрут и режим движения, минимизируя индивидуальные издержки:

$$J_v(t) = \alpha_1 T_v(t) + \alpha_2 Cost_v(t) + \alpha_3 Delay_v(t) + \alpha_4 Risk_v(t),$$

где:

$T_v(t)$ – время рейса,

$Cost_v(t)$ – транспортные затраты,

$Delay_v(t)$ – задержки в портах и на маршруте,
 $Risk_v(t)$ – риск нарушения навигационных условий.
Ограничения судна:

$$\begin{aligned} draft_v &\leq draft_{route} \\ iceclass_v &\leq iceclass_{route} \\ t &\in [t_{start}^{nav}, t_{end}^{nav}] \end{aligned}$$

То есть судно может двигаться только при допустимой осадке, ледовом классе и в пределах навигационного окна.

2. Порт:

Каждый порт $p \in A_p$ обслуживает входящий поток при ограниченных ресурсах. Целевая функция порта задаётся как максимизация обработанного объёма при минимизации очередей:

$$J_p(t) = -\beta_1 Q_p(t) - \beta_2 W_p(t) + \beta_3 H_p(t),$$

где:

$Q_p(t)$ – очередь,

$W_p(t)$ – среднее время ожидания,

$H_p(t)$ – объём обработанного груза.

Ограничения функционирования порта:

$$H_p(t) \leq C_p, \quad N_p^{sh}(t) \leq B_p,$$

где B_p – число одновременно обслуживаемых судов (количество причалов/операционных линий).

3. Склад (перевалочная база):

Каждый склад $w \in A_w$ выполняет буферную функцию. Его поведение описывается целевой функцией минимизации издержек хранения и потерь:

$$J_w(t) = \gamma_1 Loss_w(t) + \gamma_2 OverFl_w(t) + \gamma_3 HC_w(t),$$

где:

$Loss_w(t)$ – потери груза,

$OverFl_w(t)$ – переполнение склада, $OverFl_w(t) = \max(0, S_w(t) - C_w)$,

$HC_w(t)$ – стоимость хранения.

Ограничение:

$$S_w(t) \leq C_w$$

4. Грузовая партия как агент

Грузовая партия $c \in A_c$ рассматривается как объект, обладающий требованиями к срокам и маршруту доставки. Её целевая функция:

$$J_c(t) = \delta_1 Del_c(t) + \delta_2 Pen_c(t) + \delta_3 Dam_c(t).$$

Груз не «принимает решения» в классическом смысле, но задаёт давление на систему через дедлайны, приоритеты и штрафы за просрочку.

Связь двух частей модели (системная динамика и агентное моделирование) реализуется через переход от локальных решений агентов к агрегированным потокам и обратно.

Фактический поток по маршруту определяется суммой решений судов:

$$F_e(t) = \sum_{v \in A_v} f_{ve}(t)$$

где $f_{ve}(t) \in \{0,1\}$ показывает, использует ли судно v маршрут e на шаге t .
Совокупный входящий поток в узел:

$$In_i(t) = \sum_{e \in \delta^-(i)} F_e(t)$$

а исходящий поток:

$$Out_i(t) = \sum_{e \in \delta^+(i)} F_e(t)$$

где $\delta^-(i)$ и $\delta^+(i)$ – множества входящих и выходящих рёбер узла i .

Состояния очередей и загрузки используются в правилах выбора агентов. Например, судно выбирает маршрут с минимальным ожидаемым временем:

$$e_v^*(t) = \arg \min \{ \hat{T}_e(t) + \mu_1 \hat{W}_{dest(e)}(t) + \mu_2 \hat{R}_e(t) \}$$

где:

$\hat{T}_e(t)$ – прогнозируемое время прохождения,

$\hat{W}_{dest(e)}(t)$ – ожидаемое ожидание в пункте назначения,

$\hat{R}_e(t)$ – риск нарушения навигации.

Таким образом, системная динамика задаёт контекст состояния сети, а агенты реагируют на него своими локальными решениями. В результате возникает замкнутый контур:

решения агентов – потоки – накопления и очереди – новые решения агентов.

Именно в этом контуре формируются устойчивые аномалии – перегрузки, задержки, переполнение складов и хронические узкие места. Сеть считается структурно недостаточной, если при допустимых параметрах агентов и существующей топологии сохраняется устойчивое нарушение ограничений:

$$\exists i \in V, e \in E: U_i(t) > 1 \text{ или } L_e(t) > 1 \quad \forall t \in [T_1, T_2],$$

а локальная адаптация агентов не устраняет перегрузку.

Тогда возникает гипотеза о необходимости модификации сети:

$$G' = (V \cup \{v_{new}\}, E')$$

где

v_{new} – новый логистический узел, добавление которого проверяется повторным моделированием.

Важным результатом исследования является формирование требований к структуре данных, обеспечивающей реализацию предложенной гибридной модели. В соответствии с разработанной онтологией данные должны быть организованы по нескольким взаимосвязанным контурам: инфраструктурному (характеристики портов, складов, транспортных узлов), транспортному (маршруты, их пропускная способность, сезонность, ограничения), операционному (перемещение грузов, загрузка мощностей, очереди, время обработки), а также контекстному (спрос, навигационные окна, природно-климатические условия). Такая структура данных позволяет перейти от разрозненных источников информации к единой семантически согласованной модели, в рамках которой обеспечивается корректная параметризация как системно-динамических зависимостей, так и правил поведения агентов. В частности, она даёт возможность формировать временные ряды потоков и состояний системы, необходимые для калибровки модели, а также реконструировать траектории движения грузов и транспортных средств.

Предложенная структура данных ориентирована на использование как ретроспективной, так и оперативной информации. Для целей анализа устойчивости логистической системы и выявления аномалий целесообразно использование исторических данных за период не менее 1-3 навигационных циклов, что позволяет учитывать сезонные эффекты и вариативность внешних условий. В качестве источников могут выступать данные автоматических систем идентификации судов (AIS), статистика портовых операций, информация о складских остатках и перемещениях грузов, а также метеорологические и ледовые данные. Интеграция указанных источников в рамках онтологической модели обеспечивает возможность построения согласованных временных и пространственных представлений функционирования системы, что является необходимым условием для применения методов имитационного моделирования и анализа аномалий.

Заключение. В работе предложен методологический подход к анализу и развитию региональных логистических систем, основанный на интеграции онтологического моделирования, методов системной динамики и агентно-ориентированного моделирования. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на прямое проектирование инфраструктуры, предложенное решение реализует обратную постановку задачи, при которой структура логистической сети определяется на основе анализа динамики её функционирования и выявления устойчивых аномалий поведения.

В рамках исследования разработана онтологическая модель логистической системы, обеспечивающая формализацию предметной области и интеграцию разнородных источников данных. Показано, что онтология выступает ключевым элементом data-driven подхода, задавая семантический каркас, в рамках которого могут быть реализованы методы обработки, анализа и моделирования данных. На основе онтологического представления предложена гибридная имитационная модель, объединяющая системную динамику и агентное моделирование. Такое сочетание позволяет одновременно учитывать макроуровневые закономерности функционирования системы и микроповедение её участников, что обеспечивает более полное и реалистичное описание логистических процессов.

Ключевым результатом работы является формализация подхода к выявлению структурной недостаточности логистической сети через анализ наблюдаемых аномалий, таких как перегрузка узлов, переполнение складских мощностей, устойчивые задержки и дисбалансы потоков. Показано, что данные явления могут быть интерпретированы как индикаторы необходимости изменения структуры сети, включая добавление новых инфраструктурных элементов или перераспределение потоков. Тем самым предложенный подход обеспечивает переход от анализа данных к обоснованию управленческих решений в области развития логистической инфраструктуры.

Подход может быть использован при планировании развития транспортно-логистической инфраструктуры, оптимизации цепей поставок, а также в системах поддержки принятия решений на основе больших данных. В частности, подход может быть полезен при анализе эффективности структуры региональных логистических сетей (в статье приведён пример анализа логистической сети одного из приморских районов Арктической зоны Российской Федерации).

Вместе с тем, реализация предложенного подхода связана с рядом ограничений и направлений дальнейших исследований. К числу потенциальных узких мест относится неполнота и неоднородность исходных данных, различия в уровнях агрегации информации, а также необходимость обеспечения их семантической согласованности. Дополнительной задачей является разработка методов автоматической идентификации параметров модели и формализация критериев устойчивых аномалий на основе наблюдаемых данных. Перспективным направлением является также интеграция методов машинного обучения для повышения точности прогнозирования поведения агентов и выявления скрытых

закономерностей в потоках. Таким образом, предложенная структура данных и модель создают основу для дальнейшего развития инструментов data-driven анализа и проектирования логистических систем, однако требуют последующей эмпирической апробации и уточнения на реальных данных.

Вместе с тем, реализация предложенного подхода связана с рядом ограничений и направлений дальнейших исследований.

К числу потенциальных узких мест относится неполнота и неоднородность исходных данных, различия в уровнях агрегации информации, а также необходимость обеспечения их семантической согласованности.

Дополнительной задачей является разработка методов автоматической идентификации параметров модели и формализация критериев устойчивых аномалий на основе наблюдаемых данных. Перспективным направлением является также интеграция методов машинного обучения для повышения точности прогнозирования поведения агентов и выявления скрытых закономерностей в потоках.

Таким образом, предложенная структура данных и модель создают основу для дальнейшего развития инструментов data-driven анализа и проектирования логистических систем, однако требуют последующей эмпирической апробации и уточнения на реальных данных.

Список литературы

- [1] Gruber T.R. A translation approach to portable ontology specifications // Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5, No. 2. – P. 199–220.
- [2] Guarino N. Formal Ontology and Information Systems // Proceedings of FOIS. – 1998. – P. 3–15.
- Studer R., Benjamins V.R., Fensel D. Knowledge engineering: Principles and methods // Data & Knowledge Engineering. – 1998. – Vol. 25. – P. 161–197.
- [3] Noy N.F., McGuinness D.L. Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. – Stanford Knowledge Systems Laboratory, 2001.
- [4] Forrester J. W. Industrial Dynamics. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- [5] Sterman J. D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.
- [6] Macal C. M., North M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation // Journal of Simulation. 2010. Vol. 4, No. 3. P. 151–162. DOI: 10.1057/jos.2010.3.
- [7] Swinerd C., McNaught K. R. Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models // Simulation Modelling Practice and Theory. 2012. Vol. 25. P. 118–133. DOI: 10.1016/j.simpat.2011.09.002.
- [8] Nguyen L. K. N., Howick S., Megiddo I. A framework for conceptualising hybrid system dynamics and agent-based simulation models // European Journal of Operational Research. 2024. Vol. 315, No. 3. P. 1153–1166. DOI: 10.1016/j.ejor.2024.01.027.
- [9] Bozdogan A., et al. An agent-based modeling framework for the design of a dynamic closed-loop supply chain network // PLOS ONE. 2022.
- Борисов, И. А. Генеративные методы в проектном управлении / А. И. Борисов // Управление проектами. – 2020. – № 12(3). – С. 45-59.
- [10] Лёвина А. Агентная модель поддержки принятия решений по управлению портфелем проектов / Лёвина А., Калязина С., Трифонова Н., Антонов А., Абрамов В. // Устойчивое развитие и инженерная экономика. – 2025. – № 1 (15). – С. 58-79.
- [11] Smith, J. Machine Learning Applications for Generative Decision-Making / J. Smith, T. Johnson // Journal of Business Intelligence. – 2021. – № 15(2). – PP. 88-99.

Авторский вклад

Лёвина Анастасия Ивановна – постановка задачи исследования, разработка методологии интеграции методов имитационного моделирования.

Дубгорн Алиса Сергеевна – анализ литературы, разработка математических моделей.

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF GENERATIVE POLICY IN OPTIMIZING DESIGN DECISIONS

A.I. Levina

*Professor, Graduate School of Business
Engineering, Peter the Great Polytechnic
University,
DrSc (Econ.), Associate Professor*

A.S. Dubgorn

*Associate Professor, Graduate School of
Business Engineering, Peter the Great
Polytechnic University,
CandSc (Econ.)*

Abstract. Modern regional logistics systems are characterized by high complexity and dynamism, while the available data on their functioning are not used effectively enough to substantiate infrastructure development decisions. Traditional design methods rely on predefined flow parameters, which limits their applicability under conditions of endogenous dynamics. The aim of this work is to develop a data-driven approach to the analysis and development of logistics networks based on the integration of ontological modeling, system dynamics, and agent-based modeling. An ontology of the logistics system is proposed to ensure the integration of heterogeneous data, along with a hybrid simulation model that enables the analysis of both the system's macrodynamics and the behavior of its participants. As a result, an approach is formulated for identifying network functioning anomalies (congestion, delays, flow imbalances) based on data analysis and their interpretation as indicators of structural insufficiency. It is shown that integrating big data analysis methods with simulation modeling makes it possible to substantiate directions for the development of logistics infrastructure.

Keywords: logistics systems, logistics infrastructure development, system dynamics, agent-based modeling, data-driven management.