

Научная статья

УДК 378.4

JEL I25, L6

DOI 10.25205/2542-0429-2024-24-1-114-136

Перспективы применения имитационного моделирования для управления студенческим предпринимательством в университете

**Татьяна Юрьевна Красикова¹
Александр Васильевич Петров²
Елизавета Ильинична Слободняк³**

¹⁻²Иркутский национальный исследовательский технический университет
Иркутск, Россия

³Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

¹krasikovaty@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8609-7952>

²petrov@istu.edu

³elizaveta.slobodnyak@yandex.ru

Аннотация

Актуальность темы исследования обусловлена выбором и применением методов исследования для процесса принятия решений в университетской среде. Уровень сложности объектов управления растет в связи с повышением уровня турбулентности бизнес-среды. Университеты не являются исключением, исходя из их проходящей трансформации и процесса становления полноценным игроком рыночной экономики. Применение имитационного моделирования является перспективной темой и заслуживает внимания при принятии управленческих решений в сфере высшего образования. Цель исследования – представить и продемонстрировать возможности применения инструмента имитационного моделирования для управления университетскими процессами. Гипотеза исследования: несмотря на то что имитационное моделирование становится все более популярным методом прогнозирования в социальных системах, в сфере университетского управления оно практически не применяется. Развитие применения данного метода существенно улучшает прогнозирование процессов для университетского управления. В работе представлена модель студенческого предпринимательства ИРНТУ (г. Иркутск), построенная при помощи AnyLogic и продемонстрирована ее работа с точки зрения поведения модели в обычных условиях и условиях стимулирования отдельного конкурса (программа «Умник» (организатор – ФСИ), программа «СТАРТ» (организатор – ФСИ) и программа «Стартап» (организатор – ФСИ в рамках Федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства»)). Из программного обеспечения была выбрана и применена программа AnyLogic (Россия). Группой исследователей была выбрана дискретно-событийная модель для удобства сбора статистики

© Красикова Т. Ю., Петров А. В., Слободняк Е. И., 2024

и выбора победителя. В результате был сделан вывод: модель способна предсказать наиболее вероятный исход заложенных действий или интереса за более короткий срок по сравнению с другими инструментами прогнозирования. Теоретическая значимость работы состоит в расширении перечня исследуемых вопросов для применения имитационного моделирования в сфере высшего образования. Практическая значимость состоит в применении результатов для оценки эффективности студенческого предпринимательства и будет интересна как администрации вузов, так и исследователям высшего образования.

Ключевые слова

цифровой двойник, имитационное моделирование, студенческое предпринимательство, AnyLogic, региональный университет

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность Ирине Александровне Бянкиной, начальнику управления по молодежной политике ИрННТУ, за ее неоценимую помощь и содействие в проведении исследований.

Для цитирования

Красикова Т. Ю., Петров А. В., Слободняк Е. И. Перспективы применения имитационного моделирования для управления студенческим предпринимательством в университете // Мир экономики и управления. 2024. Т. 24, № 1. С. 114–136. DOI 10.25205/2542-0429-2024-24-1-114-136

Prospects for the use of Simulation Modeling for Managing Student Entrepreneurship at the University

Tatyana Yu. Krasikova¹, Alexander V. Petrov²,
Elizaveta I. Slobodnyak³

¹⁻²Irkutsk National Research Technical University
Irkutsk, Russian Federation

³Novosibirsk State University, Novosibirsk

¹krasikovaty@istu.edu, <https://orcid.org/0000-0002-8609-7952>

²petrov@istu.edu

³elizaveta.slobodnyak@yandex.ru

Abstract

The relevance of the article is in the choice and application of research methods for the decision-making process in a university. The level of complexity of management objects is growing due to the increasing level of business turbulence. Universities are no exception, based on their ongoing transformation and the process of becoming a player in the market economy. The use of simulation modeling is a promising topic and deserves more attention. The purpose of the study is to present and demonstrate the possibilities of using a simulation tool to manage university processes. Research hypothesis: despite the fact that simulation modeling is becoming an increasingly popular method of forecasting in social systems, it is not used in the field of university management. The paper presents a model of student entrepreneurship at IRNRTU (Irkutsk), built with the help of AnyLogic. It demonstrates its work from the point of view of the behavior of the model under normal conditions and conditions of stimulating a separate competition (Program “Umnik” (Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises), Program “START” (Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises) and the “Startup” program (Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises with the Federal project “University Technological Entrepreneurship Platform”). As the software, the AnyLogic program (Russia) was selected and applied. The group of researchers selected a discrete-event model for ease of collection statistics and selection of the winner. As a result, it was concluded that the model is able to predict the most likely outcome of the underlying actions or interests in a shorter period of time compared to other forecasting tools. The theoretical significance of the work is in expanding the list of issues under study for the use of simulation

modeling in higher education. The practical significance is in the application of the results to assess the effectiveness of student entrepreneurship and it might be of interest to both university administrations and higher education researchers.

Keywords

digital twin, simulation modeling, student entrepreneurship, AnyLogic, regional university

Aknowlegement

The authors are grateful to Irina Aleksandrovna Byankina, head of the youth policy department of IrNR-TU, for her invaluable help and assistance when conducting the study.

For citation

Krasikova T. Yu., Petrov A. V., Slobodnyak E. I. Prospects for the use of simulation modeling for managing student entrepreneurship at the university. *World of Economics and Management*, 2024, vol. 24, no. 1, pp. 114–136. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2024-24-1-114-136

Введение

Управленческие решения в настоящий момент принимаются в условиях экономической нестабильности, а зачастую и неопределенности. Исследования университетов в настоящее время основаны на анализе текущего состояния этого, несомненно, сложного объекта и прогнозированием их будущих состояний.

Университет, по нашему мнению, представляет собой не просто систему, а сложную систему. Это совокупность элементов (факультетов, институтов, департаментов, отделов, подразделений, кадрового состава, различных неформальных и формальных сообществ (студенческие сообщества, выпускники, различные категории стейкхолдеров и прочее), которые влияют на развитие этой системы и определяют характеристики системы. Все изложенное целиком и полностью, по нашему мнению, отвечает принципам построения сложной системы, а именно: принципу *целостности* (для системы первичным является признак целостности, т. е. она рассматривается как единое целое, состоящее из взаимодействующих частей, часто разнокачественных, но одновременно совместимых [1] (примером может служить наличие в университете формальных подразделений типа кафедр и неформальных структур типа научных школ); принципу *взаимосвязи и взаимозависимости элементов системы*; принципу *взаимосвязи с окружающей средой* и отсюда – принципу *адаптации сложной системы* [2]. Ярким подтверждением нашего подхода к университету как к сложной системе является следование принципу *иерархичности* (каждая система состоит из подсистем, подсистемы, в свою очередь, также состоят из подсистем). И, наконец, принцип *целенаправленности* (у всякой системы есть цель) является актуальным принципом для эффективной деятельности университета [1–3].

При применении различных методов принятия решений в университете особое внимание необходимо уделить реализации принципов системности. К важнейшим принципам относятся:

– рассмотрение университета как особой самоорганизующейся системы с внутрисистемной организацией управления целевого начала, которая взаимодействует с другими системами в рамках национальной и региональной экономики и служит комплексному решению проблем экономики (в том числе и региональной);

– внедрение многовариантного проектирования системы, анализ и выбор альтернативных решений и контроль за реализацией принятого решения.

Отсюда, принимая во внимание довольно сложный подход к выбору методов управления университетскими решениями, необходим выбор такого метода, который максимально отвечает современным подходам оценки и прогнозирования при принятии управленческих решений.

Имитационное моделирование как метод исследования университетских решений Актуальным становится вопрос выбора и применения методов исследования. Развитие информационных технологий расширяет перечень подходов и методов исследования социально-экономических систем, в частности сферы высшего образования. Уровень сложности объектов управления растет в связи с повышением уровня турбулентности бизнес-среды. Университеты не являются исключением, исходя из их проходящей трансформации и процесса становления полноценным игроком рыночной экономики.

Метод имитационного моделирования сейчас начинает становиться одним из популярных инструментов, позволяющих моделировать социально-экономические отношения. Особенности его применения в том, что метод позволяет смоделировать практически любой процесс. При этом максимально учитывается реальное время выстраиваемой модели, что решает вопрос о «натурных» испытаниях, которые часто становятся необходимыми при верификации стандартных математических моделей.

По нашему мнению, применение имитационного моделирования (и его более продвинутой формы – цифрового двойника) в вопросах принятия решения в университетском управлении является темой перспективной и заслуживает внимания при принятии управленческих решений в сфере высшего образования.

Его применение не является вопросом новым, как мы и покажем в разделе «Литературный обзор». В вопросах университетского управления, когда мы предлагаем рассматривать университет с позиции теории сложных систем, его применение во многом может изменить системный подход для анализа состояния университета как системы. Набор факторов, влияющих на университет, – обширен. Зачастую принятие решений в университетской среде отвергает рисковые внесения изменений в имеющуюся инфраструктуру либо сильно затягивает вопрос таких изменений – это несет большие риски и издержки, исходя из нагрузки на имеющиеся специфические ресурсы (а основной ресурс университета – это человеческие ресурсы). Моделирование в данном случае является одним из способов решения практических задач. При моделировании мы более тщательно исследуем структуру объекта, начинаем понимать специфику поведения системы, и самое важное – в режиме онлайн анализируем разные сценарии и выбираем наиболее оптимальные для нас, исключая ресурсоемкие «натурные» испытания.

Все вышеизложенное свидетельствует в пользу более частого использования инструмента имитационного моделирования для исследований университетской системы.

Постановка исследовательской проблемы состоит в получении ответа на вопрос: «Насколько эффективно применение имитационного моделирования для принятия решений в сфере университетского управления?».

Цель исследования – применить метод имитационного моделирования в университетском управлении процесса принятия решений на примере исследования эффективности модели студенческого предпринимательства ИРНТУ (г. Иркутск).

Гипотеза исследования состоит в том, что, несмотря на то что имитационное моделирование становится все более популярным методом прогнозирования в социальных системах, в сфере высшего образования и университетском управлении он практически не применяется. Развитие применения данного метода существенно обогащает и улучшает прогнозирование процессов для университетского управления.

Структура исследования. Представляемая работа состоит из введения, где изложены краткие рассуждения о применимости теорий сложных систем к университету и актуальности применения имитационного моделирования в сфере принятия университетских решений, обзора литературы, описания методики исследования, результатов исследования, раздела обсуждения, где, в частности, описаны ограничения по применению имитационного моделирования в представляемом исследовании и заключения, где изложены теоретическое и практическое значение полученных данных.

1. Литературный обзор

Основной массив литературы, посвященной имитационному моделированию, посвящен в основном вопросам технической валидации имитационного моделирования. Фокус нашей работы с литературой был направлен больше в сторону изучения литературы, посвященной вопросам применения имитационного моделирования в социальных сферах, и особенно – в сфере высшего образования.

Обзор литературы хотелось бы начать с работ основоположников применения методов имитационного моделирования. Ранние работы принадлежат первооткрывателю, основателю метода, J. W. Forrester, который в своей работе 1958 г. [4] впервые описал применение метода. Идея принципиального отличия имитационного моделирования от представленных ранее методов принадлежит Longstaff [5] и George-Marios Angeletos et al. [6]. В упоминаемых работах авторы включают в имитационную модель очень важный аспект потребительского поведения. По нашему мнению, именно с этих работ началось понимание многозадачности применения имитационного моделирования, его перспективности в направлении прогнозирования социальных систем и процессов.

В работе А. Масал от 2010 г. [7] содержится обобщение информации об агентно-ориентированном моделировании. Данная работа важна для изучения социальных систем, так как в основном здесь используется именно агентно-ориентированное моделирование. Хотя, как мы покажем в своем исследовании, дискретное моделирование также является перспективным направлением для социальных систем и процессов.

Авторы данной работы также уделили внимание анализам работ исследователей, которые посвятили свои исследования конкретным примерам применения имитационного моделирования. Среди отечественных работ необходимо отме-

тить, например, работу Г. Боуша [8], посвятившую свои работы моделированию кластерной политики в региональной экономической системе, что является действительно огромным вкладом в развитие практического применения имитационного моделирования в социальных системах.

С. С. Красных в работе [2] представляет эволюцию развития методов имитационного моделирования, анализирует теоретическую сущность имитационных агентно-ориентированных моделей, моделирующих социально-экономические процессы в территориальных системах. Эта работа полезна с точки зрения понимания расширения горизонтов применения имитационного моделирования, в том числе в сторону социальных систем. Работа содержит примеры и анализ проведенного моделирования экономических систем (модель демографической России, Вологодской области, демографического Санкт-Петербурга), в ней делается вывод об эффективности применения именно агентных моделей для имитационного моделирования.

С. И. Паринов в своем исследовании «Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем» [9] приводит примеры использования отечественного ПО AnyLogic. Эта работа является прекрасным примером методического сопровождения применяемого пакета AnyLogic. Важность работы в том, что AnyLogic является качественным ПО отечественной разработки, что немаловажно в существующих условиях. В настоящей работе основой для применения имитационного моделирования является AnyLogic, что, опять же, существенно обогащает горизонты практического применения имитационного метода в отечественной сфере.

Н. Н. Лычкина в своей работе [10] указывает на влияние новых экономических условий и смены экономических парадигм на изменение подходов к применению моделирования – развитие системной динамики, многоагентного имитационного моделирования и пр. Работа также имеет глубоко проработанный теоретический характер.

М. М. Низамутдинов и В. В. Орешников в своей работе «Моделирование адаптивных свойств поведения участников социально-экономических процессов» рассматривают вопросы моделирования социально-экономических систем регионального уровня на примере применения агентного подхода, базирующегося на учете особенностей и определенной автономности поведения взаимодействующих агентов [11]. Здесь мы опять имеем дело с агентским моделированием, причем авторы признают ограниченность модели, а именно наличие фактов искажения информации (либо ее неполнота) при принятии решений у агентов (т. н. «когнитивные искажения», являющиеся важным ограничением для построения агентно-ориентированных моделей и адекватной верификации модели).

С. П. Бобков, И. А. Астраханцева, Е. А. Павлова в своей работе уделили внимание вопросам использования современных подходов к исследованию и оптимизации работы государственных органов с обращениями населения на примере моделирования бизнес-процесса с применением современных методик [12]. Здесь опять демонстрируется применение ПО AnyLogic, исследование интересно тем, что в модель были включены внешние факторы воздействия на поведение агентов. Б. И. Клебанов, А. А. Вакушин, Ю. М. Тен исследуют необходимые требо-

вания к средствам создания имитационных моделей развития социума, выбору и разработке с помощью пакета AnyDynamics информационных компонент базового уровня, являющегося основой для создания моделей развития общества [13]. Работа интересна тем, что исследуются две группы агентов социума – альтруисты и эгоисты, причем в модель включены параметры, характеризующие физические и умственные способности агентов, их характеров и отношений друг с другом, для прогнозирования развития общества. Важность исследования в том, что обычно при моделировании развития городских образований прогнозируется поведение инфраструктурных динамических систем (транспорт, энергетика), однако слабо учитывается специфика населения (способность и особенности коммуникации, отношения друг с другом). Работа дает представление, что посредством имитационного моделирования можно охватить и эту лауну в исследовании и прогнозировании.

В работе А. Р. Горбунова, Н. Н. Лычкиной [14] высказывается предположение и доказывается (и мы с ними согласны), что имитационное моделирование – это не часть системного анализа, а подход, вышедший на уровень управленческой доктрины. Они исследуют имитационное моделирование в той аспектной сфере, которая связана с человеческим мышлением и пониманием. Они соотносят фазы имитационного моделирования с подходами стратегического управления и представляют разработанную методологию применения имитационного моделирования в стратегическом управлении.

Что касается применения имитационного моделирования в сфере высшего образования, то здесь картина следующая. М. И. Грачев и др. исследовали функциональную модель системы управления вузом, отражающую основные, обобщенные функции управления [15]. Построение имитационной модели было произведено в системе имитационного моделирования AnyLogic с использованием стандартных визуальных компонентов. С целью отражения отдельных компонентов (объектов) функциональной модели был использован агентный подход к моделированию. Работа опять примечательна тем, что представляет построенную адекватную модель, которая показывает эффективность настоящих процессов в вузе и позволяет менять входные параметры для прогнозирования процессов в вузе.

Д. А. Гайнанов и др. [16] исследовали поведение абитуриента в отдельном регионе. Они построили модель на примере Республики Башкортостан и наблюдали за поведением абитуриента, меняя тот либо иной параметр для принятия его решений (балл ЕГЭ, престиж выбираемой специальности и прочее). Работа интересна и важна тем, что подобный подход дает возможность оценить государственную политику в отношении региональных образовательных стратегий, спрогнозировать ее в наиболее благоприятное направление развитие регионов.

Фактически это немногие работы отечественных исследователей, которые посвящены применению имитационного моделирования в вузовской среде.

Что касается обзора массива зарубежных исследователей, уделяющих внимание практическому применению метода, то большой массив информации, разумеется, опять же посвящен техническим вопросам верификации и валидации имитационного моделирования. Часть литературы уделяет внимание имитацион-

ному моделированию в Arena (популярное ПО, разработанное компанией Systems Modeling Corporation), например Kelton et al. [17]. Однако хочется отметить еще раз – для наших исследований нам более интересно применение и использование отечественного ПО, например AnyLogic.

Конкретно для нашего исследования мы рассматривали работы, связанные с применением имитационного моделирования в социальных системах. Исследованиям применения имитационного моделирования в социальных системах посвящены такие работы, как J. Richard Harrison et al. “Simulation modeling in organizational and management research” [18], в которых уделяется внимание вопросам применения имитационного моделирования в менеджменте. Есть описания построения контрактных моделей в здравоохранении, пожалуй, самом популярном приложении инструмента имитационного моделирования в общественном секторе. К таким исследованиям можно отнести работу M. Gunal [19]. Также к этому массиву можно отнести и исследование авторов B. Mielczarek, J. Uziółko-Mydlikowska [20]. Целью этой статьи является представление примеров компьютерных симуляционных моделей, которые поддерживают процессы принятия решений в секторе здравоохранения. Работа скорее представляет собой презентацию более полной картины применения всех видов имитационного моделирования в системе здравоохранения. Система здравоохранения для развития имитационного моделирования является флагманской сферой применения – именно с нее началось применение обсуждаемого метода в социальной сфере. Дело в том, что сама поставленная задача для этой сферы – оптимизация процессов – как нельзя лучше подходит для применения метода имитационного моделирования, в отличие от стандартного математического моделирования, ввиду динамичности прогнозируемых процессов и сложности их реализации.

Часть работ уделяют внимание видам применяемого имитационного моделирования. Например, работа A. Ford and P. Gardiner [21] посвящена важному вопросу чувствительности при построении динамического двойника сложных социальных систем. Дело в том, что проверка чувствительности модели – это одно из базовых условий прохождения верификации модели, а следовательно, ее адекватности. Поэтому данная работа важна для тех, кто разрабатывает и внедряет модели процессов в социальных системах, так как речь идет о принятии решения человека в определенной ситуации, о прогнозировании его экономического поведения.

Агентно-ориентированные модели также представляют огромный интерес для исследователей, исходя из возможности объяснения социальных паттернов через агентский подход. К ним обращались в своих исследованиях J. Epstein [22], а также A. López-Paredes et al. [23]. Стратегия поведения агента обусловлена целым набором факторов. И важно, если мы пытаемся моделировать социальные процессы (в центре которых стоит человек и его специфика экономического выбора), понимать, как мы хотим спрогнозировать процесс. Социальный паттерн влияет на последовательность действий, поэтому подобные работы очень важны для адекватного построения моделей.

Здесь же хотелось бы отметить очень интересное и важное исследование J. Morecroft [24]. Оно посвящено очень важному вопросу – как возможно избе-

жать когнитивных ограничений, исходя из ограниченной рациональной политики модели. Не секрет, что при принятии решений агент часто может испытывать так называемые «когнитивные искажения» (например, ограниченно рациональное поведение агента), что, в свою очередь, может привести к искажению «прогоняемых» сценариев.

Из работ, посвященных применению метода в сфере высшего образования, среди зарубежных работ необходимо отметить работу X. Gu и K. Blackmore [25]. Работа имеет глубоко проработанный теоретический характер и дает полное понимание картины применения агентного подхода в сферы высшего образования. Авторы провели систематический обзор литературы для анализа публикаций по годам, роли симулятора, стадии разработки моделей и любой связанной с этим проверки. Работа имеет большое значение для понимания степени разработанности тематики в западных работах. J. Caraquil et al. [26] посвятили исследование вопросам моделирования текучести академических кадров и их причинам. Важность этого исследования в том, что они попытались, через применение демографических факторов, предсказать поведение того или иного представителя академической профессии для лучшего применения результатов в кадровой политике. Так или иначе, в зарубежной литературе встречаются работы, посвященные применению имитационного моделирования в высшем образовании, однако эта тема только набирает популярность.

В целом необходимо отметить, что судя по представленному анализу имеющейся литературы, имитационное моделирование все чаще и чаще применяется при исследованиях социальных систем, причем, что весьма важно, метод постоянно исследуется с точки зрения повышения чувствительности моделирования исходя из социальной направленности объектов исследования.

Однако, что касается вопросов университетского управления, нами было обнаружено лишь очень немногочисленное количество ключевых работ, что мы и показали в обзоре литературы (особенно отечественных исследователей). Таким образом, представляемая нами работа вносит существенный вклад в существующую палитру исследований по данной тематике. Она представляет важный вклад в вопросы исследования перспектив применения метода имитационного моделирования в социальных системах, и особенно для университетских решений.

2. Методология исследования

2.1. Данные, источники данных

В качестве объекта применения имитационного моделирования была выбрана модель студенческого предпринимательства в Иркутском политехническом университете (ИРНИТУ, г. Иркутск). Данное исследование является частью продолжающихся исследований студенческого предпринимательства в данном университете (см. работы Т. Ю. Красиковой, А. П. Киреенко [27]).

При содействии руководства департамента молодежной политики была изучена схема участия студента в трех базовых программах, относящихся к циклу: программа «Умник» (организатор – ФСИ), программа «СТАРТ» (организатор –

ФСИ) и программа «Стартап» (организатор – ФСИ в рамках Федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства»).

Вся информация об особенностях принятия решений в условиях реализации студенческого предпринимательства в ИРНИТУ была предоставлена руководством департамента молодежной политики ИРНИТУ (г. Иркутск).

Информация о статистических данных результатов студенческого предпринимательства за прошлый период была предоставлена руководством департамента молодежной политики ИРНИТУ (г. Иркутск).

Из программного обеспечения была выбрана и применена программа AnyLogic (Россия).

2.2. Процесс построения модели

Группой исследователей была выбрана дискретно-событийная модель для удобства сбора статистики и выбора победителя, так как в процессе исследования было сделано предположение, что участники конкурса не взаимодействуют друг с другом так, чтобы менять поведение в зависимости от реакции остальных.

При этом состояния агентной модели при перестроении модели превратились в события для дискретно-событийной. Были выделены такие события (блоки Delay в модели):

- 1) участие в одном из трех конкурсов;
- 2) победа или проигрыш в конкурсе.

Также каждым участником принимались решения:

- 1) выбор конкретного конкурса.
- 2) попытка участия в другом конкурсе.

Вероятности принятия того или иного решения (сам выбор представлен блоком SelectOutput) были записаны в переменные:

- $p_{\text{Название}}$ (по умолчанию $1/3$) – это вероятность выбора конкретного конкурса (достаточно всего двух, так как третий легко находится через разность единицы и первых двух вероятностей);
- $p_{W\text{Название}}$ (по умолчанию $0,1$) – вероятность победить в конкретном конкурсе. Текущие свойства модели не позволяют допустить победу двух участников;
- $p_{\text{repeatНазвание}}$ (по умолчанию $0,5$) – вероятность участия в следующем конкурсе после выбранного. При демонстрации влияния стимулирования на конкурс «Умник» этот показатель изменен на $0,8$.

Агенты в модель выпускаются группами по 10 человек раз в месяц (согласно прогнозным данным руководства департамента молодежной политики университета).

Число участников и победителей фиксировались в переменных НазваниеP и НазваниеW . На основе собранных данных построены диаграммы и выведена текстовая информация о сумме выигрыша.

Были построены и запущены для наблюдения и фиксации результатов:

1. Модель студенческого предпринимательства в обычных условиях (равные условия стимулирования программ) (разд. 3.1).
2. Модель, в которой стимулировалась программа «Умник» (разд. 3.2).

Результаты и выводы представлены в следующих разделах статьи.

2.3. Верификация модели

Полученные результаты модели были проверены через сопоставление статистических данных за 2022 г. через применение пакета Excel (при помощи Т-теста для парных выборок).

3. Результаты

3.1. Исследование модели студенческого предпринимательства в обычных условиях (равные условия стимулирования программ).

В основу построения модели в ПО AnyLogic была взята модель студенческого предпринимательства в ИРНИТУ (рис. 1).

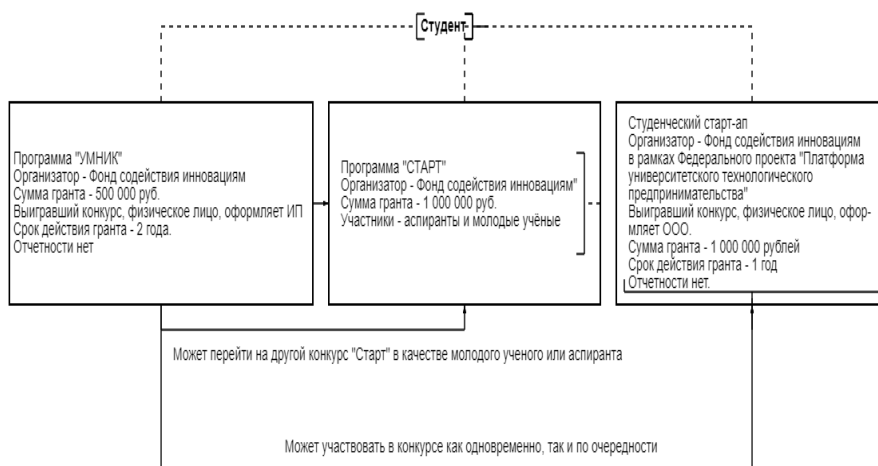


Рис. 1. Модель студенческого предпринимательства ИРНИТУ (г. Иркутск)

Fig. 1. Student entrepreneurship model for IrNRTU (Irkutsk)

Представлены три программы: программа «УМНИК» (организатор – Фонд содействия инновациям), программа «СТАРТ» (организатор – Фонд содействия инновациям) и программа «Студенческий стартап» (организатор – Фонд содействия инновациям в рамках Федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства»).

Краткие условия участия в каждой программе отражены на рис. 1. Согласно ему, грант по программе «Умник» составляет 500 000 рублей. Срок действия гранта – 2 года. Сумма гранта по программе «Старт» – 1 000 000 рублей. Сумма гранта по программе «Студенческий стартап» – 1 000 000 рублей. Срок действия – 1 год.

Также на рисунке схематично отражены возможные действия студента (переход в ту или иную программу)

Для работы по созданию и запуску модели имитационного моделирования студенческого предпринимательства ИРНИТУ (далее – ИМ СП ИРНИТУ) была выбрана ПО AnyLogic (Россия), как показано на рис. 2.

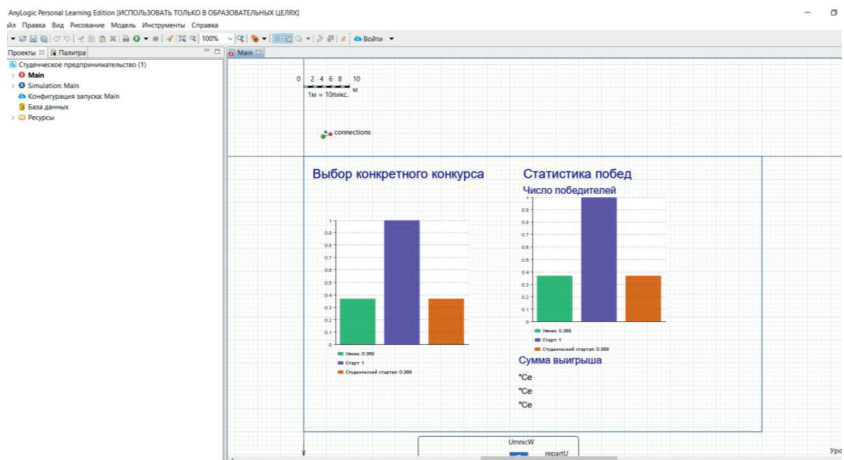


Рис. 2. Интерфейс построенной модели в AnyLogic
Fig. 2. Interface of the constructed model in AnyLogic

При запуске при всех равных условиях для всех конкурсов (период соответствует месяцу) в лидерах находятся «Студенческий стартап» и «Старт» (рис. 3), что подтверждается прошлым опытом реальной модели студенческого предпринимательства ИРНИТУ (практика управления студенческим предпринимательством в ИРНИТУ направлена на активизацию конкурсов через активизацию программы «Студенческий стартап»).

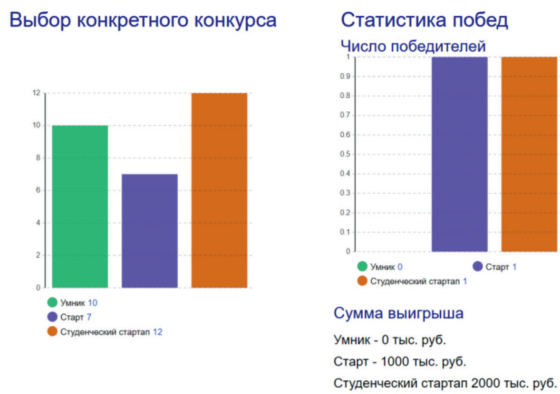


Рис. 3. Данные модели за период, приравненный к месяцу
Fig. 3. Model data for a period equivalent to a month

Затем, при лидирующем положении «Студенческого стартапа», программа «Умник» показывает результаты (при периоде, равном двум месяцам) (рис. 4).



Рис. 4. Данные модели за период, приравненный к двум месяцам работы модели
 Fig. 4. Model data for a period equivalent to 2 month

И при периоде, равном 6–8 месяцев, программы «Умник» и «Старт» уравнили свои позиции, при этом «Студенческий стартап» находится в лидерах по количеству выбора и статистике побед (рис. 5).



Рис. 5. Данные модели за 6–8 месяцев
 Fig. 5. Model data for a period equivalent to 6–8 month

При изучении прошлого опыта модели в реальном времени мы можем отметить, что построенная модель в целом отражает прошлый опыт организации студенческого предпринимательства ИРНИТУ.

На данном этапе времени была собрана статистика по количеству участников в проектах за 2022 г. (табл. 1).

Таблица 1

Статистика по программам для проверки адекватности построенной модели

Table 1

Statistics data on programs to check the adequacy of the constructed model

Программа	2022 (выбор конкретного конкурса)	Показатели по модели имитационного моделирования (выбор конкретного конкурса)
«Умник»	25	58
«Студенческий стартап»	18	63
«Старт»	3	23

Проверка адекватности построенной модели студенческого предпринимательства была проведена при помощи *t*-теста для парных выборок.

Таблица 2

Результаты проверки адекватности построенной модели при помощи *t*-теста для средних

Table 2

Results of checking the adequacy of the constructed model using a T-test for means

Парный двухвыборочный <i>t</i> -тест для средних		
	Переменная 1	Переменная 2
Среднее	14,33333333	48
Дисперсия	166,3333333	475
Наблюдения	3	3
Корреляция Пирсона	0,924989702	
Гипотетическая разность средних	0	
<i>df</i>	2	
<i>t</i> -статистика	-5,293838425	
<i>P</i> (<i>T</i> ≤ <i>t</i>) одностороннее	0,016939902	
<i>t</i> критическое одностороннее	2,91998558	
<i>P</i> (<i>T</i> ≤ <i>t</i>) двухстороннее	0,033879804	
<i>t</i> критическое двухстороннее	4,30265273	

Как можно заметить из табл. 2, $P(T \leq t)$ двухстороннее меньше 0,05, что говорит о том, что существует статистически значимая разница между прошлым опытом и данными построенной модели. Мы вполне можем отвергнуть нулевую гипотезу.

Однако t критическое двухстороннее больше df . И это пока мы можем объяснить малой выборкой и малым количеством наблюдений, что и могло повлиять на данный показатель. Необходимо наблюдать за реальным опытом студенческого предпринимательства дальше и собирать дальнейшую статистику для дальнейшей проверки адекватности построенной модели.

В целом были получены обнадеживающие результаты относительно адекватности построенной модели.

3.2. Построение модели, в которой стимулировалась программа «Умник»

Работая дальше с имитационной моделью, мы можем несколько изменить параметры модели, чтобы пронаблюдать результаты наших изменений и воздействий на модель. Например, пронаблюдать результат воздействия каких-либо мер стимулирования на тот или иной конкурс (в рамках стратегии управления молодежной политики). Работа с моделью в таком случае выглядеть следующим образом.

Если мы стимулируем «Умник» (повышаем вероятность участия до 0,8 с 0,5 – первоначальные равные условия для всех конкурсов), то выигрыши (победы) по программе «Умник» на первом этапе находится в паритетном лидирующем положении вместе со «Стартом» (вместе с увеличением количества участников).

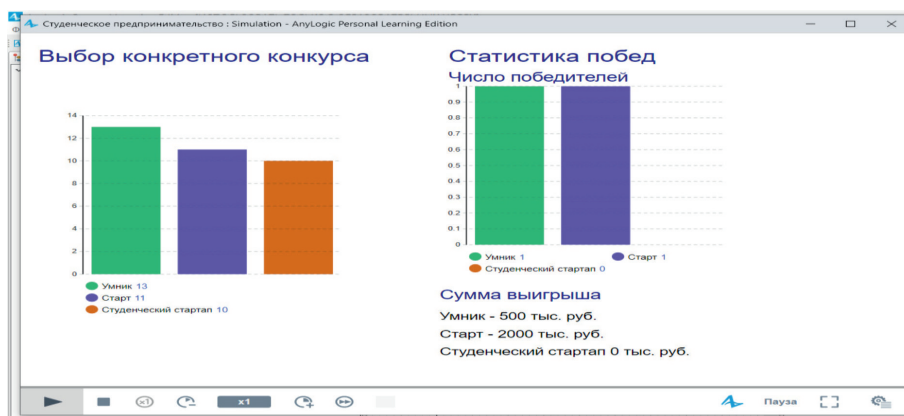


Рис. 6. Данные модели при дополнительном стимулировании программы «Умник»

Fig. 6. Model data with additional incentives from the "Umnik" program

Однако через полгода, несмотря на дополнительное стимулирование, «Умник» сохраняет свои позиции (количество участников и побед), которые весьма

схожие с моделью без стимулирования. Более того, легко заметить, что сумма выигрыша «распределяется» между «Студенческим стартапом» (рис. 7). Впоследствии, как демонстрирует рис. 8, «Умник» выходит в лидеры, при этом конкурс «Студенческий стартап» заметно отстает от первоначальных позиций.

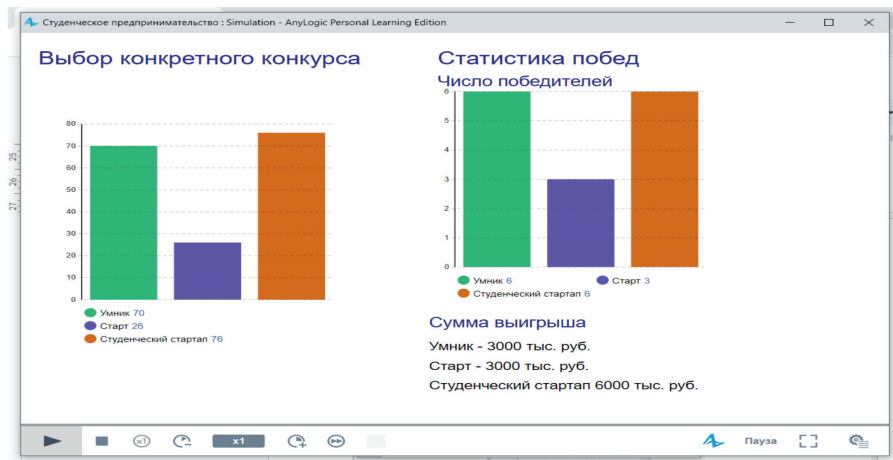


Рис. 7. Модель при стимулировании программы «Умник» (6 месяцев)
Fig. 7. Model when stimulating the “Umnik” program (6 months)



Рис. 8. Модель при стимулировании программы «Умник» (12 месяцев)
Fig. 8. Model when stimulating the “Umnik” program (12 months)

При всех равных условиях конкурс «Студенческий стартап» является наиболее успешным конкурсом.

При дополнительном воздействии на программу «Умник», последняя действительно имеет шансы стать лидером, однако она явно заимствует потенциал у программы «Студенческий стартап», и тут принимать решения следует исходя из понимания последствий подобного стимулирования для общей картины студенческого предпринимательства. Будет ли университету выгодно падение динамики «Студенческого стартапа»? Данный вопрос необходимо решать руководству по политике по студенческому предпринимательству. Модель дает прогнозы «что будет, если...» и довольно убедительно.

Таким образом, данная модель совершенно приемлема для предсказания того или иного воздействия на стимулирование участия в конкурсах.

Помимо этого, при помощи применения прошлого опыта, доказана адекватность построенной модели имитационного моделирования студенческого предпринимательства ИрНИТУ.

4. Обсуждение

Следует отметить, что имитационное моделирование в исследовании студенческого предпринимательства применяется впервые. До этого студенческое предпринимательство оценивалась методами регрессионного, корреляционного анализов, либо применялись кейс-методы для анализа развития данного направления в деятельности университетов. Как было показано в разделе «Литературный обзор», имитационное моделирование в университетской сфере применялось при оценке управленческих решений либо при оценке поведения абитуриентов в отдельном регионе на примере Республики Башкортостан.

И здесь необходимо уточнить существующие ограничения модели. Реальная модель студенческого предпринимательства гораздо более объемна и сложна (в ИрНИТУ существует развитая система поддержки студенческого предпринимательства [27]). В данной имитационной модели полная инфраструктура поддержки предпринимательства не отражена в целях более наглядного объяснения работы и результатов работы модели. Однако дополнительным вопросом применения данной модели является вопрос применения на практике. Модель на данном этапе времени не способна учесть какие-либо негативные события, которые могут негативно повлиять на результат студенческого предпринимательства (например, отсутствие заинтересованных студентов либо неудачно выбранная стимулирующая политика привлечения студентов в студенческое предпринимательство университета). Фактически необходимо постоянно корректировать модель, исходя из каких-либо внешних обстоятельств. Помимо этого, на студенческое предпринимательство вуза влияет не только внутренняя среда, эффективность работы руководства студенческим предпринимательством в вузе, существующие программы стимулирования студентов (в данной работе мы рассматривали проекты федерального уровня). На развитие студенческого предпринимательства также влияет и вся инфраструктура вуза (включая зоны ответственности промышленных партнеров [27]), региональная политика стимулирования студенческого и молодежного предпринимательства и другие факторы. Будучи сложной системой, как и указывалось в начале, университет и его подсистемы будут реагировать на подобную сложную среду, и не всегда имитационное моделирование может

дать точный (или более приближенный к точному) ответ – как будет развиваться ситуация в той или иной степени.

Второй аспект ограничения – это пока малое количество наблюдений для проверки модели «прошлым опытом». При проверке модели, как можно заметить, были применены статистические данные только за 2022 г., в силу фактического отсутствия статистики по другим периодам. И это, скорее всего, повлияло на поведение t критического двухстороннего, которое приняло значение больше df (см. табл. 2). Но при этом $P(T \leq t)$ двухстороннее меньше 0,05, что говорит о том, что существует статистически значимая разница между прошлым опытом и данными построенной модели, что дает нам основание отвергнуть нулевую гипотезу. Как и было сказано выше, необходимо наблюдать за реальным опытом студенческого предпринимательства дальше и собирать дальнейшую статистику для дальнейшей проверки адекватности построенной модели.

Однако гипотезу исследования в целом можно считать доказанной. Имитационное моделирование существенно обогащает палитру методов, которые можно применять в поле университетских решений. Имитационное моделирование студенческого предпринимательства в ИРНИТУ дает понять, какое направление конкурса можно стимулировать, чтобы добиться достижения того или иного аспекта молодежной политики, как мы и показали на примере дополнительного стимулирования для участников конкурса «Умник».

Заключение

Представляется, что цель исследования достигнута. Нами показана реальность применения метода имитационного моделирования и показаны возможности применения (моделирование различных сценариев). Цель нашего исследования – представить и продемонстрировать возможности применения инструмента имитационного моделирования в университетском управлении, в системе, в которой особенно сложно применять традиционные методы оценки эффективности решений и либо прогнозирования. С поставленными целями модель вполне справилась. Модель способна предсказать наиболее вероятный исход заложенных действий или интереса за более короткий срок по сравнению с другими инструментами прогнозирования.

Гипотеза исследования также доказана. Применение метода имитационного моделирования существенно обогащает подходы к прогнозированию процессов в сфере высшего образования, как мы и показали в ситуации дополнительного стимулирования программы «Умник».

Теоретическая значимость полученных результатов – в расширении перечня вопросов в сфере высшего образования для применения имитационного моделирования. Практическая значимость полученных результатов состоит в применении полученных результатов для оценки эффективности студенческого предпринимательства университета и будет интересна как администрации вузов, так и исследователям высшего образования.

Отдельным вопросом остаются обсуждаемые ограничения применяемого метода на данном этапе времени. Однако это не является барьером для развития

применения имитационного моделирования в университетских управленческих решениях. Это является исследовательским вопросом и вызовом для исследователей и разработчиков имитационного моделирования: что дальше? как улучшить применяемый инструментарий? Таким образом, очевиден вывод о том, что имитационное моделирование – инструмент для принятия управленческих решений, который не только достоин внимания, но и, в силу своей универсальности, найдет широкое применение для исследования социальных процессов в студенческой среде.

Список литературы

1. **Луман Н.** Социальные системы. Очерк общей теории. СПб.: Наука, 1981. С. 208.
2. **Красных С. С.** Имитационное моделирование социально-экономических процессов в территориальных системах // Журнал экономической теории. 2020. Т. 17. № 2. С. 503–508. DOI: 10.31063/2073-6517/2020.17-2.22
3. **Кастельс М.** Информационная эпоха: экономика, общество и культура / Пер. с англ.; под научн. ред. О. И. Шкаратана. М.: ГУ-ВШЭ, 2000.
4. **Forrester J. W.** Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers. Harvard Business Review. 1958. Vol. 36. No. 4. P. 37–66.
5. **Longstaff F. A., Schwartz E. S.** Valuing American options by simulation: A simple least-squares approach // REVIEW OF FINANCIAL STUDIES. 2001. Vol. 14. Iss. 1. P. 113–147. DOI: 10.1093/rfs/14.1.113
6. **George-Marios Angeletos, David Laibson, Andrea Repetto, Jeremy Tobacman, Stephen Weinberg.** The Hyperbolic Consumption Model: Calibration, Simulation, and Empirical Evaluation // The Journal of Economic Perspectives. 2001. Vol. 15. No. 3. P. 47–68. DOI: 10.1257/jep.15.3.47
7. **Macal C. M., North V. J.** Tutorial on agent-based modelling and simulation // Journal of Simulation. 2010. No. 4. P. 151–162. DOI: 10.1057/jos.2010.3
8. **Боуш Г. Д., Куликова О. М., Шелков И. К.** Агентное моделирование процессов кластерообразования в региональных экономических системах // Экономика региона. 2016. Т. 12, вып. 1. С. 64–77. DOI: 10.17059/2016-1-5
9. **Паринов С. И.** Новые возможности имитационного моделирования социально-экономических систем // Искусственные сообщества. 2007. № 3–4.
10. **Лычкина Н. Н.** Имитационное моделирование экономических процессов: Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2011. 254 с.
11. **Низамутдинов М. М., Орешников В. В.** Моделирование адаптивных свойств поведения участников социально-экономических процессов // Известия Уфимского научного центра РАН. 2021. № 3. С. 55–60. DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-3-55-60
12. **Бобков С. П., Астраханцева И. А., Павлова Е. А.** Имитационное моделирование для интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2022. № 1(69). С. 61–69. DOI 10.6060/snt.20226901.0008

13. **Клебанов Б. И., Вакушин А. А., Тен Ю. М.** Применение пакета anydynamics для разработки имитационных моделей социальных систем // Современные наукоемкие технологии. 2022. № 4. С. 46–51. DOI: 10.17513/snt.39106
14. **Горбунов А. Р., Лычкина Н. Н.** Парадигмы имитационного моделирования: новое в решении задач стратегического управления (объединенная логика имитационного моделирования) // Бизнес-Информатика. 2007. № 2. С. 60–70.
15. **Грачев М. И., Бурлов В. Г., Чудаков О. Е., Примакин А. И.** Имитационная модель управления образовательной организацией высшего образования // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2021. Т. 10, № 1 (53). С. 57–62. DOI: 10.46548/21vek-2021-1053-0010
16. **Гайнанов Д. А., Мигранова Л. И., Минязев А. И.** Имитационная модель управления поведением абитуриента в образовательной системе региона // Креативная экономика. 2020. Т. 14, № 10. С. 2551–2568. DOI: 10.18334/ce.14.10.110924
17. **Kelton W. D., Sadowski R. P., & Sadowski D. A.** Simulation with ARENA. McGraw-Hill, Inc., 2002. 631 p.
18. **Harrison J. R., Lin Z., Carroll G. R., & Carley K. M.** Simulation Modeling in Organizational and Management Research // The Academy of Management Review. 2007. Vol. 32(4). P. 1229–1245. <http://www.jstor.org/stable/20159364>. <https://doi.org/10.2307/20159364>
19. **Gunal M.** A guide for building hospital simulation models // Health Syst. 2017. Vol. 1. P. 17–25. <https://doi.org/10.1057/hs.2012.8>
20. **Mielczarek B., Uziako-Mydlikowska J.** Application of computer simulation modeling in the health care sector: a survey // SIMULATION. 2012. Vol. 88(2). P. 197–216. DOI: 10.1177/0037549710387802
21. **Ford A., Gardiner P.** A New Measure of Sensitivity for Social System Simulation Models // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9, no. 3. P. 105–114. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310166
22. **Epstein J.** Generative social science. Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton University Press, 2007.
23. **López-Paredes A., Edmonds B., Klugl F.** Special Issue: Agent Based Simulation of Complex Social Systems // SIMULATION. 2012. Vol. 88(1). P. 4–6. DOI: 10.1177/0037549711433392
24. **Morecroft J.** Rationality in the Analysis of Behavioral Simulation Models // Management Science. 1985. Vol. 31(7). P. 900–916. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.7.900>
25. **Gu X & Blackmore K. L.** A systematic review of agent-based modelling and simulation applications in the higher education domain // Higher Education Research & Development. 2015. Vol. 34 (5). P. 883–898, DOI: 10.1080/07294360.2015.1011088
26. **Caraquil J. et al.** Simulation modeling of intention to leave among faculty in higher education institutions // Journal of Educational and Human Resource Development (JEHRD). 2016. Vol. 4. P. 26–37. DOI: 10.61569/6wep9v48

27. **Красикова Т. Ю., Киреенко А. П.** Мотивация студенческого предпринимательства и роль университетской инфраструктуры // *Инновационное развитие экономики*. 2022. № 5(71). С. 277–291. DOI: 10.51832/2223798420225277

References

1. **Luhmann N.** Social systems. Essay on general theory. St. Petersburg: Nauka, 1981, p. 208.
2. **Krasnykh S. S.** Simulation modeling of socio-economic processes in territorial systems. *Journal of Economic Theory*, 2020, no. 17. DOI: 10.31063/2073-6517/2020.17-2.22
3. **Castells M.** (2000) Information Age: Economy, Society and Culture: Trans. from English Under scientific ed. O.I. Shkaratana. M.: State University-Higher School of Economics. P. 383.
4. **Forrester J. W.** Industrial Dynamics – A Major Breakthrough for Decision Makers. Harvard Business Review. 1958. Vol. 36. No. 4, P. 37–66.
5. **Longstaff F. A., Schwartz E. S.** Valuing American options by simulation: A simple least-squares approach // *REVIEW OF FINANCIAL STUDIES*. 2001. Vol. 14. Iss. 1. P. 113–147. DOI: 10.1093/rfs/14.1.113
6. **George-Marios Angeletos, David Laibson, Andrea Repetto, Jeremy Tobacman, Stephen Weinberg.** The Hyperbolic Consumption Model: Calibration, Simulation, and Empirical Evaluation // *The Journal of Economic Perspectives*. 2001. Vol. 15. No. 3. P. 47–68. DOI: 10.1257/jep.15.3.47
7. **Macal C. M., North V. J.** Tutorial on agent-based modelling and simulation // *Journal of Simulation*. 2010. No. 4. P. 151–162. DOI: 10.1057/jos.2010.3
8. **Boush G. D.** (2016) Agent-based modeling of cluster formation processes in regional economic systems. *Economics of the region*. V.12, Issue. 1. – pp. 64-77. doi: 10.17059/2016-1-5
9. **Parinov S. I.** (2007) New possibilities for simulation modeling of socio-economic systems. *Artificial communities*. – No. 3-4.
10. **Lychkina N. N.** Simulation modeling of economic processes: – M.: INFRA-M, 2011. – 254 p. – (Higher education).
11. **Nizamutdinov, M. M.** (2021) Modeling of adaptive properties of behavior of participants in socio-economic processes. *News of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – No. 3. – P. 55-60. – DOI 10.31040/2222-8349-2021-0-3-55-60.
12. **Bobkov, S. P.** (2022) Simulation modeling for intellectual support of management decision-making. *Modern high-tech technologies. Regional application*. – 2022. – No. 1(69). – P. 61-69. DOI 10.6060/snt.20226901.0008.
13. **Klebanov, B. I.** et al. (2022) Application of the AnyDynamics package for the development of simulation models of social systems. *Modern science-intensive technologies*. –No. 4. – P. 46-51. – DOI 10.17513/snt.39106.
14. **Gorbunov A. R.** (2007) Paradigms of simulation modeling: new in solving strategic management problems (unified logic of simulation modeling). *Business Informatics*. – No. 2. – P.60-70.

15. **Grachev M. I.** (2021) Simulation model of management of an educational organization of higher education. XXI century: results of the past and problems of the present plus. – T. 10, No. 1(53). – pp. 57-62. – DOI 10.46548/21vek-2021-1053-0010.
16. **Gaynanov, D. A., Migranova, L. I., & Minyazev, A. I.** (2020) Simulation model for managing student behaviour in the regional educational system. *Kreativnaya ekonomika*, 14(10), 2551-2568. doi: 10.18334/ce.14.10.110924 (in Russian)
17. **Kelton W. D., Sadowski R. P., & Sadowski D. A.** (2002). Simulation with ARENA. McGraw-Hill, Inc.. 631 p. ISBN-13: 978-0071122399
18. **Harrison J. R., Lin Z., Carroll G. R., & Carley K. M.** (2007). Simulation Modeling in Organizational and Management Research. *The Academy of Management Review*, 32(4), 1229–1245. <http://www.jstor.org/stable/20159364>. <https://doi.org/10.2307/20159364>
19. **Gunal, M.** (2012) A guide for building hospital simulation models. *Health Syst* 1, 17–25. <https://doi.org/10.1057/hs.2012.8>
20. **Mielczarek B, Uzialko-Mydlikowska J.** Application of computer simulation modeling in the health care sector: a survey. *SIMULATION*. 2012;88(2):197–216. DOI:10.1177/00375497110387802
21. **Ford A., Gardiner P.** A New Measure of Sensitivity for Social System Simulation Models, in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 3, pp. 105–114, March 1979, DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310166
22. **Epstein J.** (2007). *Generative social science. Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton University Press.
23. **López-Paredes A., Edmonds B., Klugl F.** Special Issue: Agent Based Simulation of Complex Social Systems. *SIMULATION*. 2012;88(1):4–6. DOI:10.1177/0037549711433392
24. **Morecroft J.** (1985) Rationality in the Analysis of Behavioral Simulation Models. *Management Science* 31(7):900–916. <https://doi.org/10.1287/mnsc.31.7.900>
25. **Gu X & K. L. Blackmore** (2015) A systematic review of agent-based modelling and simulation applications in the higher education domain, *Higher Education Research & Development*, 34:5, 883-898, DOI: 10.1080/07294360.2015.1011088
26. **Caraquil J.** et al. Simulation modeling of intention to leave among faculty in higher education institutions // *Journal of Educational and Human Resource Development (JEHRD)*. 2016. T. 4. C. 26–37. DOI: 10.61569/6wep9v48
27. **Krasikova, T. Yu.** et al. (2022) Motivation of student entrepreneurship and the role of university infrastructure. *Innovative development of the economy*. No. 5(71). – pp. 277-291. – DOI 10.51832/2223798420225277.

Сведения об авторах

Красикова Татьяна Юрьевна, кандидат экономических наук, доцент

Петров Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор

Слободняк Елизавета Ильинична, студентка

Information about the Authors

Tatyana Yu. Krasikova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Economics and Digital Business Technologies, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

Alexander V. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Institute of Information Technologies and Data Analysis, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk

Elizaveta I. Slobodnyak, master of the Faculty of Mechanics and Mathematics, Novosibirsk State University, Novosibirsk

*Статья поступила в редакцию 14.12.2023;
одобрена после рецензирования 20.01.2024; принята к публикации 20.01.2024*

*The article was submitted 14.12.2023;
approved after reviewing 20.01.2024; accepted for publication 20.01.2024*