

Научная статья

УДК 338.32.053

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16402>



## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПАНИЙ В УСЛОВИЯХ ИНДУСТРИИ 4.0

О.И. Долгова , А.Ю. Никитаева 

Южный федеральный университет,  
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ [oldolgova@sfedu.ru](mailto:oldolgova@sfedu.ru)

**Аннотация.** Оптимизация бизнес-процессов помогает повысить эффективность предприятия при помощи сокращения времени производства продукции, количества производимых с продуктом операций и количество вовлеченных в процесс людей, что позволяет значительно снизить себестоимость и при этом не потерять в качестве продукции. Одним из наиболее распространенных и эффективных методов совершенствования бизнес-процессов является имитационное моделирование. Данная технология позволяет не только наглядно отображать структуру, но и имитировать поведение системы во времени. Данное исследование сфокусировано на изучении возможностей применения имитационного моделирования для управления бизнес-процессами компаний промышленного сектора в условиях Индустрии 4.0. Для того чтобы оценить востребованность и практику применения моделирования в управлении и использование моделирования в промышленности, был проведен анализ мировых публикаций по методу PRISMA. По результатам данного анализа были выявлены два основных типа публикаций: универсальные исследования, результаты которых можно использовать при моделировании бизнес-процессов промышленных компаний из различных сфер экономики; узкоспециализированные публикации, направленные на исследования достаточно специфических бизнес-процессов. Для того чтобы выяснить, какие методики имитационного моделирования являются наиболее подходящими для моделирования различных типов бизнес-процессов, была проведена классификация бизнес-процессов промышленного предприятия по типу наиболее подходящей методики имитационного моделирования. Данные разработки могут быть применены для упрощения процесса выбора типа имитационного моделирования для решения различных организационно-управленческих задач. В качестве демонстрации возможностей имитационного моделирования была разработана имитационная модель цепочки поставок, которая позволяет отслеживать способность имеющихся промышленных предприятий выполнять заказы по поставке продукции к клиентам в полном объеме, а также помогает подобрать наилучшее расположение для филиала или склада. Используемый в модели функционал геоинформационных систем позволяет не только наглядно отобразить процесс доставки продукции до потребителей, но и просчитать транспортные расходы, так как транспортные средства в модели двигаются по маршруту, аналогичному реальному.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, бизнес-процессы, цифровые технологии, агентное моделирование, логистическая модель, методики имитационного моделирования, промышленное предприятие, Индустрия 4.0

**Для цитирования:** Долгова О.И., Никитаева А.Ю. (2023) Имитационное моделирование бизнес-процессов промышленных компаний в условиях Индустрии 4.0. П-Economy, 16 (4), 26–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16402>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16402>

## SIMULATION MODELING OF BUSINESS PROCESSES OF INDUSTRIAL COMPANIES IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

O.I. Dolgova , A.Yu. Nikitaeva 

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ [oldolgova@sfedu.ru](mailto:oldolgova@sfedu.ru)

**Abstract.** Optimization of business processes helps to increase the efficiency of the enterprise by reducing the production time, the number of operations performed with the product and the number of people involved in the process, which allows you to significantly reduce the cost and at the same time retain product quality. One of the most common and effective methods of improving business processes is simulation modeling. This technology allows you not only to visually display the structure, but also to simulate the behavior of the system over time. This study focuses on the study of the possibilities of using simulation modeling to manage business processes of companies in the industrial sector in the context of Industry 4.0. In order to assess the relevance and practice of modeling in management and the use of modeling in industry, an analysis of world publications by the PRISMA method was conducted. Based on the results of this analysis, two main types of publications were identified: universal studies, the results of which can be used in modeling business processes of industrial companies from various sectors of the economy; highly specialized publications aimed at researching fairly specific business processes. In order to find out which simulation methods are the most suitable for modeling various types of business processes, industrial enterprise processes were classified by the type of the most suitable simulation methodology. These developments can be applied to simplify the process of choosing the type of simulation modeling for solving various organizational and managerial tasks. For demonstration purposes, a simulation model of the supply chain was developed, which allows you to track the ability of existing industrial enterprises to fulfill orders for the supply of products to customers in full, and also helps to choose the best location for a branch or warehouse. The functionality of geoinformation systems used in the model allows us not only to visually display the process of delivering products to consumers, but also to calculate transport costs, since vehicles in the model move along a route similar to the real one.

**Keywords:** simulation modeling, business processes, digital technologies, agent modeling, logistics model, simulation techniques, industrial enterprise, industry 4.0

**Citation:** Dolgova O.I., Nikitaeva A.Yu. (2023) Simulation modeling of business processes of industrial companies in the context of Industry 4.0. *П-Economy*, 16 (4), 26–40. DOI: <https://doi.org/10.18721/JE.16402>

### Введение

В оптимизации бизнес-процессов лежит большая возможность повышения эффективности предприятия. Изменение глубинных процессов организации способно сократить время производства продукции, снизить количество производимых с продуктом операций, уменьшить количество вовлеченных в процесс людей, что позволит значительно снизить себестоимость и при этом не потерять в качестве продукции, а также сохранить объем продаж и долю рынка [1].

Также необходимо отметить, что оптимальность со временем снижается, и на предприятии, чьи бизнес-процессы были оптимизированы, через определенный промежуток времени придется вновь проводить оптимизацию. Это происходит из-за устаревания используемых технологий и возникновения несогласованности в бизнес-процессах. Особенно важно в настоящее время принимать масштабные изменения в деятельности хозяйствующих субъектов, происходящие в связи с Индустрией 4.0 как главной репрезентацией Четвертой промышленной революции.

Для решения проблем по совершенствованию бизнес-процессов существует много способов и методов. Одним из таких методов является имитационное моделирование, позволяющее имити-

ровать поведение системы во времени и дающее возможность этим временем управлять, замедляя или ускоряя в зависимости от скорости протекания процесса. Основной целью имитационного моделирования является создание модели анализируемого объекта, то есть воспроизведение поведения исследуемой системы на основе результатов анализа для проведения различных экспериментов. Это приобретает большое значение в условиях цифровой трансформации и новой индустриализации, приводящей ко значительным изменениям в деятельности хозяйствующих субъектов.

Имитационные модели в западных странах являются обязательными в комплекте документов при проектировании нового или модернизации существующего производства [2], поэтому изучение возможностей использования имитационного моделирования для управления бизнес-процессами промышленных предприятий российского рынка представляется актуальным.

Данное исследование нацелено на определение возможностей и способов управления бизнес-процессами промышленных предприятий в условиях Индустрии 4.0 с применением имитационного моделирования.

Целью исследования является определение возможностей и приоритетных областей управления бизнес-процессами промышленных предприятий в условиях индустрии 4.0 при помощи имитационного моделирования.

Для выполнения цели были поставлены следующие задачи:

1. Проанализировать практику применения моделирования в управлении.
2. Выявить преимущества и недостатки использования имитационного моделирования в контексте управления бизнес-процессами.
3. Определить типы имитационного моделирования, используемые на промышленных предприятиях, и выделить наиболее предпочтительные виды имитационного моделирования для бизнес-процессов разных типов.
4. Разработать имитационную модель цепочки поставок промышленного предприятия и на ее основе определить перспективность использования методов имитационного моделирования в управлении цепочками поставок промышленного предприятия.

В качестве объекта исследования выступают компании промышленного сектора, функционирующие с использованием цифровых технологий.

Предмет исследования представляет собой методы и технологии имитационного моделирования в управлении бизнес-процессами промышленных предприятий.

**Литературный обзор.** Для того чтобы оценить востребованность и практику применения моделирования в управлении и использование моделирования в промышленности, был проведен анализ публикаций по методу PRISMA за 2020–2022 годы в международной базе Scopus. Применение данного метода позволило подойти к анализу литературных источников более системно. Схема проведенного анализа представлена на рис. 1.

Анализ проходил в несколько этапов:

1. В начале были отобраны публикации в базе данных Scopus до 2022 года, содержащие в своем названии сочетание «management simulation». После чего был произведен аналогичный отбор по проблематике «industrial simulation».
2. Затем публикации были объединены в общий список и проанализированы на предмет дубликатов публикаций. После чего все публикации-дубли были исключены из анализа.
3. Для получения наиболее актуальной информации о существующих тенденциях все публикации, вышедшие ранее 2019 года, были исключены.
4. После этого были отобраны только работы, представляющие собой по типу статью в журнале или анализ литературы.
5. Затем работы, не соответствующие тематике промышленности, были исключены из анализа.

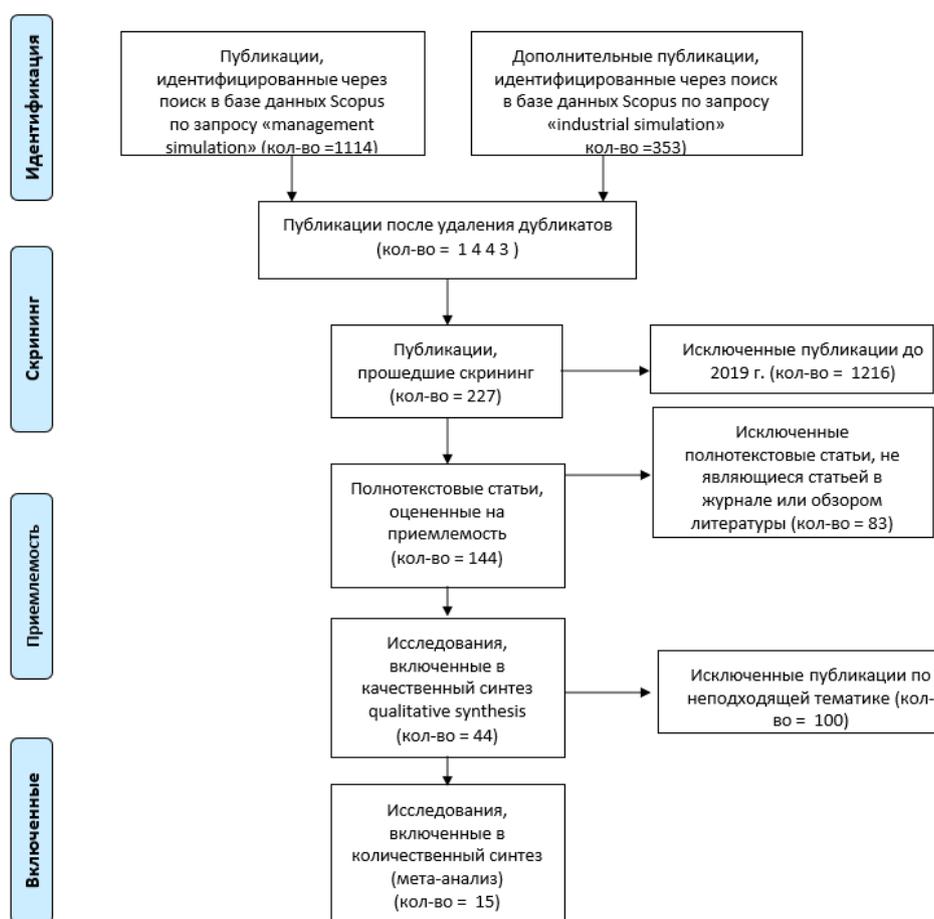
Рис. 1. Анализ литературы по методу Призма<sup>1</sup>

Fig. 1. Analysis of the literature using the PRISM method

6. В заключении был произведен финальный отбор, в который были включены публикации, где имитационное моделирование применялось в сфере промышленности и могло служить методом управления бизнес-процессами.

В итоге было отобрано 15 статей, которые были классифицированы в две категории.

К первой группе были отнесены научные публикации, посвященные более специфичным аспектам управления промышленными бизнес-процессами. Так, исследования индийского ученого Madhiarasan M. [3] посвящены разработке модели прогнозирования скорости ветра, которая позволит улучшить управление ветряными электростанциями, китайский исследователь Wang Yuwei [4] также провел научные изыскания в этой предметной области и предложил использовать моделирование для прогнозирования предложения и вариантов эксплуатации ветряных электростанций. Исследователь из Нидерландов Roman B. [5] представил модель, прогнозирующую изменения состояния заряда батареи и позволяющую осуществлять управление энергопотреблением. Шведский ученый Johansson S. [6] в своих работах также обратился к альтернативным источникам энергии и представил модель, которая демонстрирует, насколько электросеть Швеции может справиться с повсеместным внедрением электромобилей. Тематика исследований китайского ученого Wang Ying [7] связана с моделированием управления рыболовством и позволяет разработать сценарии, благоприятно влияющие на восстановление экосистемы. Научные работы другого китайского исследователя Jiang H. [8] сфокусированы на проблемах эксплуатации водохранилищ, поэтому ученый предлагает использовать для управления наводнениями имитацион-

ное моделирование. Hurmekoski E. [9] из Финляндии предложил использовать моделирование для оптимизации управления лесным хозяйством, греческий ученый Dimitriou N. [10] предлагает программную архитектуру, основанную на нейронных сетях, которая позволяет моделировать производственные характеристики и прогнозировать возможные сбои, связанные с неоптимальной производительностью. Новозеландский ученый Khaembah E.N. [11] в своем исследовании использовал медоку моделирования в качестве инструмента для оценки степени влияния управления удобрениями на выщелачивание азота из пахотных земель.

Во вторую группу можно выделить более универсальные работы, результаты которых можно использовать в различных бизнес-процессах промышленных компаний. Исследователь из США Dos Reis F.B. [12] предложил использовать моделирование отдельных потребителей и домохозяйств, а также их электрических активов для оценки положительных эффектов от управления электроэнергией на стороне потребителя. Бразильский ученый Reis L.A. [13] считает компьютерное моделирование эффективным методом снижения рисков и определения оптимального решения в вопросах транспортировки грузов. В странах третьего мира в настоящее время наблюдается сокращение использования электроэнергии, поэтому пакистанский исследователь Ahmed S. [14] использует моделирование для выбора между разными стратегиями энергопотребления. Немецкий исследователь Schier S. [15] в своих работах изучает использование моделирования с участием человека для обучения сотрудников системы воздушного движения (оператор, пилотов и т.д.) кооперативному поведению. Gao M. [16] из Китая изучает оценку эффективности прогнозирования промышленных генетических данных на основе нейронных сетей, больших данных и технологий визуализации при помощи моделирования. Иранский исследователь Gorgich M. [17] в своем исследовании представил модель работы контейнерного терминала, предназначенную для поиска факторов, которые оказывают наибольшее влияние на эффективность работы терминала.

Таким образом, можно сделать вывод, что публикаций, посвящённых использованию имитационного моделирования для управления бизнес-процессами, достаточно мало. Имеющиеся исследования можно условно подразделить на две группы: универсальные и узкоспециализированные. Первая разновидность публикаций является более востребованной при необходимости изучения конкретных специфических бизнес-процессов, в то время как результаты исследований второй группы можно применять при имитационном моделировании бизнес-процессов предприятий из различных сфер промышленности.

**Методы и материалы.** Методологическая основа исследования представлена процессным подходом к управлению организацией и теоретическими положениями концепции Индустрия 4.0. В работе использовались категориальный и сравнительный методы анализа, статистический анализ, метод PRISMA, а также применялись технологии геоинформационных систем и методика имитационного моделирования.

**Результаты и обсуждение.** Представляется важным проанализировать преимущества использования технологий имитационного моделирования применительно к экономическим системам, поскольку они обладают особыми специфическими чертами, отличными от химических, биологических и других систем. Применение имитационного моделирования в управлении экономическими системами имеет следующие положительные стороны:

1. Модели помогают не только более четко увидеть имеющиеся проблемы, но и дают возможность применять для работы над их устранением единый системный подход.
2. Модели дают возможность осуществлять оценку для разных временных периодов.
3. Замена экспериментов на реальном объекте моделированием позволяет существенно сэкономить денежные средства и лучше контролировать процесс проведения эксперимента.
4. Использование моделирования требует четкого формулирования его целей, что позволяет сфокусироваться на решении конкретных задач.

5. При проведении анализа объекта исследователям требуется организовать сбор предварительных данных. Моделирование дает возможность обнаружить те области, в которых необходима дополнительная информация заранее до завершения построения модели.

6. Моделирование позволяет использовать все имеющиеся математические знания.

7. Использование моделирования дает возможность проводить аналитику.

8. Моделирование позволяет симитировать практическую любую ситуацию для ответа на вопросы по типу "а что, если?..".

Несмотря на то, что использование имитационного моделирования предоставляет пользователю широкие возможности, у данной методики есть и ряд недостатков, наиболее важными из которых являются:

1. Превращение моделирования из инструмента исследования в самоцель.

2. В некоторых случаях значимость количественных характеристик может начать превышать значимость качественных данных.

3. Модели могут использоваться неправильно, а их результаты могут быть интерпретированы неверно. Данный риск увеличивает распространение цифрового моделирования, так как рядовому пользователю может быть сложно корректно оценить все аспекты сложной модели и правильно определить в каких случаях ее требуется применять.

Важно отметить, что имитационные модели отражают не все свойства реального объекта, а представляют собой его ограниченную версию, из-за чего результаты моделирования должны рассматриваться не как руководство к действию, а как ориентиры при принятии управленческих решений, поскольку отвечать за последствия принятого решения все равно придется человеку.

Основной задачей моделирования является определение особенностей применяемых методов для того, чтобы постараться максимально нивелировать влияние их отрицательных сторон и в полной мере реализовать предоставляемые ими преимущества [18].

Таким образом, можно отметить наличие потенциала применения инструментария имитационного моделирования для управления бизнес-процессами, например, для их оптимизации. Однако для оценки величины данного потенциала необходимо проанализировать опыт российских промышленных компаний, изучить сильные и слабые стороны этой технологии, а также возможности и угрозы, к которым может привести ее использование.

Анализ литературы показал, что цифровая технология имитационного моделирования может использоваться как метод проверки и экспериментального тестирования проектов разработки систем экономического планирования и управления промышленных предприятий. Также методика имитационного моделирования применяется для создания систем поддержки принятия решений и обучающих симуляторов.

В промышленности имитационные модели можно использовать для решения следующих задач:

- 1) оценки эффективности проектов и решений;
- 2) изучения структуры системы для решения выявленных проблем;
- 3) создания прогнозов и планирования развития рассматриваемых объектов;
- 4) анализа и выявления критических элементов изучаемых бизнес-процессов.

Наиболее значимый эффект применение имитационного моделирования оказывает при проведении экспериментов для проверки эффектов от реализации проектов, направленных на изменение в структуре предприятия и бизнес-процессов, модернизацию экономических механизмов и иные усовершенствования. Кроме этого, при помощи имитационного моделирования можно протестировать новую систему ценообразования или методов стимулирования персонала, а также произвести оценку инвестиционных проектов [19].

Анализируя динамику популярности интернет запросов основных типов имитационного моделирования при помощи поисковой системы Google (рис. 2), можно сделать вывод, что наибо-

более популярным видом моделирования является системная динамика. На втором месте по популярности дискретно-событийное моделирование, а на последнем – агентное.

Для того чтобы компании оптимизировать бизнес-процессы при помощи имитационного моделирования, необходимо вначале понять, какой структурой должна обладать данная модель и какой инструментарий для этого требуется. Поскольку многие бизнес-процессы обладают определенными специфическими характеристиками, то для разных бизнес-процессов может потребоваться различный инструментарий имитационного моделирования. Представляется актуальным соотнесение бизнес-процессов промышленного производства и типов имитационного моделирования, при использовании которых можно создать наиболее приближенную к оригиналу модель нужной степени детализации. Несмотря на то, что при выборе разновидности имитационного моделирования необходимо полагаться на специфику анализируемого объекта и цели моделирования, возможно дать некоторые общие рекомендации. Так, на основе проведенного исследования была проведена классификация бизнес-процессов промышленного предприятия по типу наиболее подходящей методики имитационного моделирования (табл. 1).

**Таблица 1. Классификация бизнес-процессов промышленного предприятия по типу наиболее подходящей методики имитационного моделирования**  
**Table 1. Classification of business processes of an industrial enterprise by the type of the most suitable simulation methodology**

Тип имитационного моделирования		
Системная динамика	Дискретно-событийное моделирование	Агентное моделирование
Хранение		Сервис
Формирование спроса		Охрана
Финансы денежные потоки		Транспорт
Управление персоналом	Контроль качества	Уборка
Маркетинг	Процессы массового обслуживания	Персонал
Непрерывное производство	Сборка	Логистика
Послепродажное обслуживание	Дизайн	
Управление природными ресурсами	Исследования и разработки	
Аналитика	Дискретное производство	
	Документация	
Обслуживание оборудования		
Продажи		

*Составлено авторами по материалам исследования*

Данная классификация является приблизительной, так как для решения различных задач моделирования могут потребоваться инструменты разных типов моделирования, поэтому при выборе типа разрабатываемой модели следует, в первую очередь, ориентироваться на планируемый функционал и при необходимости совмещать в модели несколько видов моделирования. Например, создавая модель бизнес-процесса в системе массового обслуживания можно сочетать агентное и дискретно-событийное моделирование [21].

Одним из важных элементов цепочки создания стоимости является доставка продукции до покупателя [22], в условиях конкурентного рынка сроки доставки могут быть решающим показателем при выборе поставщика. Исходя из этого, представляется актуальным более детальное рассмотрение организации цепочки поставок промышленного предприятия.

Одним из инструментов картирования процессов являются геоинформационные системы (ГИС) (компьютерные системы, которые дают возможность эффективно взаимодействовать с

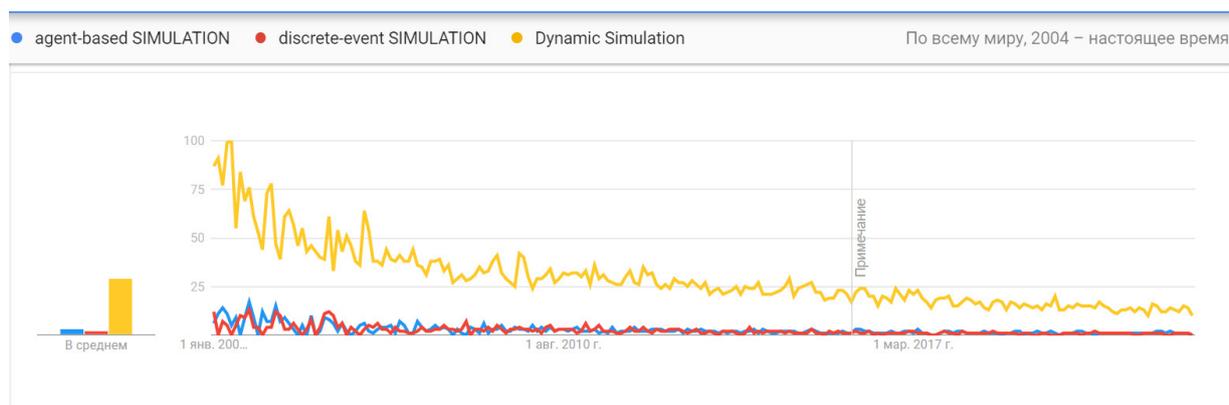


Рис. 2. Динамика популярности интернет запросов основных типов имитационного моделирования при помощи поисковой системы Google с 2004 по 2022 год [20]

Fig. 2. Popularity dynamics of Internet queries about main types of simulation modeling using the Google search engine from 2004 to 2022 [20]

пространственно-распределенной информацией [23]). Современные цифровые технологии позволяют использовать ГИС карты в процессе имитационного моделирования. Это дает возможность детально продумывать маршруты поставок, планировать затраты на топливо и время доставки груза.

Для того чтобы наглядно продемонстрировать возможности имитационного моделирования в сфере логистики, была поставлена задача — создать имитационную модель, при помощи которой возможно отследить, способны ли имеющиеся промышленные предприятия выполнять заказы по поставке продукции к клиентам в полном объеме.

При помощи программного продукта Anylogic была разработана имитационная модель промышленного предприятия, включающая в себя:

- 1) главный завод;
- 2) 2 филиала;
- 3) 15 ритейлеров;
- 4) транспортные средства.

Модель представляет собой систему поддержки принятия решений, поэтому пользователь имеет возможность самостоятельно задавать значения для ряда параметров:

- 1) количество грузовиков, имеющихся на основном предприятии и в филиалах.
- 2) количество продукции, которые производит завод и два его филиала за 12 часовую смену.
- 3) местонахождение филиалов.

Первые два вида параметров задаются пользователем целочисленными значениями в заданном промежутке. Последний параметр позволяет пользователю самостоятельно выбрать месторасположение филиала на карте. Для этого ему требуется ввести в текстовое поле название выбранного географического объекта, в таком формате как он именуется на ГИС картах. Интерфейс модели представлен на рис. 3.

Основываясь на целях моделирования, было принято решение использовать агентный тип моделирования как наиболее подходящий для имитации движения грузовиков. Структура основной среды модели в среде Anylogic представлена на рис. 4. В модели используются такие типы агентов: завод, филиал1, филиал 2, заказ, грузовики и клиенты. Также в модели присутствует 9 переменных и 8 параметров, задаваемых пользователем.

У типа агентов «Заказ» имеется два параметра: количество и клиент. Первый параметр равен количеству единиц заказанной продукции, а второй содержит информацию о том ритейлере, который сделал заказ.

## Логистика



Рис. 3. Интерфейс логистической модели<sup>2</sup>  
Fig. 3. Logistics model interface

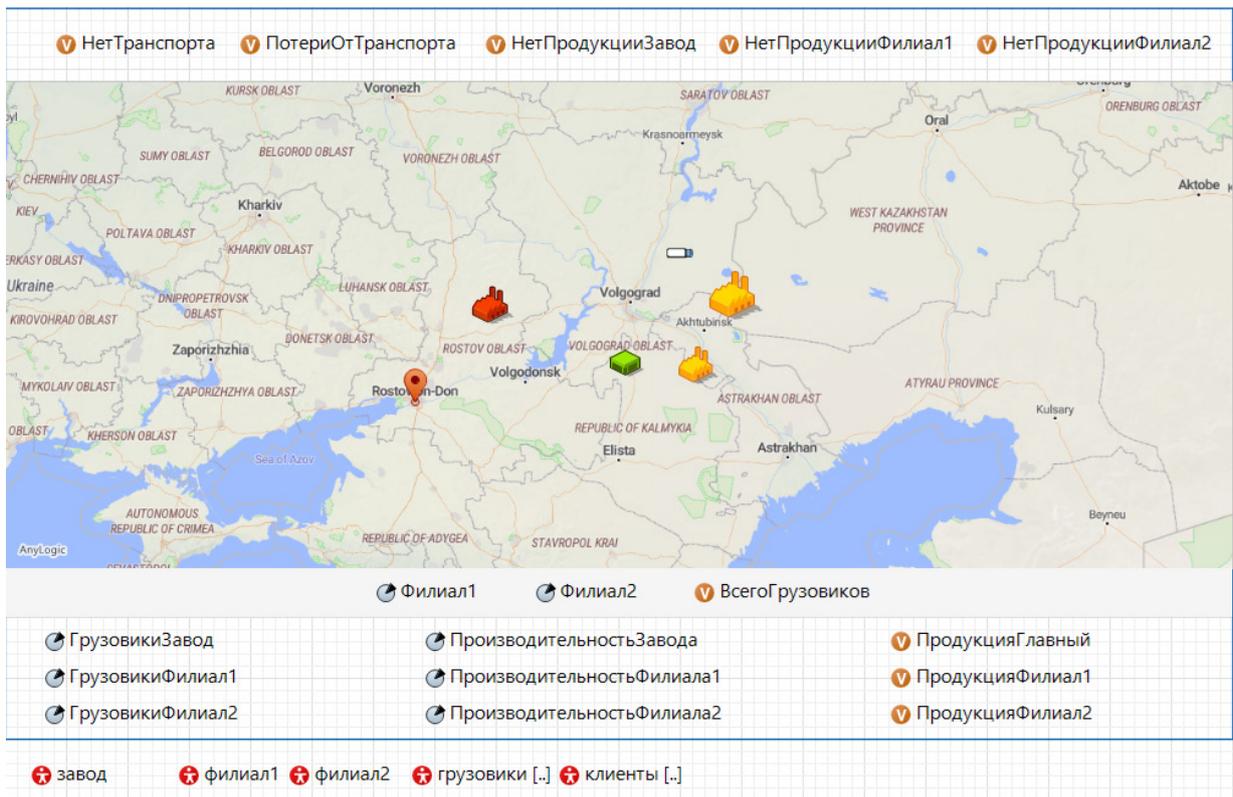


Рис. 4. Структура основной среды модели<sup>3</sup>  
Fig. 4. Structure of the main model environment

Тип агентов «Клиенты» содержит параметр location, который содержит расположение агента. Значения данного параметра загружаются из таблицы excel, которую конечный пользователь в дальнейшем может изменить. Также в структуре данного типа находится периодическое событие, которое раз в день генерирует каждому ретейлеру заявку на получение определенного количества продукции (данная величина генерируется случайно в диапазоне от 30 до 50 единиц) и отправляет



сообщение с заказом ближайшему свободному грузовику, находящемуся в гараже предприятия. Если свободных машин нет, то заказ не отправляется, а статистика по случаям невозможности принятия заказа из-за отсутствия транспорта увеличивается.

В структуре типов агента «Завод», «Филиал 1» и «Филиал 2» находится параметр при помощи регулярного события «Изготовление продукции», которое происходит каждые 12 часов в каждое на склад каждого предприятия поступает определенное количество товаров определяемая пользователями при помощи параметров, отвечающих за производительность. Для филиалов и завода используется аналогичный код.

В структуре типа «Грузовики» содержится 3 переменных: отказ, фирма, заказ. Для этого типа была составлена диаграмма состояний, отображенная на рис. 5.

В данной диаграмме отражены состояния, в которых могут прибывать агенты:

1. Начальная точка (создание). В данном элементе диаграммы генерируются и располагаются в соответствующей локации (организации) новые агенты. Распределение зависит от введенного пользователем количества транспортных средств на предприятии.

2. «На предприятии». В данном состоянии агент находится во время пребывания в гараже той организации, к которой он прикреплен. Когда происходит событие «Заявка на заказ», то ближайшему к клиенту, сделавшему заказ, грузовику приходит сообщение, содержащее информацию об объеме заказа и имени заказавшего. В случае, если на данном предприятии в наличии меньше продукции, чем заказали, то заказ отменяется, а переменная «нет продукции» соответствующей организации увеличивается на единицу, а переменной «отказ» присваивается значение 1 (начальное значение 0).

3. «Едет к клиенту». Агент, находящийся в данном состоянии, готов отправиться к клиенту, сделавшему заказ, однако, в случае если на складе недостаточно продукции, агент никуда не отправляется, а выполняется переход в предыдущее состояние «На предприятии». Обратный переход осуществляется, если переменная отказ равна единице. В процессе перехода в состояние «Разгрузка товара» осуществляется вычитание объема выполняемого заказа из запасов продукции, имеющейся в организации, к которой приписан грузовик. Для того, чтобы данный переход не сработал, если заказ не может быть выполнен, то вводится дополнительное условие, согласно которому переменная отказ должна быть равна 0.

4. «Разгрузка товара». Во время нахождения в этом состоянии агент находится на территории заказчика и происходит выгрузка товаров клиенту. Переход из этого состояния в состояние «Возвращение на базу» происходит через 2 часа. В процессе перехода агент направляется в организацию, к которой приписан.

5. «Возвращение на базу». В текущем состоянии грузовик возвращается на предприятие-владелец. Поскольку при достижении этого состояния агент уже находится в исходной локации, то автоматически срабатывает переход в состоянии на предприятии.

Во время запуска симуляции пользователь может видеть процесс перевозок на карте ГИС (во время проведения эксперимента масштаб карты можно изменять) и отслеживать изменения всех имеющихся переменных и параметров. Экран модели во время симуляции представлен на рис. 6.

В заключении можно сделать вывод, что разработанная логистическая модель выполняет поставленную задачу, позволяя отследить, способность предприятия и филиалов выполнять заказы по поставке продукции к клиентам в полном объеме.

В будущем данную модель можно развить следующим образом:

1. Добавить возможность для пользователя задавать вручную через интерфейс количество филиалов.

2. Добавить несколько видов транспортных средств и создать параметры, при помощи которых можно регулировать грузоподъемность каждого вида.

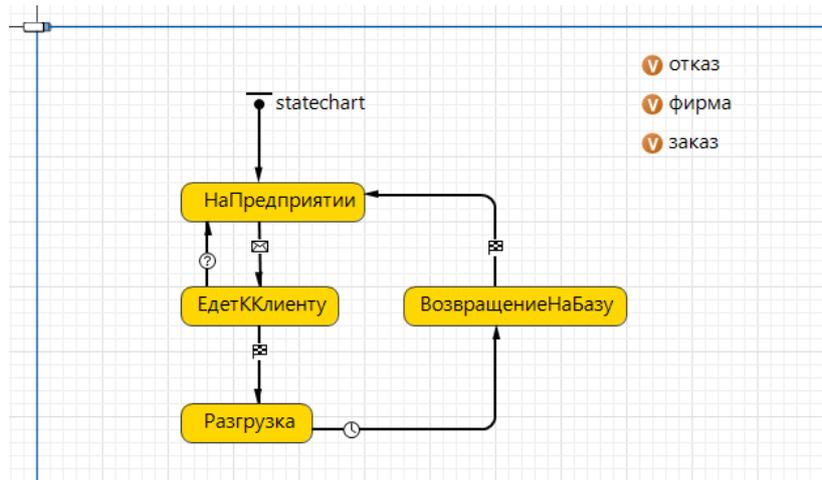


Рис. 5. Диаграмма состояния агентов типа «грузовики»<sup>4</sup>  
 Fig. 5. Status diagram of “truck” type agents

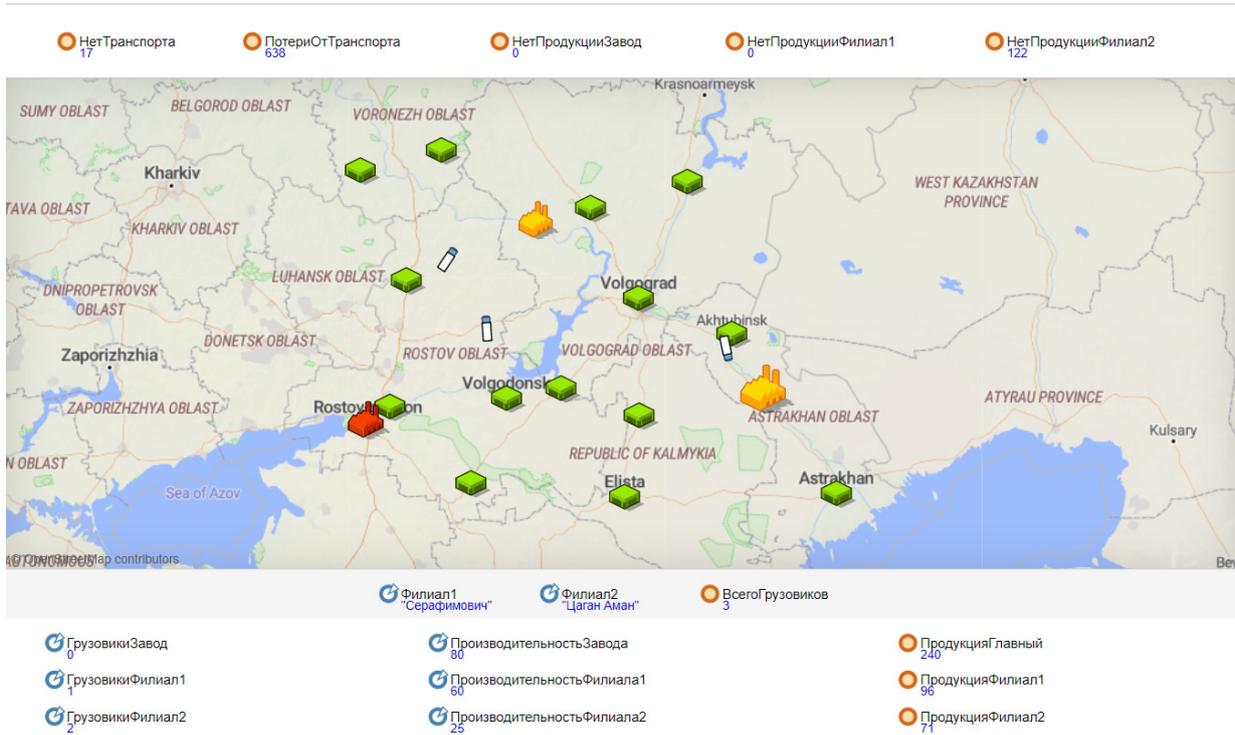


Рис. 6. Вид логистической модели во время осуществления симуляции<sup>5</sup>  
 Fig. 6. View of the logistic model during the simulation

3. Добавить журнал, в котором будут отображаться принятые и не принятые заказы.
4. Добавить параметр срочность для клиентов, который будет регулировать в какое время им необходимо получить заказ.
5. Добавить параметр, позволяющий пользователю самостоятельно устанавливать цену литра топлива и задавать его расход на 100 км для разных типов транспортных средств.



6. Добавить для основного завода и каждого филиала параметр, высчитывающий стоимость поездки и вывести на экран график, на котором расходы на поездку будут представлены в динамике.

Таким образом можно сделать вывод, что имитационное моделирование может быть весьма эффективным методом управления цепочками поставок, особенно при применении ГИС-технологий. Одним из преимуществ данной методики является то, что уже разработанную имитационную модель в дальнейшем, при появлении новых задач, можно модернизировать.

### **Заключение**

Сегодня во время четвертой промышленной революции, когда в процессе эволюционного развития изменяются способы взаимодействия с потребителями и каналы доставки продукции, промышленным компаниям, для того чтобы поддерживать конкурентоспособность, необходимо использовать инновационные бизнес-модели, основанные на комбинировании решений в области сервитизации, кастомизации и цифровизации [24]. Перспективной цифровой технологией, помогающей оптимизировать бизнес-процессы на производстве, является имитационное моделирование. Во время исследования специфики применения имитационного моделирования бизнес-процессов промышленных компаний в условиях Индустрии 4.0 были получены следующие результаты:

1. Анализ практики применения технологий моделирования в управлении промышленными компаниями показал, что область исследования использования имитационного моделирования для управления бизнес-процессами на настоящий момент недостаточно исследована. Имеющиеся публикации можно классифицировать как узкоспециализированные и универсальные.

2. Проведенное исследование позволило выявить преимущества и недостатки использования имитационного моделирования в контексте управления бизнес-процессами, а также сферы использования, в которых применение данного метода является предпочтительным с точки зрения рациональности и полноты полученных результатов – анализ взаимоотношений между социально-экономическими субъектами и контроль планово-производственных процессов. Специфической особенностью имитационных моделей является то, что они дают возможность достаточно точно формализовать причинно-следственные связи и зависимости в динамике моделируемых объектов, получать плановые решения, адекватные реальным процессам, учитывать многообразие конкретных условий производства.

3. Основываясь на анализе практики использования технологий имитационного моделирования в промышленности была создана классификация бизнес-процессов промышленного предприятия по типу наиболее подходящей методики имитационного моделирования. Данная классификация позволяет упростить процедуры выбора методики моделирования бизнес-процесса для получения нужной степени детализации. Предложенная классификация является обобщённой, поскольку выбор вида имитационного моделирования должен базироваться, в первую очередь, на задачах каждого конкретного исследования.

4. Была разработана имитационная модель цепочки поставок, которая позволяет отслеживать способность промышленных предприятий выполнять заказы по поставке продукции к клиентам в полном объеме, а также помогает подобрать наилучшее расположение для филиала или склада. Используемый в модели функционал геоинформационных систем позволяет не только наглядно отобразить процесс доставки продукции до потребителей, но и рассчитать транспортные расходы, так как транспортные средства в модели двигаются по маршруту, аналогичному реальному.

Таким образом, можно сделать вывод, что имитационное моделирование является эффективным средством решения сложных проблем, а также методикой управления бизнес-процессами промышленных предприятий в условиях Индустрии 4.0.

Теоретическую значимость представляют собой проведенная классификация бизнес-процессов промышленного предприятия по типу наиболее подходящей методики имитационного

моделирования. Полученные результаты можно использовать при проведении исследований, касающихся особенностей применения имитационного моделирования для управления бизнес-процессами различного типа. Также данные разработки могут быть применены для упрощения процесса выбора типа имитационного моделирования для решения различных организационно-управленческих задач. Отличительной особенностью является заложенная в модели возможность использования при моделировании потенциала сквозных технологий Индустрии 4.0.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная имитационная модель может быть адаптирована к специфике различных предприятий промышленного сектора экономики для оценки эффективности процесса поставок, а также подбора наиболее эффективного месторасположения филиалов и/или складов.

#### Направления дальнейших исследований

В будущем представляется актуальным проведение исследований в области использования передовых цифровых технологий (в том числе и технологии имитационного моделирования) для повышения устойчивости промышленных предприятий.

В дальнейшем перспективным направлением является включение в разработанную имитационную модель технологии искусственного интеллекта, поскольку подобные технологии дают возможность увеличить точность оперативно-технологического решения [25].

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Максимова Ю.М. (2016) Области оптимизации бизнес-процессов на российских предприятиях. *Актуальные вопросы экономических наук*, 48, 137–140.
2. Аль-Азази А.А., Масленников Б.И. (2014) Сравнительный анализ методов имитационного моделирования. *Науковедение*, 1 (20), 47–50.
3. Madhiarasan M. (2020) Accurate prediction of different forecast horizons wind speed using a recursive radial basis function neural network. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5, 22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41601-020-00166-8>
4. Wan Y. (2019) Optimal offering and operating strategies for wind-storage system participating in spot electricity markets with progressive stochastic-robust hybrid optimization model series. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 1–19.
5. Homan B. (2019) A realistic model for battery state of charge prediction in energy management simulation. *Energy*, 171, 205–217.
6. Johansson S. (2019) Investigation of the impact of large-scale integration of electric vehicles for a Swedish distribution network. *Energies*, 12 (24). DOI: 10.3390/en12244717
7. Wang Y. (2020) Ecosystem-based fisheries management in the Pearl River delta: Applying a computable general equilibrium model. *Marine Policy*, 112, 103784. DOI: 10.1016/j.marpol.2019.103784
8. Jiang H. (2020) System dynamics simulation model for flood management of the three gorges reservoir. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146 (7), 05020009. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001216
9. Hurmekoski E. (2020) Impact of structural changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 24 (4), 899–912. DOI: 10.1111/jiec.12981
10. Dimitriou N. (2020) A deep learning framework for simulation and defect prediction applied in microelectronics. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 100 (6), 102063. DOI: 10.1016/j.simpat.2019.102063
11. Khaembah E. N. (2021) Simulation of management strategies to mitigate nitrogen losses from crop rotations in southland, New Zealand. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101 (10), 4241–4249.
12. Dos Reis F.B. (2020) Synthetic residential load models for smart city energy management simulations. *IET Smart Grid*, 3 (3), 352–364.
13. Reis L.A. (2021) Traffic jam prediction using hazardous material transportation management simulation. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 16 (3), 256–269.



14. Ahmed S. (2020) RPSMDSM: Residential power scheduling and modelling for demand side management. *KSI Transactions on Internet and Information Systems*, 14 (6), 2398–2421
15. Schier S. (2019) Sparring partners for human-in-the-loop simulations: The potential of virtual agents in air traffic simulations. *CEAS Aeronautical Journal*, 10 (2), 553–564.
16. Gao M. (2020) Real-time visualization optimization management simulation of big data stream on industrial heritage cloud platform. *Complexity*, 2020, 8885191. DOI: 10.1155/2020/8885191
17. Gorgich M. (2019) A targeted study on simulation and optimization of shipping systems. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 16 (12), 5282–5286
18. Дедова Е.С. (2016) Оптимизация бизнес-процессов как условие обеспечения экономической безопасности предприятия. *Таврический научный обозреватель*, 2 (7), 48–50.
19. Асканова О.В., Касаткина Е. В. (2010) Значение имитационного моделирования в управлении деятельностью предприятия. *Среднерусский вестник общественных наук*, 3, 177–181.
20. *Google Trends* (2022) [online] Available at: <https://trends.google.ru/trends/explore?-date=all&q=agent-based%20SIMULATION,discrete-event%20SIMULATION,Dynamic%20Simulation> [Accessed 08.05.2022].
21. Долгова О.И., Крюков С.В. (2021) Имитационное моделирование бизнес-процессов сервисной поддержки продуктов эквайринга в программной среде Anylogic. *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки*, 6 (14), 117–133.
22. Портер М. (2005) *Конкурентное преимущество*, М.: Альпина Бизнес Букс.
23. Гусева А.В. (2013) *Геоинформационные системы*. ГИАБ, 5, 50–55.
24. Долгова О.И., Никитаева А.Ю. (2021) Инновации бизнес-моделей: цифровизация, сервисизация и кастомизация в деятельности промышленных компаний. *Дружеровский вестник*, 6 (44), 4–16.
25. Козлова О.Ю. (2022) Перспективы развития имитационного моделирования горно-шахтного производства. *Уголь*, 6 (1155), 41–43.

## REFERENCES

1. Maksimova Yu.M. (2016) Oblasti optimizatsii biznes-protsessov na rossiyskikh predpriyatiyakh. *Aktualnyye voprosy ekonomicheskikh nauk*, 48, 137–140.
2. Al-Azazi A.A., Maslennikov B.I. (2014) Sravnitelnyy analiz metodov imitatsionnogo modelirovaniya. *Naukovedeniye*, 1 (20), 47–50.
3. Madhiarasan M. (2020) Accurate prediction of different forecast horizons wind speed using a recursive radial basis function neural network. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 5, 22. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41601-020-00166-8>
4. Wan Y. (2019) Optimal offering and operating strategies for wind-storage system participating in spot electricity markets with progressive stochastic-robust hybrid optimization model series. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 1–19.
5. Homan B. (2019) A realistic model for battery state of charge prediction in energy management simulation. *Energy*, 171, 205–217.
6. Johansson S. (2019) Investigation of the impact of large-scale integration of electric vehicles for a Swedish distribution network. *Energies*, 12 (24). DOI: 10.3390/en12244717
7. Wang Y. (2020) Ecosystem-based fisheries management in the Pearl River delta: Applying a computable general equilibrium model. *Marine Policy*, 112, 103784. DOI: 10.1016/j.marpol.2019.103784
8. Jiang H. (2020) System dynamics simulation model for flood management of the three gorges reservoir. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146 (7), 05020009. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001216
9. Hurmekoski E. (2020) Impact of structural changes in wood-using industries on net carbon emissions in Finland. *Journal of Industrial Ecology*, 24 (4), 899–912. DOI: 10.1111/jiec.12981
10. Dimitriou N. (2020) A deep learning framework for simulation and defect prediction applied in microelectronics. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 100 (6), 102063. DOI: 10.1016/j.simpat.2019.102063

11. Khaembah E. N. (2021) Simulation of management strategies to mitigate nitrogen losses from crop rotations in southland, New Zealand. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101 (10), 4241–4249.
12. Dos Reis F.B. (2020) Synthetic residential load models for smart city energy management simulations. *IET Smart Grid*, 3 (3), 352–364.
13. Reis L.A. (2021) Traffic jam prediction using hazardous material transportation management simulation. *International Journal of Simulation and Process Modelling*, 16 (3), 256–269.
14. Ahmed S. (2020) RPSMDSM: Residential power scheduling and modelling for demand side management. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 14 (6), 2398–2421.
15. Schier S. (2019) Sparring partners for human-in-the-loop simulations: The potential of virtual agents in air traffic simulations. *CEAS Aeronautical Journal*, 10 (2), 553–564.
16. Gao M. (2020) Real-time visualization optimization management simulation of big data stream on industrial heritage cloud platform. *Complexity*, 2020, 8885191. DOI: 10.1155/2020/8885191
17. Gorgich M. (2019) A targeted study on simulation and optimization of shipping systems. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 16 (12), 5282–5286.
18. Dedova Ye.S. (2016) Optimizatsiya biznes-protssosov kak usloviye obespecheniya ekonomicheskoy bezopasnosti predpriyatiya. *Tavricheskiy nauchnyy obozrevatel*, 2 (7), 48–50.
19. Askanova O.V., Kasatkina Ye.V. (2010) Znachenije imitatsionnogo modelirovaniya v upravlenii deyatel'nostyu predpriyatiya. *Srednerusskiy vestnik obshchestvennykh nauk*, 3, 177–181.
20. *Google Trends* (2022) [online] Available at: <https://trends.google.ru/trends/explore?-date=all&q=agent-based%20SIMULATION,discrete-event%20SIMULATION,Dynamic%20Simulation> [Accessed 08.05.2022].
21. Dolgova O.I., Kryukov S.V. (2021) Imitatsionnoye modelirovaniye biznes-protssosov servisnoy podderzhki produktov ekvayringa v programmnoy srede Anylogic. Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti *Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Ekonomicheskiye nauki*, 6 (14), 117–133.
22. Porter M. (2005) *Konkurentnoye preimushchestvo*, M.: Alpina Biznes Buks.
23. Guseva A.V. (2013) *Geoinformatsionnyye sistemy*. GIAB, 5, 50–55.
24. Dolgova O.I., Nikitayeva A.Yu. (2021) Innovatsii biznes-modeley: tsifrovizatsiya, servitizatsiya i kastomizatsiya v deyatel'nosti promyshlennykh kompaniy. *Drukerovskiy vestnik*, 6 (44), 4–16.
25. Kozlova O.Yu. (2022) Perspektivy razvitiya imitatsionnogo modelirovaniya gorno-shakhtnogo proizvodstva. *Ugol*, 6 (1155), 41–43.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

**ДОЛГОВА Ольга Игоревна**

E-mail: oldolgova@sfedu.ru

**Olga I. DOLGOVA**

E-mail: oldolgova@sfedu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2684-2295>

**НИКИТАЕВА Анастасия Юрьевна**

E-mail: aunikitaeva@sfedu.ru

**Anastasia Yu. NIKITAEVA**

E-mail: aunikitaeva@sfedu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0406-7440>

*Поступила: 08.06.2023; Одобрена: 05.07.2023; Принята: 06.07.2023.*

*Submitted: 08.06.2023; Approved: 05.07.2023; Accepted: 06.07.2023.*