

# БИЗНЕС- ИНФОРМАТИКА

Научный журнал НИУ ВШЭ

## СОДЕРЖАНИЕ

*М.Б. Ласкин, О.В. Русаков*

Прогнозирование распределений удельных цен на объекты недвижимого имущества на основе свойств ПСИ-процессов..... 7

*А.В. Кудров*

Влияние экономической сложности и отраслевой специализации на валовый региональный продукт регионов РФ ..... 25

*Р.С. Роголин*

Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности ..... 41

*И.В. Соловьев, В.А. Семенихин, С.П. Куш*

Влияние широты технологического стека на результат работы цифрового продукта: взгляд с позиций теории поглощающей способности ..... 57

*Ю.Ф. Тельнов, В.А. Казаков, А.А. Брызгалов, И.Г. Федоров*

Методы и модели обоснования прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий..... 73

*М.К. Pandey, А.К. Pathak, I.G. Sergeeva*

A bibliometric review of scientific research on the significance of information technology relating to sustainable development reporting practice ..... 94



Издатель:  
Национальный  
исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

Подписной индекс  
Объединенного каталога  
«Пресса России» – E79128

Выпускается ежеквартально

Журнал включен в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Главный редактор  
**Е.П. Зараменских**

Заместитель главного редактора  
**Э.А. Бабкин**

Компьютерная верстка  
**О.А. Богданович**

Дизайн обложки  
**О.А. Богданович**  
(с использованием изображения, сгенерированного нейросетью Midjourney)

Администратор веб-сайта  
**И.И. Хрусталева**

Адрес редакции:  
119049, г. Москва,  
ул. Шаболовка, д. 26-28  
Тел./факс: +7 (495) 772-9590 \*28509  
<http://bijournal.hse.ru>  
E-mail: [bijournal@hse.ru](mailto:bijournal@hse.ru)

За точность приведенных сведений и содержание данных, не подлежащих открытой публикации, несут ответственность авторы

**При перепечатке ссылка на журнал «Бизнес-информатика» обязательна**

Тираж:  
русскоязычная версия – 100 экз.,  
англоязычная версия – 100 экз.,  
онлайн-версии на русском и английском – свободный доступ

Отпечатано в типографии НИУ ВШЭ  
г. Москва, Измайловское шоссе, д. 44, стр. 2

© Национальный  
исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»

## О ЖУРНАЛЕ

«**Б**изнес-информатика» – рецензируемый междисциплинарный научный журнал, выпускаемый с 2007 года Национальным исследовательским университетом «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ). Администрирование журнала осуществляется Высшей школой бизнеса НИУ ВШЭ. Журнал выпускается ежеквартально, на русском и английском языках.

Миссия журнала – развитие бизнес-информатики как новой области информационных технологий и менеджмента. Журнал осуществляет распространение последних разработок технологического и методологического характера, способствует развитию соответствующих компетенций, а также обеспечивает возможности для дискуссий в области применения современных информационно-технологических решений в бизнесе, менеджменте и экономике.

Журнал публикует статьи по следующей тематике: моделирование социальных и экономических систем, цифровая трансформация бизнеса, управление инновациями, информационные системы и цифровые технологии в бизнесе, анализ данных и системы бизнес-интеллекта, математические методы и алгоритмы бизнес-информатики, моделирование и анализ бизнес-процессов, поддержка принятия управленческих решений.

Журнал «Бизнес-информатика» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (Перечень ВАК).

Журнал входит в базы Scopus, Web of Science Emerging Sources Citation Index (WoS ESCI), Russian Science Citation Index на платформе Web of Science (RSCI), EBSCO.

Журнал распространяется как в печатном виде, так и в электронной форме.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Зараменских Евгений Петрович**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

## ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

**Бабкин Эдуард Александрович**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия

## ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

**Авдошин Сергей Михайлович**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Акопов Андраник Сумбатович**

Центральный экономико-математический институт РАН,  
Москва, Россия

**Алескеров Фуад Тагиевич**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Афанасьев Александр Петрович**

Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича  
РАН, Москва, Россия

**Афанасьев Антон Александрович**

Центральный экономико-математический институт РАН,  
Москва, Россия

**Баранов Александр Павлович**

Главный научно-исследовательский вычислительный центр  
Федеральной налоговой службы, Москва, Россия

**Барахнин Владимир Борисович**

Федеральный исследовательский центр информационных  
и вычислительных технологий, Новосибирск, Россия

**Беккер Йорг**

Университет Мюнстера, Мюнстер, Германия

**Вестнер Маркус**

Технический университет прикладных наук,  
Регенсбург, Германия

**Гаврилова Татьяна Альбертовна**

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Санкт-Петербург, Россия

**Глотен Эрве**

Тулонский университет, Ла-Гард, Франция

**Гурвич Владимир Александрович**

Ратгерский университет (Университет Нью-Джерси),  
Ратгерс, США

**Джейкобс Лоренц**

Университет Цюриха, Цюрих, Швейцария

**Дискин Иосиф Евгеньевич**

Всероссийский центр изучения общественного мнения,  
Москва, Россия

**Зандкуль Курт**

Университет Ростока, Росток, Германия

**Иванников Александр Дмитриевич**

Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,  
Москва, Россия

**Исаев Дмитрий Валентинович**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Калягин Валерий Александрович**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Нижний Новгород, Россия

**Кравченко Татьяна Константиновна**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Кузнецов Сергей Олегович**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Лугачев Михаил Иванович**

Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

**Лин Квей-Жей**

Технологический институт Нагои, Нагоя, Япония

**Мальцева Светлана Валентиновна**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Мейор Питер**

Комиссия ООН по науке и технологиям, Женева,  
Швейцария

**Миркин Борис Григорьевич**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

**Назаров Дмитрий Михайлович**

Уральский государственный экономический университет,  
Екатеринбург, Россия

**Пальчунов Дмитрий Евгеньевич**

Новосибирский государственный университет, Новосибирск,  
Россия

**Пардалос Панайот (Панос)**

Университет Флориды, Гейнсвилл, США

**Пастор Оскар**

Политехнический университет Валенсии, Валенсия,  
Испания

**Посегга Йоахим**

Университет Пассау, Пассау, Германия

**Самуйлов Константин Евгеньевич**

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

**Стоянова Ольга Владимировна**

Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», Санкт-Петербург, Россия

**Триболе Жозе**

Университет Лиссабона, Лиссабон, Португалия

**Ульянов Михаил Васильевич**

AVECO, Любляна, Словения

**Ускенбаева Раиса Кабиевна**

Казахский национальный исследовательский технический  
университет им. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

**Цуканова Ольга Анатольевна**

Санкт-Петербургский национальный исследовательский  
университет информационных технологий, механики  
и оптики, Санкт-Петербург, Россия

**Чхартишвили Александр Гедеванович**

Институт проблем управления им В.А. Трапезникова РАН,  
Москва, Россия

**Штраус Кристина**

Университет Вены, Вена, Австрия

ISSN 1998-0663 (print), ISSN 2587-8166 (online)

English version: ISSN 2587-814X (print), ISSN 2587-8158 (online)

Vol. 17 No. 4 – 2023

# BUSINESS INFORMATICS

HSE Scientific Journal

## CONTENTS

*M.B. Laskin, O.V. Rusakov*

Prediction of distributions of unit prices  
for real estate properties on the basis  
of the characteristics of PSI-processes..... 7

*A.V. Kudrov*

The impact of economic complexity and industry  
specialization on the gross regional product  
of Russian regions..... 25

*R.S. Rogulin*

Mathematical model of the formation of supply  
chains of raw materials from a commodity  
exchange under conditions of uncertainty ..... 41

*I.V. Solovyov, V.A. Semenikhin, S.P. Kushch*

The influence of the breadth of the tech stack  
on the result of the digital product: A view through  
the theory of absorption capacity..... 57

*Yu.F. Telnov, V.A. Kazakov, A.A. Bryzgalov,  
I.G. Fiodorov*

Methods and models for substantiating application  
scenarios for the digitalization of manufacturing  
and business processes of network enterprises ..... 73

*M.K. Pandey, A.K. Pathak, I.G. Sergeeva*

A bibliometric review of scientific research  
on the significance of information technology relating  
to sustainable development reporting practice ..... 94



Publisher:  
HSE University

The journal is published quarterly

The journal is included  
into the list of peer reviewed  
scientific editions established  
by the Supreme Certification  
Commission of the Russian Federation

Editor-in-Chief  
**E. Zaramenskikh**

Deputy Editor-in-Chief  
**E. Babkin**

Computer making-up  
**O. Bogdanovich**

Cover design  
**O. Bogdanovich**  
(using an image generated  
by the Midjourney neural network)

Website administration  
**I. Khrustaleva**

Address:  
26-28, build. 4, Shablovka Street  
Moscow 119049, Russia

Tel./fax: +7 (495) 772-9590 \*28509  
<http://bijournal.hse.ru>  
E-mail: [bijournal@hse.ru](mailto:bijournal@hse.ru)

Circulation:  
English version – 100 copies,  
Russian version – 100 copies,  
online versions in English and Russian –  
open access

Printed in HSE Printing House  
44, build. 2, Izmaylovskoye Shosse,  
Moscow, Russia

© HSE University

## ABOUT THE JOURNAL

**B**usiness Informatics is a peer reviewed interdisciplinary academic journal published since 2007 by HSE University, Moscow, Russian Federation. The journal is administered by HSE Graduate School of Business. The journal is issued quarterly, in English and Russian.

The mission of the journal is to develop business informatics as a new field within both information technologies and management. It provides dissemination of latest technical and methodological developments, promotes new competences and provides a framework for discussion in the field of application of modern IT solutions in business, management and economics.

The journal publishes papers in the following areas: modeling of social and economic systems, digital transformation of business, innovation management, information systems and technologies in business, data analysis and business intelligence systems, mathematical methods and algorithms of business informatics, business processes modeling and analysis, decision support in management.

The journal is included into the list of peer reviewed scientific editions established by the Supreme Certification Commission of the Russian Federation.

The journal is included into Scopus, Web of Science Emerging Sources Citation Index (WoS ESCI), Russian Science Citation Index on the Web of Science platform (RSCI), EBSCO.

The journal is distributed both in printed and electronic forms.

# EDITORIAL BOARD

## EDITOR-IN-CHIEF

**Evgeny P. Zaramenskikh**

HSE University, Moscow, Russia

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

**Eduard A. Babkin**

HSE University, Nizhny Novgorod, Russia

## EDITORIAL BOARD

**Sergey M. Avdoshin**

HSE University, Moscow, Russia

**Andranik S. Akopov**

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Fuad T. Aleskerov**

HSE University, Moscow, Russia

**Alexander P. Afanasyev**

Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Anton A. Afanasyev**

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Vladimir B. Barakhnin**

Federal Research Center of Information and Computational Technologies, Novosibirsk, Russia

**Alexander P. Baranov**

Federal Tax Service, Moscow, Russia

**Jörg Becker**

University of Munster, Munster, Germany

**Alexander G. Chkhartishvili**

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Tatiana A. Gavrilova**

Saint-Petersburg University, St. Petersburg, Russia

**Hervé Glotin**

University of Toulon, La Garde, France

**Vladimir A. Gurvich**

Rutgers, The State University of New Jersey, Rutgers, USA

**Laurence Jacobs**

University of Zurich, Zurich, Switzerland

**Iosif E. Diskin**

Russian Public Opinion Research Center, Moscow, Russia

**Dmitry V. Isaev**

HSE University, Moscow, Russia

**Alexander D. Ivannikov**

Institute for Design Problems in Microelectronics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Valery A. Kalyagin**

HSE University, Nizhny Novgorod, Russia

**Tatiana K. Kravchenko**

HSE University, Moscow, Russia

**Sergei O. Kuznetsov**

HSE University, Moscow, Russia

**Kwei-Jay Lin**

Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan

**Mikhail I. Lugachev**

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Svetlana V. Maltseva**

HSE University, Moscow, Russia

**Peter Major**

UN Commission on Science and Technology for Development, Geneva, Switzerland

**Boris G. Mirkin**

HSE University, Moscow, Russia

**Dmitry M. Nazarov**

Ural State University of Economics, Ekaterinburg, Russia

**Dmitry E. Palchunov**

Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

**Panagote (Panos) M. Pardalos**

University of Florida, Gainesville, USA

**Óscar Pastor**

Polytechnic University of Valencia, Valencia, Spain

**Joachim Posegga**

University of Passau, Passau, Germany

**Konstantin E. Samouylov**

Peoples' Friendship University, Moscow, Russia

**Kurt Sandkuhl**

University of Rostock, Rostock, Germany

**Olga Stoyanova**

HSE University, St. Petersburg, Russia

**Christine Strauss**

University of Vienna, Vienna, Austria

**José M. Tribolet**

Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal

**Olga A. Tsukanova**

Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

**Mikhail V. Ulyanov**

AVECO, Ljubljana, Slovenia

**Raissa K. Uskenbayeva**

Kazakh National Technical University after K.I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan

**Markus Westner**

Technical University for Applied Sciences (OTH Regensburg), Regensburg, Germany

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.7.24

# Прогнозирование распределений удельных цен на объекты недвижимого имущества на основе свойств ПСИ-процессов\*

**М.Б. Ласкин**<sup>a</sup> 

E-mail: laskinmb@yahoo.com

**О.В. Русаков**<sup>b</sup> 

E-mail: ovirusakov@yahoo.co.uk

<sup>a</sup> Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН  
Адрес: Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 14 линия, д. 39

<sup>b</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
Адрес: Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

## Аннотация

Прогнозирование цен на рынке недвижимого имущества всегда является предметом интереса ученых-экономистов, аналитиков рынка, участников рынка (продавцов и покупателей), маркетинговых служб предприятий строительного комплекса, аналитиков банков и страховых компаний, инвесторов. В современных условиях поведение цен на объекты недвижимости приобретает особую важность под влиянием таких факторов как изменения в структуре доходов населения, изменение ставок ипотечных кредитов и их доступность, динамичные изменения макроэкономического характера и других внешних социально-экономических, политических факторов. Однако, в отличие от финансовых рынков, рынков ценных бумаг, рынок недвижимости всегда отличается замедленной реакцией на внешние возмущения, часто до полугода, что позволяет надеяться на построение адекватных прогнозов, хотя бы на время замедленной реакции. Традиционные авторегрессионные методы прогнозирования отличаются быстро нарастающей дисперсией прогноза, так как предполагают фактор стохастической волатильности. В статье предложена модель и метод построения прогноза, основанная на стохастических процессах «пуассоновского случайного индекса» с быстро выходящей на стационарный режим и стабилизирующейся дисперсией. В основе модели лежит «принцип замещения» старых цен

\* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»



новыми. Детально рассмотрен пример применения «принципа замещения» для построения прогноза цен на вторичную жилую недвижимость в г. Санкт-Петербурге по результатам четырехлетних наблюдений за ценами предложений.

**Ключевые слова:** прогноз цен на недвижимость, логарифмически нормальное распределение цен, псевдопуассоновский процесс, процесс пуассоновского случайного индекса, процесс Орнштейна–Уленбека

**Цитирование:** Ласкин М.Б., Русаков О.В. Прогнозирование распределений удельных цен на объекты недвижимого имущества на основе свойств ПСИ-процессов // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 7–24. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.7.24

### Введение

Рынок недвижимого имущества является важным сектором экономики любой страны. Объекты капитального строительства, поступающие в оборот товарного рынка недвижимого имущества, создают цепочки хозяйственных связей в строительной отрасли, в отраслях производства строительных материалов, добывающей промышленности. Сфера оборота первичных и вторичных объектов недвижимого имущества в значительной степени является областью бизнес-интересов банковского и страхового секторов экономики. Совокупность объектов недвижимого имущества, находящихся в собственности и в коммерческом обороте является налогооблагаемой базой по налогу на имущество и, следовательно, основой для пополнения бюджета страны. По этим причинам прогнозирование цен на рынке недвижимого имущества всегда было и остается актуальной задачей для всех участников рынка. Материалы, посвященные данной тематике, регулярно появляются в периодических изданиях. Задачи, связанные с построением прогнозов, постоянно являются предметом исследований ученых и исследователей. Среди работ общего методологического характера следует выделить известную переведенную книгу [1], серии работ авторов публикаций [2–5]. В качестве примеров относительно недавних публикаций отечественных исследователей можно назвать работы [6–16], зарубежных – [17–22]. Рынки недвижимости, как справедливо отмечалось в [5], имеют характерные региональные особенности. Прогнозированию цен на региональных отечественных рынках посвящены работы отечественных авторов [3, 6, 10, 11, 13–16, 23, 24], зарубежных – [25–28]. В большинстве случаев рассматриваются традицион-

ные методы прогнозирования: фундаментального и технического анализа [11], факторные модели [14], регрессионные модели, модели авторегрессии и скользящих средних [2–5, 15, 16, 18, 27]. В тоже время, «стандартные эконометрические методы оказываются неприспособленными к прогнозированию тенденций рынка недвижимости в современных условиях», «методы, разработанные в странах с развитой рыночной экономикой непригодны к прогнозированию в странах с переходной экономикой» [5]. В последнее время появляются работы, в которых для целей прогнозирования цен на недвижимость применяются методы машинного обучения [24], в том числе методы нейросетевого моделирования [8, 29]. Основным недостатком традиционных методов, основанных на авторегрессии, является быстрое нарастание дисперсии прогноза, что делает результат прогноза малоинформативным уже через 2–3 шага. Это обусловлено введением случайного масштаба волатильности, что выражается в том, что возникает смесь распределений, а дисперсия смеси всегда больше или равна смеси дисперсий. В то же время многочисленные эмпирические наблюдения говорят о том, что разброс удельных цен на относительно сходные объекты недвижимого имущества мало изменяется во времени даже при наличии сильных восходящих или нисходящих трендов. Исключение могут составлять относительно короткие периоды воздействия сильных внешних возмущающих факторов, приводящих к заметной смене тренда. В этой связи предпочтительным выглядел бы прогноз с относительно стабильной дисперсией.

В настоящей статье мы предлагаем математическую модель процесса изменения цен на рынке недвижимого имущества при простых и, как пред-



ставляется, естественных допущениях. Такими допущениями являются следующие положения:

- 1) объявленная цена продажи на некоторый объект сохраняется неизменной в течение некоторого (случайного) промежутка времени;
- 2) в любой момент времени объект может быть снят с продажи или продан;
- 3) в любой момент времени в листинге продающихся объектов может появиться новый объект и заместить снятый с продажи, или проданный;
- 4) цены на объекты в листинге в каждый фиксированный момент времени независимы, или, по меньшей мере, условно независимы при условии некоторого внешнего фактора;
- 5) общий набор выставленных на продажу объектов в фиксированный момент времени образует наблюдаемую выборку удельных цен, которая подлежит изучению и статистической обработке.

Теоретической основой модели, предложенной ниже, являются три положения:

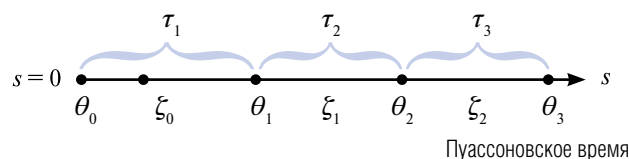
- ◆ принцип логарифмически нормального распределения удельных цен на сравнительно однородные объекты недвижимости;
- ◆ свойства распределения и ковариационной функции процесса пуассоновского случайного индекса (далее ПСИ-процесса);
- ◆ центральная предельная теорема для ПСИ-процессов – сходимость их нормированных сумм к стохастическому процессу Орнштейна–Уленбека (стационарному, гауссовскому, марковскому процессу).

В работах [30, 31] приводится обоснование сходимости удельных цен, образованных последовательными сравнениями, к логарифмически нормальному распределению. По-видимому, первой работой, в которой было отмечено следование удельных ставок аренды логарифмически нормальному распределению, является работа британских статистиков [32], это следование отмечено и в работе японских ученых [26]. В работе [33] исследованы свойства распределений и корреляционных функций ПСИ-процессов, там же доказывалась сходимость нормированных сумм независимых ПСИ-процессов к процессам типа Орнштейна–Уленбека. Теоретические основы, предложенной в настоящей статье модели, изложены в работах [30, 31, 33, 34].

## 1. Определение и основные свойства ПСИ-процесса

Пусть  $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots$  – случайная последовательность, которую мы назовем формирующей, или ведомой;  $\Pi(t) = \Pi_\lambda(t), t \geq 0$  – независимый от нее пуассоновский процесс с интенсивностью  $\lambda > 0$ , который мы назовем ведущим. Зададим пуассоновский субординатор<sup>1</sup> для последовательности  $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots$  следующим образом:  $\psi(t) = \psi_\lambda(t) := \xi_{\Pi(t)}$ . Полученный процесс  $\psi(t)$  с непрерывным временем  $t \geq 0$  – будем называть процессом пуассоновского случайного индекса (Poisson Stochastic Index process) или ПСИ-процессом. Заметим, что ПСИ-процессы являются естественным обобщением псевдо-пуассоновских процессов, введенных и подробно рассмотренных в главе X второго тома классического труда У. Феллера [35].

ПСИ-процесс представляет собой последовательные замещения членов формирующей последовательности, происходящие в моменты скачков пуассоновского процесса. Промежутки времени  $\{\tau_{j+1}\}, j = 0, 1, 2, \dots$  между последовательными скачками ведущего пуассоновского процесса называются спейсингами. Известно, что спейсинги являются независимыми одинаково распределенными случайными величинами с общим показательным (или, что то же самое, экспоненциальным) распределением, имеющим интенсивность  $\lambda > 0$ . В нулевой момент времени разыгрывается  $\xi_0$ , которая «держит» свое значение в течение первого спейсинга; в момент первого скачка пуассоновского процесса она замещается на  $\xi_1$ , и так далее. На протяжении  $j$ -го спейсинга разыгранная случайная величина  $\{\xi_{j-1}\}$  не меняет своего значения до момента (включительно)  $j$ -го скачка пуассоновского процесса  $\theta_j$ . В момент смены спейсинга  $\tau_{j+1}$  на  $\tau_{j+2}$ , значение случайной величины  $\xi_j$  замещается на  $\xi_{j+1}$  (рис. 1).



<sup>1</sup> Субординацией в теории стохастических процессов принято называть случайную замену времени.

Заметим, что ПСИ-процесс имеет следующее представление в виде взвешенной суммы элементов случайной последовательности  $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots$ , где веса — суть пуассоновские индикаторы

$$\psi_\lambda(t) = \sum_{j=0}^{\infty} \xi_j \cdot \mathbf{1}\{\Pi(t) = j\},$$

здесь и далее  $\mathbf{1}$  — индикаторная функция.

Если  $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots$  представляют собой стационарную последовательность, то ПСИ-процесс стационарен. В частности, это будет выполнено, когда  $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots$  — независимые одинаково распределенные величины. В последнем случае, если  $E\xi_0 = a$ , то условное математическое ожидание ПСИ-процесса

$$E(\psi_\lambda(t+s) | \psi_\lambda(s) = z) = ze^{-\lambda s} + a(1 - e^{-\lambda s})$$

для всякого произвольного, но фиксированного  $z$ , при любых неотрицательных  $t, s$ . И, в частности, при  $a = 0$

$$E(\psi_\lambda(t+s) | \psi_\lambda(s) = z) = ze^{-\lambda s}.$$

Важно отметить, что если последовательность  $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots$  марковская, то соответствующий ПСИ-процесс тоже обладает марковским свойством<sup>2</sup>.

## 2. Ковариационная функция процесса $\psi(t)$

В работе [33] получен следующий результат. Пусть  $\xi_0, \xi_1, \xi_2, \dots$  — независимые одинаково распределенные случайные величины,  $E(\xi_0) = 0$ ,  $D(\xi_0) = 1$ , тогда ковариационная функция процесса  $\psi(t)$ ,  $t \geq 0$ , убывает экспоненциально и имеет вид

$$\text{cov}(\psi(t), \psi(0)) = \exp(-\lambda t).$$

Рассмотрим независимые копии одного ПСИ-процесса  $\psi_\lambda(t)$ :  $\psi_1(t), \psi_2(t), \dots$ . Из экспоненциального вида ковариационной функции следует, что в силу центральной предельной теоремы для векторов, случайный процесс, составленный из нормированных сумм ПСИ-процессов вида

$$Z_N(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{j=0}^N \psi_{(j)}(t),$$

сходится в смысле слабой сходимости конечномерных распределений<sup>3</sup>, при  $N \rightarrow \infty$ , к процессу Орнштейна–Уленбека — стационарному, гауссовскому, марковскому процессу, причем заданному

в «стандартизованном» виде. Последнее означает, что в произвольные моменты времени  $(t_1, \dots, t_d)$  вектор  $Z(t_1), \dots, Z(t_d)$  имеет совместное нормальное распределение с нулевым средним и с ковариациями  $\exp(-\lambda|t_i - t_j|)$ , где  $t_i, t_j$  пробегают все элементы набора  $(t_1, \dots, t_d)$ . Таким образом, распределение «стандартизованного» процесса Орнштейна–Уленбека характеризуется гауссовостью (совместной нормальностью конечномерных распределений), нулевым средним (нулевым «теоретическим» трендом) и ковариацией вида  $\exp(-\lambda t)$ . Коэффициент  $\lambda > 0$  называется «скоростью» процесса Орнштейна–Уленбека, а  $1/\lambda$  — «вязкостью». Здесь мы видим, что скорость предельного процесса Орнштейна–Уленбека в точности есть интенсивность «ведущего» пуассоновского процесса. Условное математическое ожидание процесса Орнштейна–Уленбека совпадает с условным математическим ожиданием ПСИ-процесса

$$E(U(t+s) | U(t) = z) = ze^{-\lambda s},$$

а условная дисперсия не зависит от условия  $z$  и равна

$$D(U(t+s) | U(t) = z) = 1 - e^{-2\lambda s}.$$

Более того, условное распределение процесса  $U$  при условии  $z$  нормально при любом неотрицательном  $s$ . Из стандартного процесса Орнштейна–Уленбека путем сдвига  $a$  и масштаба  $b > 0$  получаем процесс Орнштейна–Уленбека  $OU$ , у которого стационарное распределение нормально с параметрами  $a$  и  $b^2$ , ковариацией  $b^2 \exp(-\lambda t)$ . Для такого процесса Орнштейна–Уленбека, естественно, стационарность и марковское свойство сохраняются, а условное математическое ожидание и условная дисперсия соответственно равны

$$E(OU(t+s) | OU(s) = y) = a + (y - a)e^{-\lambda s},$$

$$D(OU(t+s) | OU(t) = y) = b^2(1 - e^{-2\lambda s}). \quad (1)$$

Откуда, в частности, видно, что условная дисперсия  $OU$  от условия не зависит.

Применительно к ценам на недвижимость интерпретируем рассматриваемую модель следующим образом. Листинг цен представляем как таблицу, у которой каждая строка — это временной срез теку-

<sup>2</sup> Марковское свойство — это когда будущее при фиксированном прошлом и настоящем не зависит от прошлого (то есть от прошлого зависит только через настоящее).

<sup>3</sup> Более того, имеет место сходимость  $Z_N(t)$  в функциональном пространстве Скорохода, см. [34].

щих цен предложений ( $N$  – объем среза, меняется от среза к срезу), а каждый столбец – это цена объекта в динамике, возможно, с поправкой на тренд ( $n$  – количество срезов). Мы наблюдаем срезы цен с некоторой периодичностью, определяемой выходом очередного выпуска журнала цен (обычно раз в неделю). К следующему выпуску журнала каждый объект может «уйти» (или кардинально «уйти» его цена), либо остаться с прежней ценой. Объект, или его цена, могут замещаться вновь пришедшим объектом (ценой). Причем, остающихся цен из предыдущего выпуска журнала существенно больше, чем вновь пришедших в последующем выпуске. Каждый ПСИ-процесс представляет собой столбец в таблице. Значения наблюдаются по срезам во времени, в соответствии с датами выхода очередного номера журнала. Все ПСИ-процессы предполагаются независимыми и одинаково распределенными (то есть представляют собой независимые копии одного ПСИ-процесса – в нашем контексте цены, или же логарифма цены). Распределение каждого ПСИ-процесса понимается, как распределение кусочно-постоянной функции с непрерывным временем, непрерывной справа, имеющей конечные пределы слева (такие функции называют Right Continuous Left Limits, RCLL). Пуассоновский процесс выступает в роли точечного процесса, определяющего моменты замещений, в силу его свойства «отсутствия последствий»: сколько бы времени не прошло с момента предыдущего скачка, – следующий скачок наступит через экспоненциальное время.

В нашем подходе мы производим следующую **аппроксимацию логарифмов цен** в «таблице». Пусть  $V(t)$  – цена 1 кв. м. выбранного типа недвижимости в момент времени  $t$ . В каждом срезе по времени  $t$  производим логарифмирование и наблюдаем независимые реализации процесса  $\ln(V(t))$  с добавленным трендом и коэффициентом масштаба  $\sigma > 0$ . Таким образом, в каждом временном срезе  $t$  мы имеем (свою) простую выборку размера, равного количеству цен в данном временном срезе.

Метод построения прогноза распределений цен, их числовых характеристик, предложенный в настоящей статье, основан на специфических свойствах ПСИ-процессов и пределов их нормированных сумм: процессов Орнштейна–Уленбека. Основные общие свойства здесь (как для ПСИ-процесса, так и для процесса Орнштейна–Уленбека) – марковость, вид условных математических ожиданий. Также мы используем вид условной

дисперсии и гауссовское свойство условного распределения процесса Орнштейна–Уленбека.

Постоянный мониторинг цен на рынке недвижимости, с заранее заданной периодичностью, позволяет использовать свойства процессов Орнштейна–Уленбека для прогнозирования будущих распределений цен и их числовых характеристик, таких как средние, медианные, модальные (рыночная стоимость) значения, среднеквадратичное отклонение, коридоры допустимых значений и так далее. Особенностью рынка недвижимости является то, что изменения цен на рынке могут наблюдаться, как правило, не чаще 1 раза в неделю, т.к. большинство печатных рекламных изданий и интернет ресурсы обновляются с такой же периодичностью. Вместе с тем рынок недвижимости имеет замедленную реакцию на внешние источники возмущения макроэкономического характера, так как поиск объекта, достижение договоренностей, оформление сделки, вступление в права собственности требуют значительного времени. В этой связи достаточно разумным представляется мониторинг цен с периодичностью 1 раз в месяц, т.к. именно в течение такого срока изменение цен становится заметным.

### 3. Модель

Рассмотрим случайный процесс  $V(t)$  – динамика цены 1 кв. м. недвижимости во времени и связанный с ним процесс логарифма цены  $Y(t) = \ln(V(t))$ . В качестве основной оценки  $Y(t)$  мы берем среднее по каждому срезу и обозначаем той же буквой (это касается также и  $\hat{Y}(t)$ , введенного ниже). Предположим, у процесса  $Y(t)$  наличие линейного тренда  $E(Y(t)) = \alpha t + \beta$  и постоянного во времени стандартного отклонения  $\sigma(t) = \sigma > 0$ . Центрированный и нормированный процесс

$$\hat{Y}(t) = \frac{Y(t) - \alpha \cdot t - \beta}{\sigma}$$

будем рассматривать как ПСИ-процесс. Отметим, что в сформулированных предположениях у  $\hat{Y}(t)$  математическое ожидание тождественно равно нулю, а дисперсия – единице. При выполнении условия, что распределение (как случайного процесса)  $\hat{Y}(t)$  совпадает с распределением ПСИ-процесса, или процесса Орнштейна–Уленбека, ковариационная функция имеет вид  $cov(\hat{Y}(t)(s+t), \hat{Y}(t)) = \exp(-\lambda s)$  и не зависит от  $t$ . Поскольку наблюдения цен на рынке недвижимости

доступны только в дискретном режиме, то мы говорим о значениях и наблюдениях процесса  $V(t)$  в дискретные моменты времени  $V(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ . В работах [30, 31] доказана слабая сходимость по распределению цен, образованных последовательными сравнениями, к логарифмически нормальному распределению. Таким образом, у нас имеются основания считать последовательность логарифмов цен  $Y(j) = \ln(V(j))$ ,  $j = \overline{0, n-1}$  последовательностью нормально распределенных случайных величин, откуда следует, что все члены соответствующей последовательности  $\hat{Y}(j)$  стандартно нормальны. В этом контексте физическим смыслом членов последовательности  $(\xi_j)$ ,  $j = \overline{0, \infty}$  (из определения ПСИ-процесса) могут служить центрированные, нормированные на стандартное отклонение логарифмы цены 1 кв. м. некоторого объекта, сохраняющего свое значение в течение промежутка времени  $(\tau_i)$ ,  $i = \overline{1, \infty}$ ,  $(i = j + 1)$ , т.е. последовательность вида  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ . В предположении, что средние значения логарифмов цены следует процессу Орнштейна–Уленбека, для любой пары средних значений логарифмов случайных величин  $V(t)$ ,  $V(t + s)$  может быть рассмотрена гипотеза о многомерном совместном нормальном распределении для  $\ln(V(t))$ . Заметим, что в качестве средних значений здесь можно рассматривать квантили (в частности, медиану) и моду. При подтверждении данной гипотезы для любого, наперед заданного  $V(0) = v(0)$  по формулам условной моды, медианы и/или условного математического ожидания (см., например, [36, 37]) могут быть получены прогнозные оценки для модального, медианного и среднего значения случайной величины  $V(s)$ . Здесь момент времени 0 соответствует моменту времени последнего по времени наблюденного распределения цен,  $s$  – время, на которое дается прогноз, его отсчет начинается от момента времени последнего наблюденного распределения.

Для верификации предлагаемой интерпретации следует статистически доказать, подтвердить следующие положения.

- 1) Изучить распределение спейсингов  $(\tau_i)$ , где  $i = \overline{1, n}$  – количество периодов непрерывного нахождения цены в потоке (цель – получить статистическое подтверждение гипотезы об их экспоненциальном распределении, оценить параметр экспоненциального распределения).

- 2) Изучить распределения цен  $V(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$  в каждом срезе (цель – убедиться в логарифмически нормальном виде распределения цен).
- 3) Получить подтверждение независимости копий случайной последовательности  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ , для чего изучить поведение накопленных дисперсий в каждом срезе. Мы будем проверять некоррелированность, которая вместе с гауссовостью даст независимость.
- 4) Проверить свойство совместной нормальности (гауссовости) средних (по каждому срезу) значений  $\hat{Y}(t)$ , что вместе с условием об экспоненциальном виде ковариационной функции подтверждает марковское свойство случайной последовательности, составленной из средних (по каждому срезу) от  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ . Это следует из того, что стационарный гауссовский случайный процесс с корреляцией, убывающей по экспоненте, есть процесс Орнштейна–Уленбека, а значит он обладает марковским свойством. Более того, гауссовость средних подтвердит марковское свойство медианы и моды в зависимости от  $j = \overline{0, n-1}$ .

Заметим, что гауссовость средних по каждому срезу равносильна гауссовости сумм по каждому срезу, нормированных на  $\sqrt{N}$  при нашем диапазоне значений  $N$ : от 254 до 729. Также заметим, что гауссовость средних может следовать из того, что процесс Орнштейна–Уленбека в дискретном времени есть авторегрессия первого порядка, и для некоррелированного шума здесь достаточно показать соответствие нормальному закону.

#### 4. Методика построения прогноза<sup>4</sup>

- 1) Построить ряд из *средних значений* всех срезов по времени, выявить тренд, вычесть его из ряда, получить оценку центрированного и стандартизованного ряда  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ .
- 2) Для оценочного ряда  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ , построить частную ковариационную функцию (partial autocovariance function, PACF), получить подтверждение гипотезы об условной некоррелированности  $\hat{Y}(j)$  с  $\hat{Y}(k)$ ,  $|k - j| > 0$ .
- 3) Для оценочного ряда  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, n-1}$ , построить ковариационную функцию (autocovariance function, ACF), получить подтверждение гипотезы об экспоненциальном виде ковариационной

<sup>4</sup> Ниже мы продолжаем использование уже принятых обозначений, но применительно к обрабатываемым данным.



функции, оценить степенной параметр экспоненты, сравнить с параметром экспоненциального распределения наблюдаемых спейсингов.

- 4) По формулам вида (2)–(5), записанным ниже, построить прогноз.

Введем обозначения:

$$E(\ln(V(0))) = \mu(0), E(\ln(V(s))) = \mu(s),$$

$$\sigma(\ln(V(0))) = \sigma(0), \sigma(\ln(V(s))) = \sigma(s),$$

$$\rho(\ln(V(0)), \ln(V(s))) = e^{-\lambda s}.$$

В предположении, что для средних логарифмов цен имеется линейный тренд вида  $\mu(s) = \alpha \cdot s + \beta$ , и среднеквадратичное отклонение постоянно  $\sigma(s) = \sigma(0) = \sigma$ , получаем для любого заранее заданного значения  $V(0) = v(0)$  прогнозные оценки:

$$\begin{aligned} Mode(V(s)|V(0) = v(0)) &= \\ &= \exp(\alpha \cdot s + \beta + e^{-\lambda s} (\ln(v(0)) - \mu(0) - \\ &\quad - \sigma^2(1 - e^{-2\lambda s}))), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Median(V(s)|V(0) = v(0)) &= \\ &= \exp(\alpha \cdot s + \beta + e^{-\lambda s} (\ln(v(0)) - \mu(0))), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E(V(s)|V(0) = v(0)) &= \\ &= \exp(\alpha \cdot s + \beta + e^{-\lambda s} (\ln(v(0)) - \mu(0)) + \\ &\quad + \frac{1}{2} \sigma^2(1 - e^{-2\lambda s})). \end{aligned} \quad (4)$$

Также приведем формулу, описывающую границы  $V_{L,R}(s)$  коридора ошибок (например, в пределах одного стандартного отклонения):

$$\begin{aligned} V_{L,R}(s) &= \exp(\alpha \cdot s + \beta + \\ &+ e^{-\lambda s} (\ln(v(0)) - \mu(0)) \pm \sigma \cdot \sqrt{1 - e^{-2\lambda s}}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $R, L$  — индексы, обозначающие, соответственно, правую (*right*) и левую (*left*) границы коридора ошибок.

Формулы (2)–(5) являются прямым следствием того важного свойства, что условное распределение процесса ОУ нормально с параметрами, заданными (1).

### 5. Практический пример применения метода

Для примера отобраны данные о продажах квартир в г. Санкт-Петербурге, опубликованные в номерах с 1483 по 1686 Бюллетеня недвижимо-

сти Санкт-Петербурга, охватывающих период с сентября 2011 г. по октябрь 2015 г. Бюллетень недвижимости Санкт-Петербурга издавался в печатном виде до конца 2019 года еженедельно. Номера выбирались по принципу «один номер в месяц», всего 50 номеров. Очевидно, что полная подборка ежемесячного номера содержит смешанную информацию об объектах разных категорий, а для нашего примера необходимы цены на объекты приблизительно одной категории. С этой целью, из общегородской информации отобраны объекты, расположенные в Адмиралтейском районе г. Санкт-Петербурга. Адмиралтейский район отличается обширной застройкой категории «старый фонд», с относительно небольшим количеством объектов класса «премиум» в центральной части города или старого фонда с видом на большую Неву. Премиальные объекты также исключены из выборки. Нас интересуют объекты, находившиеся в журнале хотя бы один период, таким образом, поток состоит из 48 выборок (в дальнейшем будем их называть временными срезами), являющихся эмпирическими выборками реализаций случайных величин  $Y(j) = \ln(V(j)), j = 0, 47$  и охватывает период в 4 года. Стандартные отклонения всех срезов потока имеют среднее значение  $\sigma = 0,22$  с незначительными изменениями во времени (стандартное отклонение от своего среднего (0,22) имеет порядок 0,01). Учитывая незначительные колебания стандартных отклонений, будем считать стандартное отклонение в потоке постоянным, равным  $\sigma = 0,22$  и строить прогноз при таком условии.

### 6. Распределение спейсингов

Для каждого значения цены подсчитывалось количество периодов, в течение которых данная цена сохранялась от среза к срезу без перерыва. Полученное число является длиной спейсинга  $\tau$ , соответствующего данной цене, выраженной в целом количестве периодов (один период — один месяц), принимающего целые значения от 1 до 48. Затем строим эмпирическое распределение спейсингов по длине (1, 2, 3, 4, ... и т.д.), а также их относительную частоту к общему количеству всех спейсингов. Накопленные относительные частоты дают наблюдаемые значения эмпирической функции распределения для длины спейсинга. Наше предположение заключается в том, что теоретическое распределение спейсингов подчиняется экс-

по экспоненциальному закону распределения<sup>5</sup>, то есть  $F(t) = P(l \leq t) = 1 - e^{-\lambda t}$ , где  $l$  – случайная (теоретическая) длина спейсинга. Рассматривается дополнительная функция распределения вероятностей  $P(l > t) = 1 - F(t) = e^{-\lambda t}$ . Очевидно, что  $\ln(1 - F(t)) = -\lambda \cdot t$ , то есть логарифм дополнительной функции линейно зависит от  $t$ . При этом  $\ln(1 - F(0)) = 0$ . Это свойство используется для подбора параметра  $\lambda$  экспоненциального распределения спейсингов. На рисунке 2 показаны наблюдаемые значения функции  $1 - F(t)$  при значениях  $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  и их аппроксимация экспонентой вида  $e^{-\lambda t}$ .

Оценка параметра  $\lambda$  получена библиотечной функцией `lm` статистического пакета *R*, значение  $\lambda = 0,6510$ .

### 7. Распределения цен

На рисунке 3 показаны эмпирические распределения цен 1 кв. м. в первых шести срезах  $V(j), j = 0, 5$ .

На рисунке 4 показаны значения  $p$ -value тестов Колмогорова–Смирнова на соответствие эмпирических распределений в 48 срезах теоретическому логарифмически нормальному распределению, с подобранными параметрами.

Таким образом, нет оснований отвергнуть гипотезу о логарифмически нормальных распределениях цен во всех 48 срезах (или нормальных распределениях логарифмов цен).

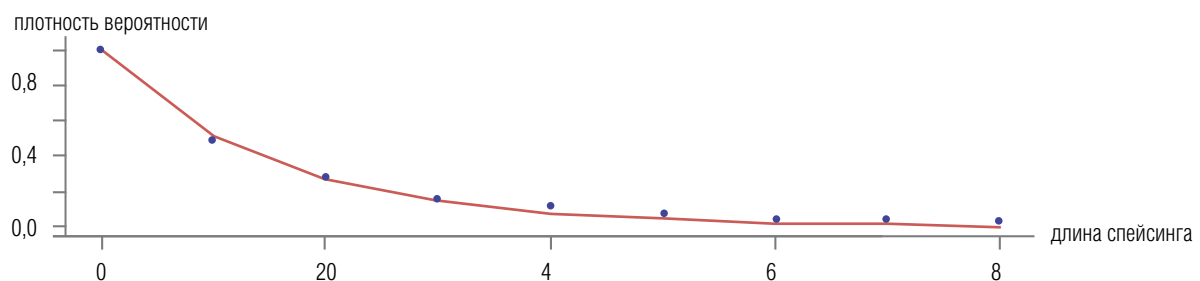


Рис. 2. Наблюдаемые значения дополнительной функции  $1 - F(t)$  при значениях  $t = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$  (точки) и их аппроксимация экспонентой вида  $e^{-\lambda t}$ .

### 8. Независимость копий случайной последовательности

Рассмотрим независимость копий случайной последовательности  $Y(j) = \ln(V(j)), j = 0, 47$ . Сначала отметим, что количество копий в каждом срезе различно и меняется от 254 до 729. Известно, что дисперсия суммы двух случайных величин равна сумме дисперсий плюс удвоенная ковариация. Нам требуется свидетельство некоррелированности записей в срезах. С этой целью изучим поведение накопленных дисперсий в каждом из 48 срезов  $\ln(V(j)), j = 0, 47$ .

В выборке каждого среза проводятся следующие действия:

- ◆ формируется подвыборка, путем случайного выбора фиксированного количества элементов из выборки (среза), (например, 20, минимальный размер выборки в срезе 254, максимальный 729), подсчитывается дисперсия;
- ◆ из оставшихся элементов выборки выбираются следующие 20 элементов, подсчитывается дисперсия, результат прибавляется к дисперсии, полученной на предыдущем шаге;
- ◆ процедура продолжается до исчерпания выборки (на рисунке 5 по горизонтальной оси отмечается количество таких шагов).

Затем рассматривается зависимость накопленной таким образом дисперсии от количества шагов. Линейный характер накопленной дисперсии

<sup>5</sup> Т.к. мы рассматриваем срезы в дискретные моменты времени, то мы наблюдаем геометрически распределенные эмпирические спейсинги, которые являются проекцией непрерывных показательных спейсингов на дискретные моменты времени  $0, 1, 2, 3, \dots$ . Если случайная величина  $\xi \in \text{exp}(\lambda)$ , то  $[\xi] \in \text{Geom}(p)$  (где квадратные скобки обозначают целую часть числа) и в нашем случае  $p = 1 - e^{-\lambda}$ .

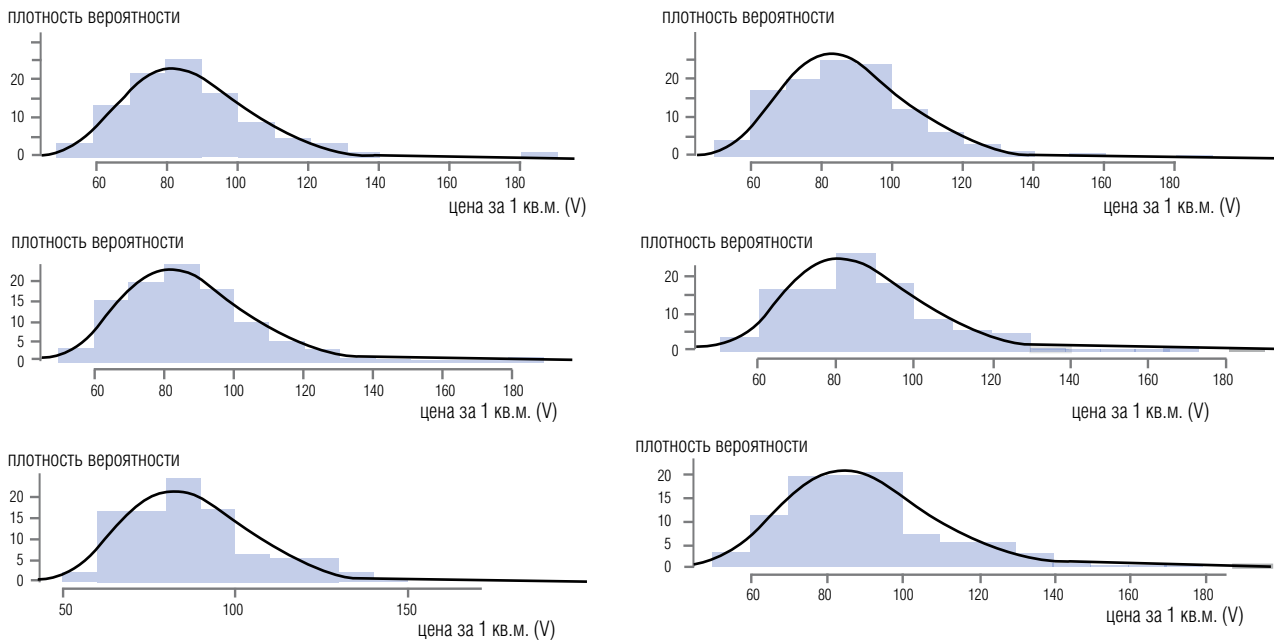


Рис. 3. Эмпирические распределения цен 1 кв. м. в первых шести срезах  $V(j), j = \overline{1, 6}$ , линия – плотность модельного логарифмически нормального распределения.

[1]	0.32078110	0.20548610	0.40557570	0.32223009	0.26319875	0.22332022
[7]	0.16753867	0.12097452	0.07531444	0.08037770	0.15068216	0.13773904
[13]	0.15556880	0.76906843	0.26749012	0.44678095	0.30453727	0.46525538
[19]	0.27115174	0.42116513	0.21523598	0.29461480	0.14404826	0.85821447
[25]	0.60624471	0.44881713	0.47551761	0.27010204	0.30031997	0.11477638
[31]	0.11761958	0.35463007	0.41267475	0.25858806	0.09053699	0.27756816
[37]	0.13531391	0.17893827	0.68449172	0.91269908	0.53167338	0.16490183
[43]	0.40555451	0.24649549	0.11753382	0.17232872	0.08156706	0.25339992

Рис. 4. Скриншот окна статистического пакета R со значениями  $p$ -value тестов Колмогорова–Смирнова на соответствие эмпирических распределений в 48 срезах  $V(j), j = \overline{0, 47}$  теоретическому логарифмически нормальному распределению с подобранными параметрами.

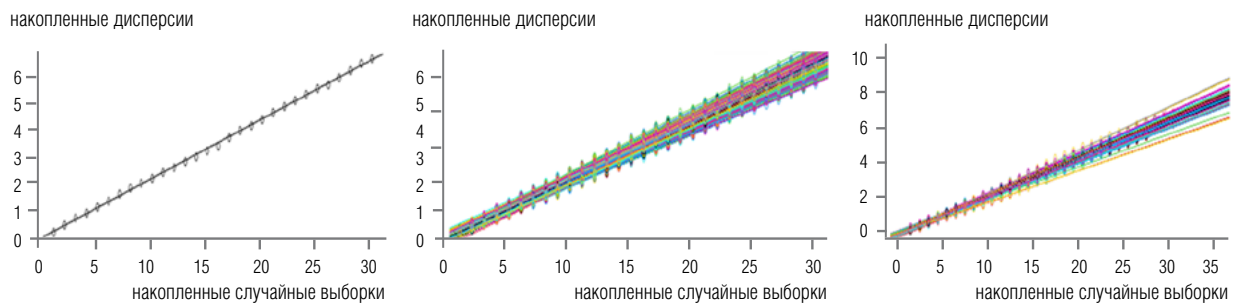


Рис. 5. Левый рисунок – накопленные дисперсии среза  $\ln(V(1))$ , рисунок в центре – накопленные дисперсии среза  $\ln(V(1))$  при 1000 повторениях процедуры случайного отбора подвыборки, правый рисунок – накопленные дисперсии всех срезов  $\ln(V(j)), j = \overline{0, 47}$ .



свидетельствует об отсутствии корреляционного слагаемого в полученных суммах. Поскольку в нашем случае суммируемые величины подчиняются нормальному закону распределения, некоррелируемость свидетельствует о независимости.

На *рисунке 5* показано поведение накопленных дисперсий в первом срезе, поведение накопленных дисперсий в первом срезе при повторениях процедуры случайного выбора 1000 раз, поведение накопленных дисперсий во всех остальных срезах.

### 9. Построение прогноза

Для построения прогноза следует выявить линейный тренд в данных, оценить параметр ПСИ-процесса  $\lambda$ , проверить совместную нормальность средних значений, которая даст подтверждение марковского свойства наблюдаемого процесса<sup>6</sup>. Стандартное отклонение процесса принято выше постоянным и равным  $\sigma = 0,22$ .

На *рисунке 6* показан ряд средних значений логарифмов  $Y(j) = \ln(V(j), j = \overline{0, 47}$ .

Линейный тренд оценен с применением библиотечной функции  $\text{lm}$  статистического пакета  $R$ . Удаляем линейный тренд, нормируем данные на стандартное отклонение  $\sigma = 0,22$ , усредняем данные в каждом срезе.

Получаем ряд (*рис. 7*) средних значений процесса  $\hat{Y}(j), j = \overline{0, 47}$ . График визуально соответствует графику траектории стационарного процесса.

На *рисунке 8* показан график автокорреляционной функции для ряда средних значений процесса  $\hat{Y}(j), j = \overline{0, 47}$ , с лагами до 7 и его аппроксимация экспонатной вида  $e^{-\lambda \cdot s}$ .

Оценка параметра  $\lambda = 0,6502$  получена применением библиотечной функции  $\text{lm}$  статистического пакета  $R$ .

На *рисунке 9* показан график частной автокорреляционной функции для ряда средних значений процесса  $\hat{Y}(j), j = \overline{0, 47}$  с лагами до 7.

### 10. Проверка совместной нормальности средних значений $\hat{Y}(j), j = \overline{0, 47}$

В случае с постоянно замещающимися объектами и ценами, различным объемом выборок в каждом срезе, проверка совместной нормальности библиотечными тестами (такими как, например, тесты пакета MVN [38, 39]) представляет значительные трудности. Для проверки на совместную нормальность нормированных сумм средних нашего ПСИ-процесса используем вид ковариационной функции и факт сходимости нормированных сумм ПСИ-процессов к процессу Орнштейна–Уленбека. Здесь мы опираемся на представление процесса Орнштейна–Уленбека с дискретным временем в виде авторегрессии первого порядка с гауссовским белым шумом.

Пусть  $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$  – независимые одинаково распределенные стандартно нормальные случайные величины ( $\varepsilon_j \in N(0, 1), j = \overline{0, +\infty}$ ). Зададим процесс Орнштейна–Уленбека с дискретным временем и скоростью  $\lambda > 0$  в рекуррентном виде:

$$\begin{cases} u_0 = \varepsilon_0 \\ u_{n+1} = e^{-\lambda} u_n + \sqrt{1 - e^{-2\lambda}} \varepsilon_{n+1} \end{cases}$$

Очевидно, что  $u_j \in N(0, 1), j = \overline{0, +\infty}$ . Можно записать

$$\begin{cases} \varepsilon_0 = u_0 \\ \varepsilon_{n+1} = \frac{u_{n+1} - e^{-\lambda} u_n}{\sqrt{1 - e^{-2\lambda}}} \end{cases} \quad (6)$$

Количество элементов  $u$  выборок в каждый момент дискретного времени обозначим  $N(j), j = \overline{0, +\infty}$  и положим

$$u_j = \frac{1}{\sqrt{N(j)}} \sum_{i=1}^{N(j)} \hat{Y}_i(j), \quad j = \overline{0, +\infty} \quad (7)$$

Применяя формулы (6) к величинам (7), получаем оценки  $\hat{\varepsilon}_0, \hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2, \dots$  для  $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$ . Из независимости и нормальности величин  $\varepsilon_0, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots$  следует совместная нормальность величин (7).

Данные состоят из 48 выборок (каждая разной длины), соответствующих 48 дискретным моментам времени. Для каждой из них построим  $\hat{Y}(j), j = \overline{0, 47}$ , нормированные суммы средних (7), оценки  $\hat{\varepsilon}_0, \hat{\varepsilon}_1, \hat{\varepsilon}_2, \dots, \hat{\varepsilon}_{47}$  (6). Для этого надо выявить тренд (показано выше), оценить параметр  $\lambda$  (мы его

<sup>6</sup> На марковское свойство также указывает вид PACF на *рис. 9*, где ровно один значимый пик в единице.

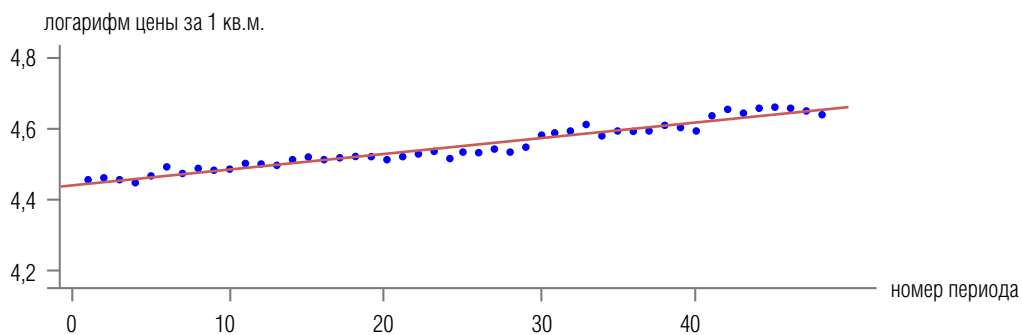


Рис. 6. Ряд из средних значений для  $Y(j) = \ln(V(j))$ ,  $j = \overline{0, 47}$ ,  
уравнение линии тренда  $4,443 + 0,00432 \cdot t$ ,  
где  $t$  – время в периодах (1 период = 1 месяц) от начала наблюдений (при  $j = 1$  значение  $t = 1/4$ ).

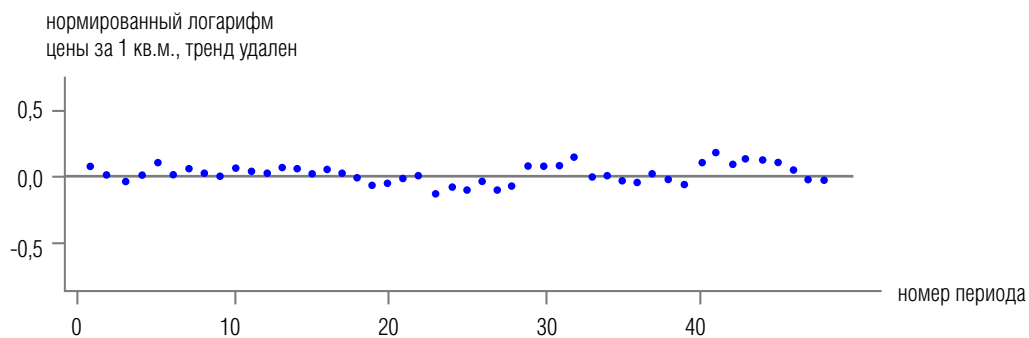


Рис. 7. Ряд средних значений процесса  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, 47}$ .

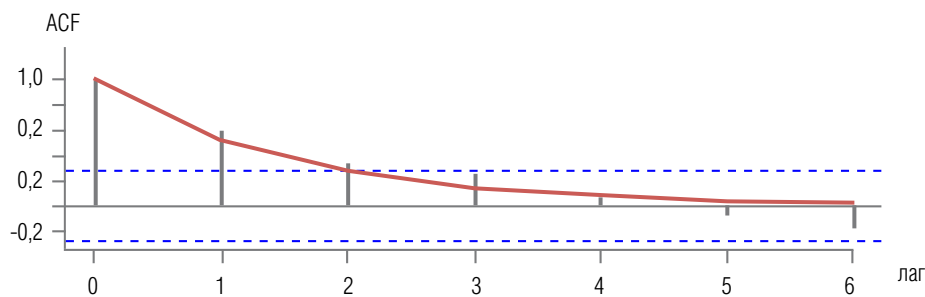


Рис. 8. График автокорреляционной функции для ряда средних значений процесса  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, 47}$ , с лагами до 7 и его аппроксимация экспонатной вида  $e^{-0,6502 \cdot s}$ .

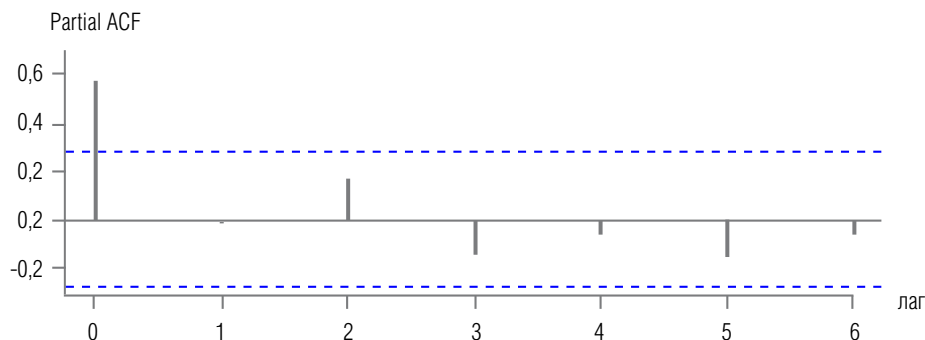


Рис. 9. График частной автокорреляционной функции для ряда средних значений процесса  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, 47}$  с лагами до 7.

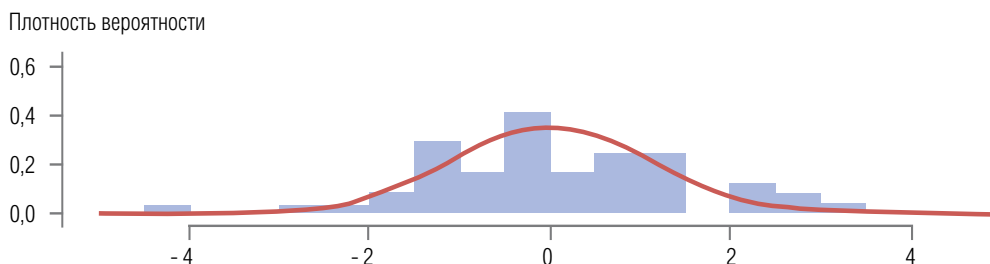


Рис. 10. Эмпирическое распределение величин  $\hat{\epsilon}_j, j = \overline{0, 47}$  и его аппроксимация плотностью нормального распределения. Параметры модельного распределения  $\mu = 0,0267, \sigma = 1,1$ .

получили дважды,  $\lambda \approx 0,65$ ), стандартное отклонение принято ранее постоянным  $\sigma = 0,22$ . На рисунке 10 показано эмпирическое распределение величин  $\hat{\epsilon}_j, j = \overline{0, 47}$  и его аппроксимация плотностью нормального распределения. На рисунке 11 показан скриншот результатов статистических тестов на нормальность величин  $\hat{\epsilon}_j, j = \overline{0, 47}$  тестами Колмогорова–Смирнова, Шапиро, Андерсена–Дарлингга.

Таким образом, проведенные проверки позволяют нам подтвердить следующие гипотезы:

- 1) спейсинги ( $\tau_i$ ),  $i = \overline{1, 48}$  подчиняются экспоненциальному закону распределения с параметром  $\lambda \approx 0,65$ ;
- 2) каждая компонента дискретного процесса  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, 47}$  стандартно нормальна;
- 3) наблюдаемые копии случайного ряда  $\ln(V(j))$  являются независимыми ( $i$  – номер копии,  $j$  – номер среза);

- 4) автокорреляционная функция может быть аппроксимирована (рис. 8) функцией экспоненциального вида  $e^{-\lambda s}$ , с параметром  $\lambda \approx 0,65$ , таким образом коэффициент корреляции для прогноза на 6 шагов (то есть, на полгода вперед) может быть установлен как  $e^{-0,65 \cdot 6} = e^{-3,9}$ ;
- 5) вид частной автокорреляционной функции, представленной на рисунке 9, указывает на условную некоррелированность  $\hat{Y}(j)$  с  $\hat{Y}(k)$ ,  $|k - j| > 1$ ,  $j = \overline{0, 47}$  при условии, что фиксированы значения  $\hat{Y}$  в моменты времени строго между  $k$  и  $i$ ;
- 6) марковское свойство дискретного процесса  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, 47}$  следует из совместной нормальности и вида ковариационной функции. Марковское свойство также подтверждается видом частной автоковариационной функции.

## 11. Прогноз

Приведенные выше проверки позволяют установить соответствие наблюдаемых данных модели ПСИ-процесса. Марковское свойство наблюдаемого дискретного процесса  $\hat{Y}(j)$ ,  $j = \overline{0, 47}$  позволяет строить прогноз только по последнему распределению случайной величины  $V$  (стоимость 1 кв. м. вторичной жилой недвижимости в Адмиралтейском районе, в 48 периоде, соответствующем сентябрю 2015 года). Эмпирическое распределение случайной величины  $V(48)$  удовлетворительно аппроксимируется логарифмически нормальным распределением с параметрами  $\mu(0) = 4,64$ ,  $\sigma = 0,22$  ( $p$ -value теста Колмогорова–Смирнова равно 0,2534, см. рис. 4).

Математическое ожидание модельного распределения в 48 периоде равно  $e^{4,64+0,5 \cdot 0,22^2} = 106,081$  тыс. руб. за 1 кв. м.; медиана модельного распределения в 48 периоде равна  $e^{4,64} = 103,544$  тыс. руб. за

```
> ks.test(eps, "pnorm", mean=0.0267, sd=1.1)
      Exact one-sample Kolmogorov-Smirnov test
data:  eps
D = 0.096711, p-value = 0.7239
alternative hypothesis: two-sided

> shapiro.test(eps)
      Shapiro-Wilk normality test
data:  eps
W = 0.97975, p-value = 0.5684

> ad.test(eps)
      Anderson-Darling normality test
data:  eps
A = 0.25751, p-value = 0.7054
```

Рис. 11. Скриншот результатов статистических тестов Колмогорова–Смирнова, Шапиро, Андерсена–Дарлингга. Результаты тестов подтверждают гипотезу нормальности шума (6).

1 кв. м.; мода модельного распределения в 48 периоде равна  $e^{4,64-0,22^2} = 98,652$  тыс. руб. за 1 кв. м.; отметим, что среднее значение цены превышает наиболее вероятное на 7,5%, минимум цены 1 кв. м. в эмпирической выборке в 48 периоде 63,265 тыс. руб.; максимум цены 1 кв. м. в эмпирической выборке в 48 периоде 172,556 тыс. руб.

Корреляционная функция нормированных сумм дискретного процесса  $\hat{Y}(j), j = \overline{0, 47}$  имеет экспоненциальный вид с параметром  $\lambda = 0,65$ . Причем, это значение мы получили дважды: как параметр экспоненты, аппроксимирующей корреляционную функцию, и как параметр экспоненциального распределения спейсингов.

Коэффициент корреляции для логарифма пары произвольных сечений процесса  $V(t)$ , образующих двумерный случайный вектор  $(V(0), V(s))$ , равен  $\rho(\ln(V(0)), \ln(V(s))) = e^{-0,65s}$ . Формулы (2)–(4) имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{Mode}(V(s)|V(0) = v(0)) &= \\ &= \exp(0,00432 \cdot s + 4,443 + e^{-0,65s} (\ln(v(0)) - \mu(0) - \\ &\quad - 0,22^2(1 - e^{-2 \cdot 0,65s})), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Median}(V(s)|V(0) = v(0)) &= \\ &= \exp(0,00432 \cdot s + 4,443 + e^{-0,65s} (\ln(v(0)) - \mu(0))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E(V(s)|V(0) = v(0)) &= \\ &= \exp(0,00432 \cdot s + 4,443 + e^{-0,65s} (\ln(v(0)) - \mu(0)) + \\ &\quad + \frac{1}{2} 0,22^2(1 - e^{-2 \cdot 0,65s})). \end{aligned}$$

Формула (5), описывающая границы  $V_{L,R}(s)$  коридора ошибок (например, в пределах одного стандартного отклонения), принимает вид:

$$\begin{aligned} V_{L,R}(s) &= \exp\left(0,00432 \cdot t + 4,443 + \right. \\ &\quad \left. + e^{-0,65s} (\ln(v(0)) - \mu(0)) \pm 0,22 \cdot \sqrt{1 - e^{-2 \cdot 0,65s}}\right). \end{aligned}$$

Для любого объекта цена 1 кв. м. которого  $V(0) = v(0)$  была выставлена в последнем периоде (как указано выше, соответствует сентябрю 2015 года), может быть сделан прогноз на следующие 6 периодов.

Построим прогноз на 6 периодов (на полгода вперед) для объекта, у которого в последнем периоде была цена 106,081 тыс. руб. за 1 кв. м. (средняя цена по срезу с номером 47).

На *рисунке 12* показан прогноз для значения цены  $v(0) = 106,081$  (тыс. руб. за 1 кв. м.)

На *рисунке 12* точками отмечены фактические средние значения цен 1 кв. м. в этом же множестве объектов недвижимости (масс-маркет, Адмиралтейский район), которые составляют:

в октябре 2015 г.	103,100 тыс. руб. за 1 кв. м.,
в ноябре 2015 г.	103,492 тыс. руб. за 1 кв. м.,
в декабре 2015 г.	103,247 тыс. руб. за 1 кв. м.,
в январе 2016 г.	102,027 тыс. руб. за 1 кв. м.,
в феврале 2016 г.	101,044 тыс. руб. за 1 кв. м.,
в марте 2016 г.	102,046 тыс. руб. за 1 кв. м.

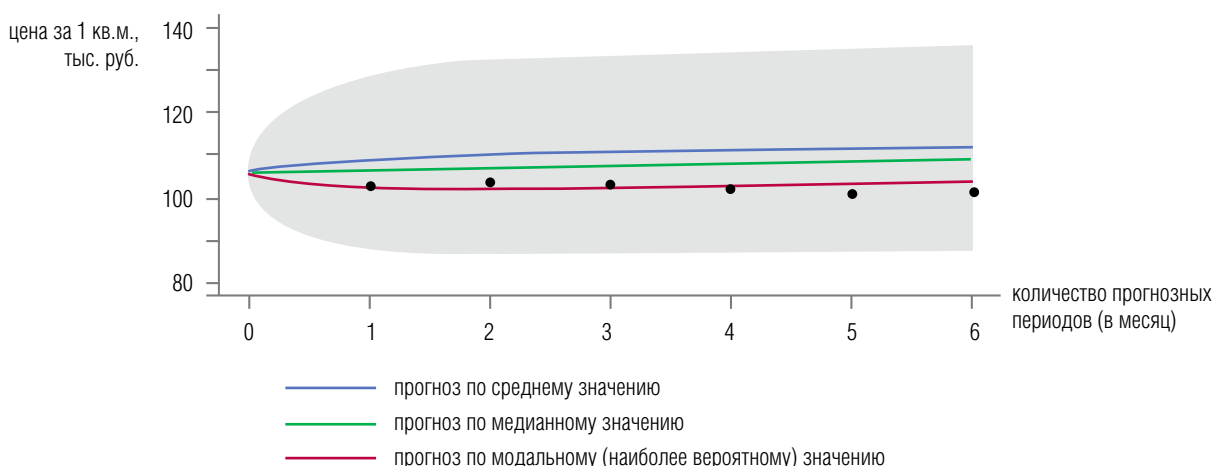


Рис. 12. Прогноз для значения цены  $v(0) = 106,081$  тыс. руб. за 1 кв. м. – средней цены в последнем срезе наблюдений. Серый фон – коридор в пределах одного стандартного отклонения.

### Заключение

1. Проведенный комплекс проверок позволил установить следование изучаемых данных модели ПСИ-процесса.
2. На *рис. 11* показан прогноз для цены, равной среднему значению в последнем срезе наблюдений. Черными точками показаны фактически наблюдавшиеся средние значения цены 1 кв. м. в последующих 6 месяцах, они расположены вблизи линии модального прогноза, что служит хорошей верификацией прогноза по наиболее вероятному значению. Линия модальных значений указывает на наиболее вероятное значение будущей цены, при условии, что цена в последнем срезе равнялась среднему значению. Это следствие свойства логарифмически нормального распределения цен и того, что усредненные значения логарифмов цен следуют процессу Орнштейна–Уленбека.
3. Параметр  $\lambda = 0,65$  указывает, в том числе, на среднее время, за которое происходит скачок цены объекта в наблюдаемом секторе рынка, он составляет  $1/\lambda = 1,54$  периода. В представленном примере периодом является 1 месяц.
4. Основные преимущества прогнозирования, основанного на свойствах ПСИ-процессов:
  - ◆ стандартное отклонение прогноза стабилизируется с течением времени на уровне постоянной дисперсии случайного процесса, в отличие от моделей скользящего среднего, накапливающих ошибку прогноза на каждом шаге;
  - ◆ возможность построить прогноз не только для средних значений, но и для любого объекта, выставленного на продажу в последнем временном периоде наблюдений по некоторой цене. ■

### Литература

1. Фридман Дж., Ордуэй Н. Анализ и оценка приносящей доход недвижимости. М.: Дело, 1997.
2. Стерник Г.М., Стерник С.Г. Методология прогнозирования Российского рынка недвижимости // Механизация строительства. 2018. № 8(830). С. 57.
3. Стерник Г.М., Стерник С.Г. Рынок жилой недвижимости Москвы и Московской области: текущее состояние и ценовой прогноз // Управление развитием территории. 2015. № 4.
4. Стерник Г.М., Печенкина А.В. Прогноз цен предложения квартир на российском рынке жилья (макроэкономический подход) // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2007. № 10(73). С.11–18.
5. Стерник Г.М., Стерник С.Г., Свиридов А.В. Развитие и совершенствование методов прогнозирования на рынке жилой недвижимости // Урбанистика и рынок недвижимости. 2014. № 1. С. 53–93.
6. Алексеева М.О., Пайдыганова М.Ю. Анализ и прогнозирование цен на квартиры в республике Мария Эл // Аллея науки. 2019. Т. 1. № 9(36). С. 65–70.
7. Дробышевский С.М. Анализ возможности возникновения «пузыря» на российском рынке недвижимости // Научные труды ИЭПП. 2009. № 128.
8. Евстафьев А.И., Гордиенко В.А. Прогнозирование индикаторов рынка недвижимости с применением нейронных сетей // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Общественные науки. 2009. № 5. С. 83–89.
9. Зенчик А.С., Морозова Н.Н. Прогнозирование цен на недвижимость с учетом сезонности // Молодежный научный форум: общественные и экономические науки. 2016. № 11(40). С. 397–402.
10. Кошкин В.С., Боронина Н.Ю. Прогнозирование рыночной стоимости коммерческой недвижимости на основе показателей экономического развития территории г. Барнаул // Реализация приоритетных программ развития АПК. Сборник научных трудов по итогам X Международной научно-практической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки РФ и КБР профессора Б.Х. Жерукова, Нальчик, 2022. С. 312–315.
11. Молчанова М.Ю., Печенкина А.В. Особенности использования методов фундаментального и технического анализа при прогнозировании цен на рынке недвижимости региона // Вестник Пермского университета. Серия «Экономика». 2011. № 3(10). С. 53–54.
12. Никитина Н.С. Прогнозирование индекса цен на недвижимость с учетом сезонности // Экономическое развитие России. 2022. Т. 29. № 6. С. 23–28.
13. Нурмухаметов И.М. Анализ и прогнозирование цен на недвижимость в республике Марий-Эл // Промышленное развитие России: проблемы, перспективы. Труды XII Международной научно-практической конференции преподавателей, ученых, специалистов, аспирантов, студентов: в 3 томах. Кафедра экономики предприятия, 2014. С. 97–104.
14. Печенкина А.В. Использование многоуровневой факторной модели при прогнозировании ситуации на региональном рынке недвижимости (на примере Пермского края) // Имущественные отношения в Российской Федерации. 2010. № 11(110). С. 57–72.

15. Питулин С.С. Построение ARIMA моделей для анализа динамики цен на недвижимость в Смоленской области // Интернаука. 2019. № 20-1(102). С. 63–67.
16. Рубинштейн Е.Д., Осипенко Н.С. Анализ рынка недвижимости и его прогнозирование // Теория и практика общественного развития. 2015. № 12. С. 140–143.
17. Clapp J.M., Giaccotto C. Evaluating house price forecasts // *Journal of Real Estate Research*. 2002. Vol. 24. No. 1. P. 1–25.
18. Crawford G.W., Fratantoni M.C. Assessing the forecasting performance of regime-switching, ARIMA and GARCH models of house price // *Real Estate Economics*. 2003. Vol. 31 No. 2. P. 223–243.
19. Geltner D.M., Miller N.G., Clayton J., Eichholtz P. *Commercial real estate analysis and investments*. South-Western Educational Pub, 2006.
20. Gotham K.F. The secondary circuit of capital reconsidered: Globalization and the U.S. real estate sector // *American Journal of Sociology*. 2006. Vol. 112. No. 1. P. 231–275. <https://doi.org/10.1086/502695>
21. Green R.K. Imperfect information and the housing finance crisis: A descriptive overview // *Journal of Housing Economics*. 2008. Vol. 17. No. 4. P. 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.jhe.2008.09.003>
22. Green R.K. Follow the leader: How changes in residential and nonresidential investment predict changes in GDP // *Real Estate Economics*. 1997. Vol. 25. No. 2. P. 253–270.
23. Ласкин М.Б., Черкесова П.А., Сравнение рыночных и кадастровых данных для прогнозирования рыночной стоимости объектов недвижимости // *Статистика и экономика*. 2020. Том 17. № 4. С. 44–54.
24. Федоров Н.И. Прогнозирование цен на жилую недвижимость на рынке Челябинска методами машинного обучения // *Студент и научно-технический прогресс. Материалы XLIV научной конференции молодых ученых, Челябинск, 2020*. С. 223–226.
25. Li Y., Xiang Z., Xiong T. The behavioral mechanism and forecasting of Beijing housing prices from multiscale perspective // *Discrete Dynamics in Nature and Society*. 2020. Vol. 2020. Article ID 5375206. <https://doi.org/10.1155/2020/5375206>
26. Ohnishi T., Mizuno T., Shimizu C., Watanabe T. On the evolution of the house price distribution // *Columbia Business School. Center of Japanese Economy and Business. Working Paper Series*. 2011. No. 296. P. 1–20.
27. Raymond Y.C.T. An application of the ARIMA model to real estate prices in Hong-Kong // *Journal of Property Finance*. 1997. Vol. 8. No. 2. P. 152–163.
28. Singh Y. *Model for forecasting price of houses in city of Stillwater*. M.S. dissertation. Oklahoma State University, 2005.
29. Sa'at N.F., Maimun N.H.A., Idris N.H. Enhancing the accuracy of Malaysian house price forecasting: A comparative analyses on the forecasting performance between the hedonic price model and artificial neural network model // *Planning Malaysia*. 2021. Vol. 19. No. 3. P. 249–259.
30. Rusakov O., Laskin M., Jaksumbaeva O. Pricing in the real estate market as a stochastic limit. Log Normal approximation // *International Journal of the Mathematical models and methods in applied sciences*. 2016. Vol. 10. P. 229–236.
31. Rusakov O., Laskin M., Jaksumbaeva O., Ivakina A. «Pricing in real estate market as a stochastic limit. Lognormal approximation» // *2015 Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015. P. 235–239. <https://doi.org/10.1109/MCSI.2015.4848>
32. Aitchinson J., Brown J.A.C. *The Lognormal distribution with special references to its uses in economics*. Cambridge: University Press, 1963.
33. Русаков О.В. Псевдо-пуассоновские процессы со стохастической интенсивностью и класс процессов, обобщающих процесс Орнштейна–Уленбека // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2017. Т. 4. № 2. С. 247–257.
34. Yakubovich Y., Rusakov O., Gushchin A. Functional limit theorem for the sums of PSI-processes with random intensities // *Mathematics*. 2022. Vol. 10. No. 21. 3955. <https://doi.org/10.3390/math10213955>
35. Feller W. *An introduction to probability theory and its applications*. Wiley, 1971.
36. Ласкин М.Б. Корректировка рыночной стоимости по ценообразующему фактору «площадь объекта» // *Имущественные отношения в Российской Федерации*. 2017. № 8(191). С. 86–99.
37. Ласкин М.Б. Определение скидки на торг по рыночным данным и кадастровой стоимости // *Бизнес-информатика*. 2018. № 3(45). С. 53–61. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2018.3.53.61>
38. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. MVN: An R package for assessing multivariate normality // *The R Journal*. 2014. Vol. 6/2. P. 151–162.
39. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. Package 'MVN'. 2022. [Электронный ресурс]: <https://cran.r-project.org/web/packages/MVN/MVN.pdf> (дата обращения 30.11.2023).

### Об авторах

#### Ласкин Михаил Борисович

кандидат физико-математических наук;

доцент, с.н.с., Лаборатория интеллектуальных систем, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН, Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 14 линия, д. 39;

E-mail: laskinmb@yahoo.com

ORCID: 0000-0002-0143-4164

#### Русаков Олег Витальевич

кандидат физико-математических наук;

доцент, Кафедра теории вероятностей и математической статистики, Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9;

E-mail: ovirusakov@yahoo.co.uk

ORCID: 0000-0001-7444-9896

# Prediction of distributions of unit prices for real estate properties on the basis of the characteristics of PSI-processes

#### Mikhail B. Laskin <sup>a</sup>

E-mail: laskinmb@yahoo.com

#### Oleg V. Rusakov <sup>b</sup>

E-mail: ovirusakov@yahoo.co.uk

<sup>a</sup> Saint Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences  
Address: 39, 14th Line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg 199178, Russia

<sup>b</sup> Saint Petersburg State University  
Address: 7/9, Universitetskaya Nab., St. Petersburg 199034, Russia

### Abstract

Real estate market price forecasting is always in the focus of interests of scientists-economists, market analysts, market participants (sellers and buyers), marketing services of building complex enterprises, analysts working for banks and insurance companies and investors. Under present day conditions, the price behavior of properties on real estate markets takes especially important meaning subject to the influence of such factors as changes in the structure of household incomes, changes in mortgage rates and their availability, dynamic changes in the macroeconomic and other external socio-economic and political type factors. However, unlike the financial and securities markets, the real estate market is always characterized by a delayed reaction to external perturbations, often up to half a year, which allows us to hope for an appropriate construction of forecasts, at least in time for the delayed reaction. Traditional autoregressive forecasting methods are characterized by rapidly increasing forecast variance, because they assume a factor of stochastic volatility.



This paper proposes a model and method of forecast construction based on stochastic processes of the “Poisson random index” having a short time for reaching a stationary stable variance. The model is based on the “principle of replacements” of current prices with new ones. We analyze in detail an example of the application of the “principle of replacements” for construction of price forecasts on secondary residential real estate in St. Petersburg which is based on data of four-year observations of offer prices.

**Keywords:** real estate price forecast, log-normal price distribution, pseudo-Poisson process, Poisson random index process, Ornstein–Uhlenbeck process

**Citation:** Laskin M.B., Rusakov O.V. (2023) Prediction of distributions of unit prices for real estate properties on the basis of the characteristics of PSI-processes. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 7–24. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.7.24

### References

1. Friedman J., Ordway N. (1997) *Analysis and assessment of income-generating real estate*. M.: Delo (in Russian).
2. Sternik G.M., Sternik S.G. (2018) Methodology for forecasting the Russian real estate market, *Mechanization of construction*, no. 8(830), p. 57 (in Russian).
3. Sternik G.M., Sternik S.G. (2015) Residential real estate market in Moscow and the Moscow region: current state and price forecast. *Territory Development Management*, no. 4 (in Russian).
4. Sternik G.M., Pechenkina A.V. (2007) Forecast of supply prices for apartments on the Russian housing market (macroeconomic approach). *Property Relations in the Russian Federation*, no. 10(73), pp. 11–18 (in Russian).
5. Sternik G.M., Sternik S.G., Sviridov A.V. (2014) Development and improvement of forecasting methods in the residential real estate market. *Urban Studies and Real Estate Market*, no. 1, pp. 53–93 (in Russian).
6. Alekseeva M.O., Paidiganova M.Yu. (2019) Analysis and forecasting of prices for apartments in the Republic of Maria El. *Alleya Nauki*, vol. 1, no. 9(36), pp. 65–70 (in Russian).
7. Drobyshevsky S.M. (2009) Analysis of the possibility of a “bubble” in the Russian real estate market. *IEP Scientific Works*, no. 128 (in Russian).
8. Evstafiev A.I., Gordienko V.A. (2009) Forecasting indicators of the real estate market using neural networks. *University News. North-Caucasian Region. Social Sciences Series*, no. 5, pp.83–89 (in Russian).
9. Zenchik A.S., Morozova N.N. (2016) Forecasting real estate prices taking into account seasonality. *Youth Scientific Forum: Social and Economic Sciences*, no. 11(40), pp. 397–402 (in Russian).
10. Koshkin V.S., Boronina N.Yu. (2022) Forecasting the market value of commercial real estate based on indicators of economic development of the territory of Barnaul. *Implementation of priority programs for the development of the agro-industrial complex. Collection of scientific papers based on the results of the X International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of the Honored Scientist of the Russian Federation and Kabardino-Balkaria, Professor B.Kh. Zherukova, Nalchik*, pp. 312–315 (in Russian).
11. Molchanova M.Yu., Pechenkina A.V. (2011) Features of using methods of fundamental and technical analysis when forecasting prices on the regional real estate market. *Bulletin of Perm University. Series “Economics”*, no. 3(10), pp. 53–54 (in Russian).
12. Nikitina N.S. (2022) Forecasting the real estate price index taking into account seasonality, *Economic Development of Russia*, vol. 29, no. 6, pp. 23–28 (in Russian).
13. Nurmukhametov I.M. (2014) Analysis and forecasting of real estate prices in the Mari-El Republic. *Industrial development of Russia: problems, prospects. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference of teachers, scientists, specialists, graduate students, students*, pp. 97–104 (in Russian).
14. Pechenkina A.V. (2010) Using a multi-level factor model when predicting the situation in the regional real estate market (using the example of the Perm Territory). *Property Relations in the Russian Federation*, no. 11(110), pp. 57–72 (in Russian).
15. Pitulin S.S. (2019) Construction of ARIMA models for analyzing the dynamics of real estate prices in the Smolensk region. *Internauka*, no. 20-1(102), pp. 63–67 (in Russian).
16. Rubinshtein E.D., Osipenko N.S. (2015) Analysis of the real estate market and its forecasting. *Theory and Practice of Social Development*, no. 12, pp. 140–143 (in Russian).
17. Clapp J.M., Giaccotto C. (2002) Evaluating house price forecasts. *Journal of Real Estate Research*, vol. 24, no. 1, pp. 1–25.
18. Crawford G.W., Fratantoni M.C. (2003) Assessing the forecasting performance of regime-switching, ARIMA and GARCH models of house price. *Real Estate Economics*, vol. 31, no. 2, pp. 223–243.
19. Geltner D.M., Miller N.G., Clayton J., Eichholtz P. (2006) *Commercial real estate analysis and investments*. South-Western Educational Pub.

20. Gotham K.F. (2006) The Secondary Circuit of Capital Reconsidered: Globalization and the U.S. Real Estate Sector. *American Journal of Sociology*, vol. 112, no. 1, p. 231–275. <https://doi.org/10.1086/502695>
21. Green R.K. (2008) Imperfect information and the housing finance crisis: A descriptive overview. *Journal of Housing Economics*, vol. 17, no. 4, p. 262–271. <https://doi.org/10.1016/j.jhe.2008.09.003>
22. Green R.K. (1997) Follow the leader: How changes in residential and nonresidential investment predict changes in GDP. *Real Estate Economics*, vol. 25, no. 2, p. 253–270.
23. Laskin M.B., Cherksova P.A. (2020) Comparison of market and cadastral data for predicting the market value of real estate. *Statistics and Economics*, vol. 17, no. 4, pp. 44–54 (in Russian).
24. Fedorov N.I. (2020) Forecasting prices for residential real estate on the Chelyabinsk market using machine-learning methods. *Student and scientific and technological progress. Materials of the XLIV scientific conference of young scientists, Chelyabinsk*, pp. 223–226 (in Russian).
25. Li Y., Xiang Z., Xiong T. (2020) The behavioral mechanism and forecasting of Beijing housing prices from multiscale perspective. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, vol. 2020, article ID 5375206. <https://doi.org/10.1155/2020/5375206>
26. Ohnishi T., Mizuno T., Shimizu C., Watanabe T. (2011) On the evolution of the house price distribution. *Columbia Business School. Center of Japanese Economy and Business. Working Paper Series*, no. 296, pp. 1–20.
27. Raymond Y.C.T. (1997) An application of the ARIMA model to real estate prices in Hong-Kong. *Journal of Property Finance*, vol. 8, no. 2, p. 152–163. <https://doi.org/10.1108/09588689710167843>
28. Singh Y. (2005) *Model for forecasting price of houses in city of Stillwater*, M.S. dissertation, Oklahoma State University.
29. Sa'at N.F., Maimun N.H.A., Idris N.H. (2021) Enhancing the accuracy of Malaysian house price forecasting: a comparative analyses on the forecasting performance between the hedonic price model and artificial neural network model. *Planning Malaysia*, vol. 19, no. 3, p. 249–259.
30. Rusakov O., Laskin M., Jaksumbaeva O. (2016) Pricing in the real estate market as a stochastic limit. Log Normal approximation. *International Journal of the Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, vol.10, pp. 229–236.
31. Rusakov O., Laskin M., Jaksumbaeva O., Ivakina A. (2015) Pricing in real estate market as a stochastic limit. Lognormal approximation, 2015 *Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and in Industry (MCSI)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 235–239. <https://doi.org/10.1109/MCSI.2015.48>
32. Aitchinson J., Brown J.A.C. (1963) *The Lognormal distribution with special references to its uses in economics*. Cambridge: University Press.
33. Rusakov O.V. (2017) Pseudo-Poisson processes with stochastic intensity and the class of processes generalizing the Ornstein-Uhlenbeck process. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, vol. 4, no. 2, pp. 247–257 (in Russian).
34. Yakubovich Y., Rusakov O., Gushchin A. (2022) Functional limit theorem for the sums of PSI-processes with random intensities. *Mathematics*, vol. 10, no. 21, 3955. <https://doi.org/10.3390/math10213955>
35. Feller W. (1971) *An introduction to probability theory and its applications*. Wiley.
36. Laskin M.B. (2017) Adjustment of market value according to the pricing factor “object area”. *Property Relations in the Russian Federation*, no. 8(191), pp. 86–99 (in Russian).
37. Laskin M.B. (2018) Determination of the trading discount based on market data and cadastral value. *Business Informatics*, no. 3(45), pp. 53–61. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2018.3.53.61>
38. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. (2014) MVN: An R package for assessing multivariate normality. *The R Journal*, vol. 6/2, pp. 151–162.
39. Korkmaz S., Goksuluk D., Zararsiz G. (2022) *Package 'MVN'*. Available at: <https://cran.r-project.org/web/packages/MVN/MVN.pdf> (accessed 30 November 2023).

### About the authors

#### Mikhail B. Laskin

Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor;

Senior Researcher, Laboratory of Intelligent Systems, Saint Petersburg Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, 39, 14th Line, Vasilyevsky Island, St. Petersburg 199178, Russia;

E-mail: [laskinmb@yahoo.com](mailto:laskinmb@yahoo.com)

ORCID: 0000-0002-0143-4164

#### Oleg V. Rusakov

Cand. Sci. (Phys.-Math.);

Associate Professor, Department of Probability Theory and Mathematical Statistics, Saint Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Nab., St. Petersburg 199034, Russia;

E-mail: [ovirusakov@yahoo.co.uk](mailto:ovirusakov@yahoo.co.uk)

ORCID: 0000-0001-7444-9896

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.25.40

# Влияние экономической сложности и отраслевой специализации на валовый региональный продукт регионов РФ

**А.В. Кудров** 

E-mail: kovlal@inbox.ru

Центральный экономико-математический институт РАН  
Адрес: Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, д. 47

## Аннотация

Индекс экономической сложности определяет основу современной теории экономической сложности и отражает уровень знаний, заложенных в производственной структуре экономики. В данном исследовании изучается непосредственная связь между индексом экономической сложности и валовым региональным продуктом (ВРП) при учете других факторов производственной функции ВРП в ее обобщенном представлении, что позволяет изолировать влияние индекса экономической сложности от других явлений. Выявлен нелинейный характер связи между экономической сложностью и ВРП, причем непосредственная связь проявляется только при достаточно высоких значениях экономической сложности, превышающих определенный порог, который находится эндогенно с помощью эконометрических методов. Кроме того, в работе изучается взаимосвязь между экономической сложностью и индексами отраслевой специализации. Обнаружено наличие непосредственной связи экономической сложности с индексом добывающей промышленности и отсутствие связи с уровнем развития обрабатывающей промышленности. Получено уточнение обобщенной производственной функции ВРП, в которой пороговый эффект влияния экономической сложности проявился в качестве фактора нелинейной зависимости, описывающей эластичность труда: высокий уровень экономической сложности обеспечивает большую производительность труда. Результаты исследования зависимости ВРП от экономической сложности позволяют прийти к выводу, что повышение экономической сложности может быть эффективным способом стимулирования экономического роста и развития, но только начиная с определенного порогового уровня. Это говорит о том, что экономика должна достичь минимального уровня разнообразия и сложности в своей промышленной деятельности, прежде чем она сможет ощутить рост производительности, необходимый для существенного роста ВРП.

**Ключевые слова:** индекс экономической сложности, отраслевая специализация, обобщенная производственная функция, непосредственные связи, непараметрическая регрессия, нелинейная регрессия, отдача от масштаба

**Цитирование:** Кудров А. В. Влияние экономической сложности и отраслевой специализации на валовый региональный продукт регионов РФ // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 25–40.  
DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.25.40

## Введение

Сравнительно давно экономисты пришли к общему мнению, что способность страны создавать и распределять доход зависит от ее производственной структуры, что обсуждалось в таких работах, как [1–3]. В работе [4] представлено исследование конвергенции уровней производительности между штатами США и обнаружено, что более высокие уровни производительности связаны с более разнообразной и сложной производственной структурой.

Однако количественное измерение производственной структуры страны сопряжено со значительными трудностями. Были предприняты попытки использовать различные подходы, такие как индекс концентрации, который измеряет долю сельского хозяйства, промышленного производства или услуг в экономике, а также агрегированные показатели разнообразия и концентрации [5]. Другие подходы оценивают диверсификацию путем разделения секторов на связанные и несвязанные [6–8]. Однако эти методы имеют свои ограничения, включая возможность некоторого перекоса, поскольку крупные страны или регионы, как правило, более диверсифицированы. Кроме того, они не учитывают взаимосвязи между различными видами экономической деятельности, сложность и развитость производственной деятельности.

Указанные недостатки разрешаются путем рассмотрения выявленных сравнительных преимуществ и построения индекса экономической сложности [9–11]. Индекс экономической сложности позволяет получать оценки сложности структур экономики, учитывающие одновременно разнообразие и уникальность секторов, что позволяет отразить как широту, так и глубину структуры экономики.

Одним из важнейших аспектов экономической сложности является отраслевая сетевая структура, которая измеряет степень взаимосвязанности различных секторов экономики через производственные процессы. Считается, что такая взаимос-

вязь способствует передаче знаний, технологий и других ресурсов между секторами и поддерживает экономический рост. Большие значения показателя экономической сложности говорят о том, что в структуре экономики преобладают взаимосвязанные сектора. Например, отрасли с длительным производственным циклом, такие как электроника и машиностроение, требуют более высокого уровня координации и знаний и поэтому имеют высокий уровень экономической сложности. Напротив, экономические структуры, в которых преобладают сырьевые и сельскохозяйственные сектора, имеют низкие значения экономической сложности.

В работе [12] представлены расчеты индекса экономической сложности для стран и показано, как его можно использовать для прогнозирования экономического роста и определения потенциальных направлений для диверсификации и развития экономик стран.

Взаимосвязь между экономической сложностью и валовым внутренним продуктом (ВВП) представляет большой интерес для экономистов, поскольку ВВП является общепринятым показателем регионального производства и экономического развития.

Авторы работы [11] показали, что страны с более сложной производственной структурой, как правило, имеют более высокие уровни экономического роста и более высокий ВВП на душу населения, которые, в свою очередь, связаны с более низким уровнем бедности и лучшим социальным благосостоянием, см. [13]. Отсюда делается вывод, что политика развития должна быть направлена на создание условий, которые будут стимулировать рост экономической сложности (более подробное об- суждение, см. [10]).

В последние годы в статистических исследованиях индекс экономической сложности используется в качестве объясняющего фактора для экономического роста, уровня знаний, человеческого капитала, неравенства и других социально-экономических показателей [12, 14, 15]. Однако связь между экономи-

ческой сложностью и социально-экономическими показателями не всегда однозначна, и существуют другие факторы, которые могут влиять на эту связь. Как будет показано в этой работе часто предположение или выводы о наличии непосредственной связи ВРП с экономической сложностью является ошибочным, поскольку, как правило, не рассматриваются другие основные показатели экономики и науки.

В работе [16] было получено обобщенная производственная функция ВРП, в которой региональный выпуск зависит от числа занятых ( $L$ ), стоимости основных фондов ( $K$ ) со своими коэффициентами эластичности, которые задаются отраслевой структурой ВРП, и числом исследователей ( $P$ ) (выделяется как дополнительный фактор производства с постоянным коэффициентом эластичности). Эти факторы производственной функции будут рассмотрены в качестве основных характеристик экономики.

Цель данной работы – проверить две гипотезы, используя данные по регионам Российской Федерации. Во-первых, мы изучим, существует ли непосредственная связь между индексом экономической сложности и ВРП. Во-вторых, мы изучим, существует ли непосредственная связь между сложностью экономики и факторами обобщенной производственной функции. Для этого будет использована методология нахождения непосредственных связей и тестирования семейства гипотез [16, 17].

## 1. Данные

Рассмотрим ВРП за 2019 год и основные факторы обобщенной производственной функции ВРП из работы [16]:

- ◆ валовый региональный продукт за 2019 год [18];
- ◆ стоимость основных фондов на конец 2019 года [18];
- ◆ среднегодовая численность занятых за 2019 год [18];
- ◆ индексы добывающей  $S_1$  и обрабатывающей  $S_2$  промышленности (см. ниже);
- ◆ численность исследователей за 2019 год [18].

Поясним подробнее про индексы добывающей ( $S_1$ ) и обрабатывающей ( $S_2$ ) промышленности, характеризующие отраслевые особенности региона. Эти индексы были построены автором по данным отраслевой структуры ВРП с использованием компонентного анализа с вращением и отражают отраслевую специализацию рассмотренных регионов

(рис. 1). Данные отраслевой структуры ВРП включали основные 6 отраслей, которые определяют характер экономики регионов РФ [18]:

- ◆ сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство;
- ◆ добыча полезных ископаемых;
- ◆ обрабатывающие производства;
- ◆ торговля оптовая и розничная;
- ◆ деятельность по операциям с недвижимым имуществом;
- ◆ государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение.

Далее, эти показатели были выражены через два фактора методом главных компонент с вращением (рис. 1), на которые приходится более 80% объясненной дисперсии по данным на 2019 г. Для других близких лет наблюдаются весьма похожие результаты, что свидетельствует о весьма медленном изменении структуры регионального ВРП.

Вместе с этим были рассмотрены данные о налоговых поступлениях по секторам экономики по 82 секторам экономики субъектов РФ [19], которые отражают объемы производства каждого сектора экономики для экспорта и для внутреннего потребления. По этим данным на 2019–2020 гг. был построен индекс экономической сложности, см. [20]. На рис. 2 показаны полученные оценки индекса экономической сложности. Отметим, что индекс экономической сложности, по сути, эквивалентен обобщенному собственному вектору матрицы «регион–регион», элементы которой характеризуют вложенность структур экономик.

Область значений экономической сложности можно условно разделить на диапазоны, внутри которых локально точки хорошо аппроксимируются линейными зависимостями от рангов:

- ◆ **Диапазон 1:** регионы с преобладанием в структуре экономики уникальных секторов. Как правило, эти регионы характеризуются специализацией в добывающей промышленности. Для них среднее значение индекса добывающей промышленности (+13,64). Достаточно высокое среднее значение индекса обрабатывающей промышленности (+11,05) свидетельствует о наличии регионов со структурой смешанного типа, где также достаточно представлены сектора обрабатывающей промышленности.
- ◆ **Диапазон 2:** регионы со слабо диверсифицированной структурой сильных секторов и неуникаль-

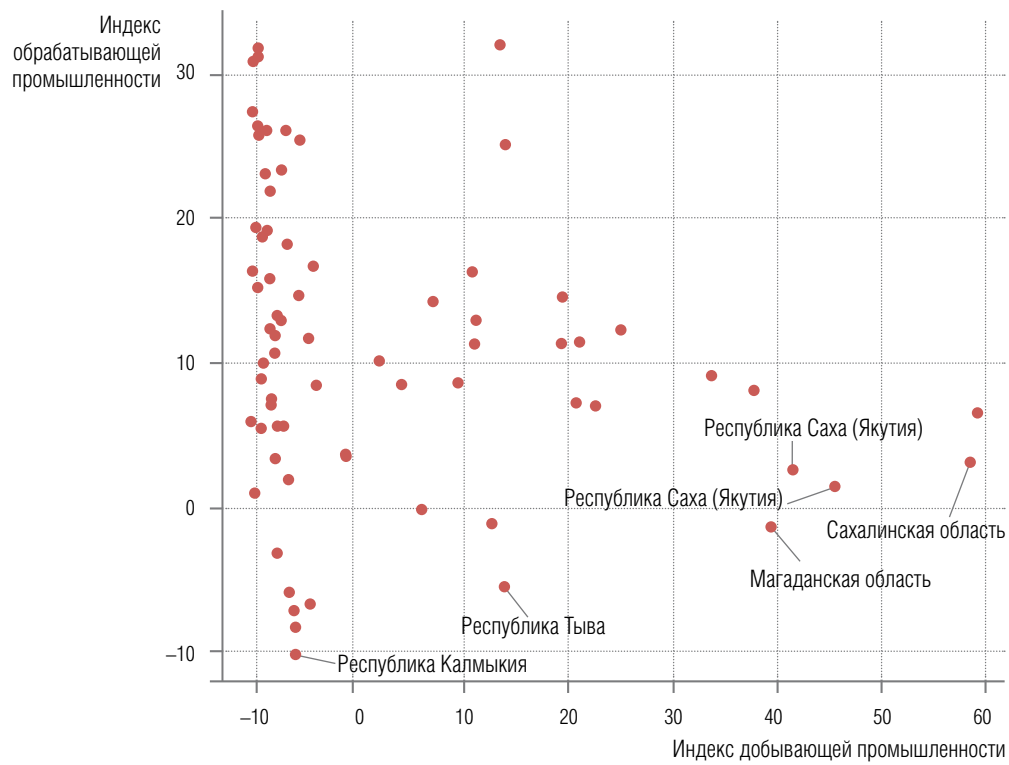


Рис. 1. Распределение регионов России в пространстве факторов отраслевой ориентации (упорядоченные по возрастанию; по данным 2019 г.).

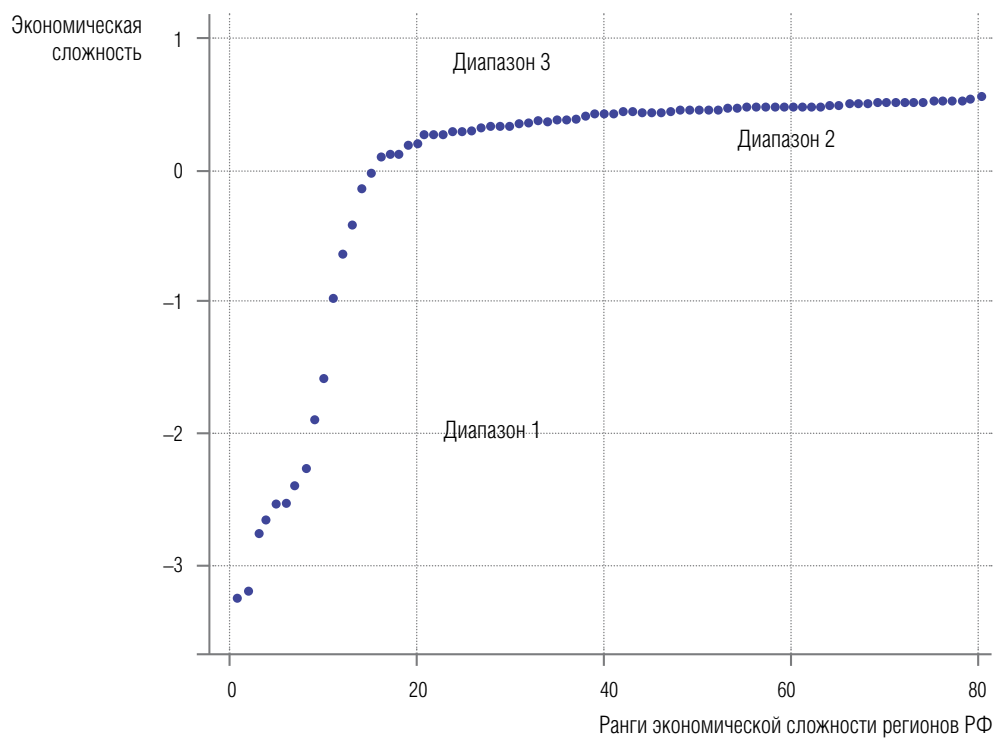


Рис. 2. Оценки экономической сложности по регионам РФ (упорядоченные по возрастанию; по данным 2019 г.).



ными секторами. В число этих регионов входят регионы с формирующейся экономикой. Среднее значение индекса добывающей промышленности (+7,16), среднее значение индекса обрабатывающей промышленности (+7,45).

- ◆ **Диапазон 3:** регионы с сильно диверсифицированными структурами сильных секторов и наличием длинных цепочек добавленной стоимости. Сюда входят регионы, характеризующиеся наличием длинных цепочек добавленной стоимости и специализацией в обрабатывающей промышленности. Среднее значение индекса добывающей промышленности равно (-3,87) указывает на отсутствие добычи полезных ископаемых в большинстве этих регионов. Среднее значение индекса обрабатывающей промышленности равно (+17,68).

Отметим, что наименьший разброс значений экономической сложности наблюдается для точек из диапазона 1, а разброс точек из диапазона 3 – наибольший. Минимальное среднее значение индекса добывающей промышленности имеется для регионов с экономической сложностью из диапазона 1, а максимальное для диапазона 3.

## 2. Методология исследования

Предлагаемая методология имеет своей целью получение аналитического выражения, описывающего влияние экономической сложности на валовой региональный продукт (ВРП). Методология состоит из нескольких шагов:

**1. Определение объясняющих переменных, непосредственно связанных с ВРП.** На первом этапе необходимо определить переменные, которые непосредственно связаны с ВРП (далее обозначим  $Y_i$  – ВРП  $i$ -го региона). Это делается при помощи техники так называемого «причинного анализа» или анализа структуры *непосредственных связей* [16]. Поясним это понятие. Если в совокупности случайных переменных (включающей в себя как результирующие, так и объясняющие переменные)  $Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$  условное распределение величины  $Z_i$  от всех остальных определяется *только их частью*  $Z_j, Z_k, \dots, Z_l$  (не вошедшие в условие могут принимать любые значения). Обозначим строчными буквами  $z_1, \dots, z_n$  реализованные значения соответствующих случайных переменных  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ . Тогда определение *непосредственных связей* можно записать в виде:

$$P(z_i | z_1, \dots, z_n) = P(z_i | z_j, z_k, \dots, z_l) \quad (1)$$

для всех  $z_1, \dots, z_n$ ,

и переменные  $Z_j, Z_k, \dots, Z_l$  называются *непосредственно связанными* с переменной  $Z_i$ . В непрерывном случае частные корреляции  $Z_i$  с непосредственно связанными (и только с ними!) не равны нулю. А именно, если  $Z_i$  и  $Z_j$  являются непосредственно связанными, то отличной от нуля будет:

$$\begin{aligned} \text{corr}(Z_i, Z_j | Z_{-(i,j)}) &= \\ &= \text{corr}(Z_i - Pr_{Z_i}(Z_{-(i,j)}), Z_j - Pr_{Z_j}(Z_{-(i,j)}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $Z_{-(i,j)}$  – набор переменных за исключением  $Z_i$  и  $Z_j$ ;  $Pr_{Z_i}(Z_{-(i,j)})$  и  $Pr_{Z_j}(Z_{-(i,j)})$  – проекция  $Z_i$  и  $Z_j$  на линейное подпространство  $sp(Z_{-(i,j)})$ .

**2. Идентификация формы зависимости ВРП и экономической сложности: монотонная или немонотонная?** Для выявления немонотонной взаимосвязи между ВРП и экономической сложностью используется оценка непараметрической ядерной регрессии Надарая–Ватсона  $g_\tau(x)$  [21]:

$$g_\tau(x) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(x) \log(Y_i)}{\sum_{i=1}^N w_i(x)}, \quad (3)$$

где  $w_i(x) = k\left(\frac{x - X_i}{\tau}\right)$ ,  $k(y) = \frac{\exp\left(-\frac{y^2}{2}\right)}{\sqrt{2\pi}}$ ;

$\log(Y_i)$  – логарифм ВРП региона  $i$ ;

$X_i$  – ранги экономической сложности региона  $i$ ;

$k(y)$  – ядро непараметрической регрессии (3) с параметром  $\tau$ ,  $\tau$  – ширина окна в непараметрической ядерной регрессии (3).

Отметим, что ширина окна  $\tau$  оценивалась при помощи так называемой перекрестной валидации с оставлением одной точки (*leave-one-out estimate*), см. подробнее [22]:

$$\tau_{opt} = \underset{\tau}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^N \left( \log(Y_i) - g_{\tau,(i)}(X_i) \right)^2, \quad (4)$$

где обозначение  $(i)$  означает, что точка  $i$  не учитывается при вычислении непараметрической оценки в точке  $X_i$ . Использование перекрестной валидации с оставлением одной точки особенно полезно, когда размер данных небольшой, поскольку позволяет обучить модель почти на всем наборе данных. Однако для больших данных этот подход перекрестной валидации может оказаться вычислительно затратным, поскольку модель приходится переобучать для каждой отдельной точки данных.



**3. Построение нелинейной регрессионной зависимости ВРП от непосредственно связанных объясняющих переменных.** После того как выявлены переменные, которые непосредственно связаны с ВРП (обозначим через  $Y_i$  – ВРП  $i$ -го региона,  $i = 1, \dots, N$ ), и определена форма немонотонной зависимости ВРП и экономической сложности, строится нелинейная регрессионная зависимость от этих переменных, имеющая вид:

$$Y_i = f(x_i, \theta^*) + \varepsilon_i, i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где  $f: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$  нелинейная функция объясняющих и непосредственно связанных с  $Y_i$  объясняющих переменных  $x_i \in \mathbb{R}^k$ ;

$\theta^* \in \mathbb{R}^p$  – вектор истинных значений неизвестных параметров;

( $\varepsilon_i$ ) предполагаются независимыми одинаково распределенными случайными величинами (необязательно нормально распределенными) с  $E(\varepsilon_i) = 0$  и  $Var(\varepsilon_i) = \sigma^2$ .

В предположении, что функция  $f(\cdot)$  известна, вектор параметров  $\theta$  модели (5) оценивается как решение следующей задачи:

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin}_{\theta} \sum_{i=1}^N (Y_i - f(x_i, \theta))^2. \quad (6)$$

Нахождение решения этой задачи делается численными методами с использованием алгоритма Левенберга–Марквардта [23, 24].

Согласно результатам, представленным в [23, 24], при достаточно больших  $n$  и соответствующих предположениях о регулярности (таких как два-

жды непрерывно дифференцируемости  $f(x_i, \theta)$  относительно  $\theta$ ), МНК-оценка  $\hat{\theta}$  имеет асимптотически нормальное распределение:

$$\hat{\theta} \sim N_p \left( \theta^*, \sigma^2 \left[ (F(\theta^*))^T F(\theta^*) \right]^{-1} \right), \quad (7)$$

где  $F(\theta^*) = \left[ \frac{\partial f(x_i, \theta)}{\partial \theta_j} \Big|_{\theta=\theta^*} \right]_{i,j} \in \mathbb{R}^{N \times p}$ .

Таким образом, данная методология объединяет несколько статистических методов, включая причинно-следственный анализ, непараметрическое оценивание и нелинейную регрессию для установления взаимосвязи между экономической сложностью и ВРП.

### 3. Результаты исследований

Проанализируем взаимные связи между экономической сложностью и указанными выше показателями науки, экономики в регионах РФ. Для этого по данным за 2019 год была оценена матрица частных корреляций и произведено последовательное тестирование гипотез об отсутствии непосредственных связей каждой переменной с экономической сложностью (табл. 1).

В таблице 1 (правая часть) представлены результаты проверки семейства гипотез о равенстве нулю частных корреляций, более детальное описание процедуры тестирования рассмотренных гипотез см. в [16]. Единицами отмечены случаи отсутствия непосредственной связи экономической сложности с соответствующей переменной.

Таблица 1.

**Статистические оценки частных корреляций с экономической сложностью (для исходных переменных и их рангов) за 2019 г. Результаты проверки семейства гипотез на равенство нулю частных корреляций.**

	Частная корреляция с экономической сложностью	Н0: частная корреляция с экономической сложностью равна нулю	Частная корреляция с экономической сложностью для рангов	Н0: частная корреляция с экономической сложностью для рангов равна нулю
Стоимость основных фондов	0,16	1	0,20	1
Среднегодовая численность занятых	-0,30	0	-0,06	1
ВРП	-0,14	1	-0,24	0
Численность исследователей	0,03	1	-0,05	1
Индекс добывающей промышленности	-0,53	0	-0,61	0
Индекс обрабатывающей промышленности	-0,12	1	-0,01	1

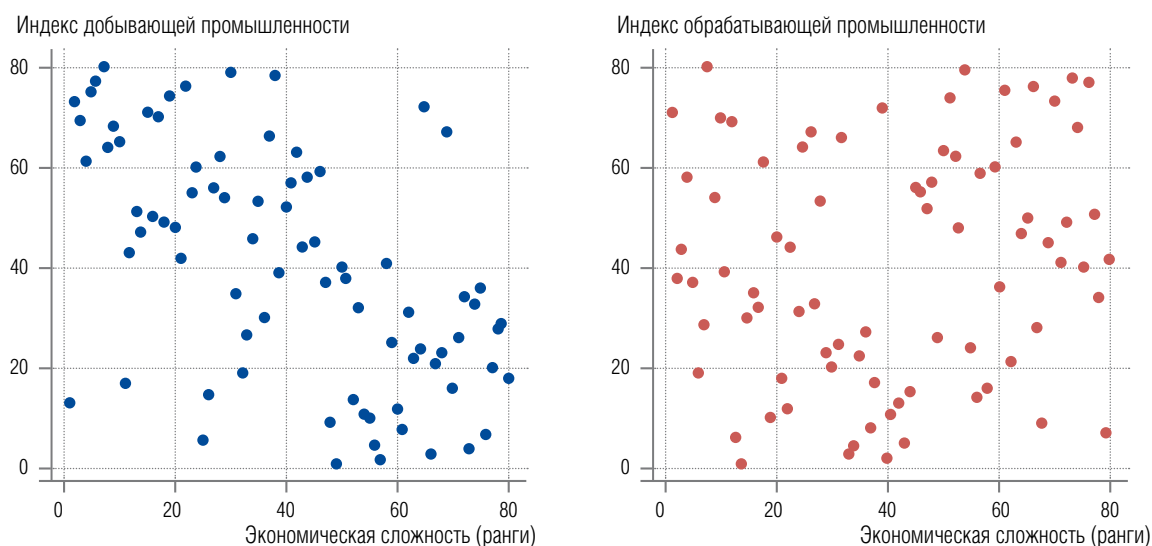


Рис. 3. Справа: индекс добывающей промышленности (ранги) и экономическая сложность (ранги).  
Слева: индекс обрабатывающей промышленности (ранги) и экономическая сложность (ранги).

Как видно из *таблицы 1*, экономическая сложность не связана с индексом обрабатывающей промышленности, но связана с индексом добывающей промышленности. На *рис. 3* представлено визуальное подтверждение этому.

Среди всех рассмотренных переменных экономическая сложность имеет статистически значимую непосредственную связь с индексом добывающей промышленности. Наличие такой связи указывает на то, что сценарий перехода от экономики, основанной на добывающей промышленности (например, горнодобывающей или нефтедобывающей), к более диверсифицированной (в частности, ориентированной на длинные цепочки добавленной стоимости) ассоциируется с повышением уровня сложности экономики.

Отсутствие связи между индексом экономической сложности и индексом обрабатывающей промышленности, может означать, что простого присутствия обрабатывающей промышленности в экономике недостаточно для повышения ее сложности. Это может быть так, если производство сосредоточено в нескольких отраслях с низким уровнем сложности или если другие сектора экономики остаются неразвитыми.

Как показано в *таблице 1*, частная корреляция для ВРП и индекса экономической сложности является незначимой, тогда как в случае частной корреляции для рангов имеется статистически значимая связь для этих переменных (гипотеза принимается

на уровне 5%). Это указывает на наличие нелинейной связи между индексом экономической сложности и ВРП.

Рассмотрим подробнее форму зависимости логарифма ВРП от рангов экономической сложности (*рис. 4*).

Отметим, что U-образная зависимость на *рис. 4*, полученная с использованием непараметрической регрессии Надарайя–Ватсона, говорит о том, что между сложностью экономики и ВРП не может быть простой линейной зависимости.

U-образная зависимость между экономической сложностью и ВРП подразумевает, что как очень низкий, так и очень высокий уровень экономической сложности соответствует высокому ВРП, в то время как средний уровень экономической сложности соответствует более низким значениям ВРП. Таким образом, можно выделить следующие типы региональных экономик:

**1. Низкая экономическая сложность, высокий ВРП:** региональные экономики, как правило, богатые природными ресурсами, и их ВРП в значительной степени сосредоточен в добывающих отраслях, таких как нефть, газ или горнодобывающая промышленность. Несмотря на низкую сложность экономики (поскольку они в основном сосредоточены на одном или нескольких секторах), эти регионы могут иметь высокий ВРП благодаря высокой рыночной стоимости своих ресурсов и интенсифицированной добыче полезных ископаемых.

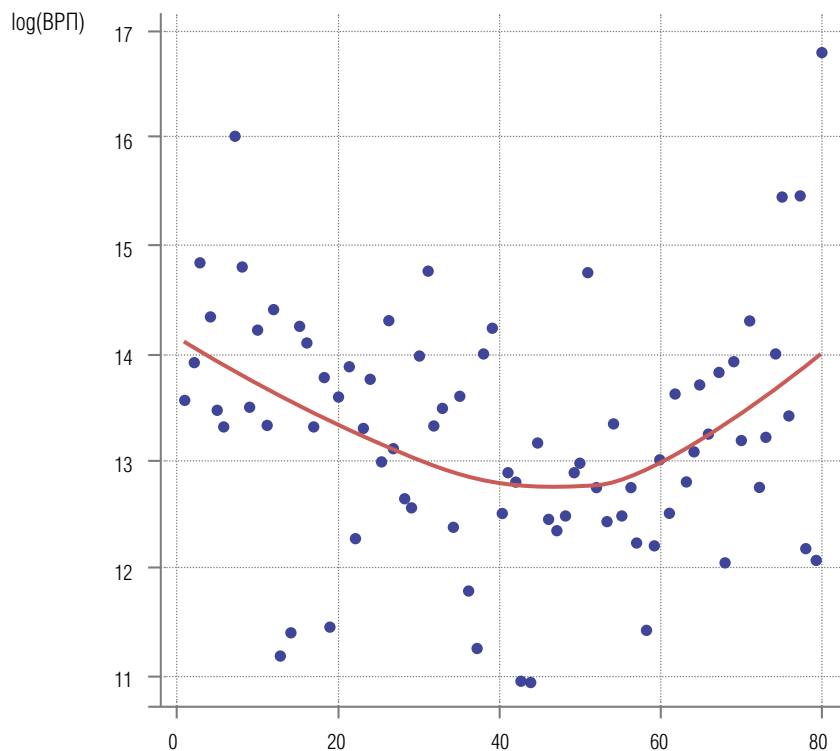


Рис. 4. ВРП и ранги экономической сложности за 2019 год; непараметрическая регрессия Надарайя–Ватсона (3).

**2. Высокая сложность, высокий ВРП:** региональные экономики с высокой сложностью экономики, как правило, имеют широкий спектр развитых и взаимосвязанных отраслей, включающие высокотехнологичные производства. Эти регионы обычно характеризуются высоким уровнем индустриализации, инвестициями в человеческий капитал и технологическими инновациями.

**3. Средний уровень сложности, более низкий ВРП:** региональные экономики, которые находятся в процессе перехода к более диверсифицированной и сложной экономике. Отсутствует развитый потенциал для эффективного производства более сложных товаров и услуг.

Таким образом, согласно рис. 4, можно выделить два возможных пути к более высокому объему ВРП: 1) через добычу природных ресурсов или 2) через развитие более сложной индустриальной экономики. Каждый путь имеет свои преимущества и проблемы. Например, богатые ресурсами регионы могут быстро достичь высокого ВРП, но при этом они могут столкнуться с нестабильностью из-за колебаний цен на сырьевые товары и могут испытывать трудности с диверсификацией своей экономики.

В силу немонотонности соответствия между логарифмом ВРП и экономической сложностью, возьмем в качестве порога для экономической сложности аргумент  $x_{opt}$ , при котором достигается минимум построенной непараметрической регрессии Надарайя–Ватсона (3)  $g_{x_{opt}}(x)$  (рис. 4):

$$x_{opt} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} g_{x_{opt}}(x) = 46.$$

Ранг  $x_{opt}$  соответствует значению экономической сложности равному 0,45.

Оценим пороговое влияние экономической сложности на ВРП:

$$\operatorname{cor}(\text{ВРП}, ECI | ECI \geq 0,45, X_{-(\text{ВРП}, ECI)}) = 0,79,$$

$$\operatorname{cor}(\text{ВРП}, ECI | ECI < 0,45, X_{-(\text{ВРП}, ECI)}) = -0,18,$$

где  $X_{-(\text{ВРП}, ECI)}$  – все рассматриваемые показатели науки и экономики за исключением ВРП и ECI.

Таким образом, только при значениях экономической сложности, превышающих 0,45, имеется непосредственная связь ВРП и индекса экономической сложности.

На основании выявленной пороговой непосредственной связи экономической сложности и ВРП было обобщено представление расширенной производственной функции для ВРП:

$$Y = c \cdot K^{\beta_1(S_1, S_2)} L^{\beta_2(S_1, S_2, T)} P^\gamma + \epsilon, \tag{8}$$

где

$$\beta_1(S_1, S_2) = \frac{\mu_1 e^{(\mu_2 \cdot S_1 + \mu_3 \cdot S_2)}}{1 + \mu_1 e^{(\mu_2 \cdot S_1 + \mu_3 \cdot S_2)}}, \beta_2(S_1, S_2, T) = \frac{\lambda_1 e^{(\lambda_2 \cdot S_1 + \lambda_3 \cdot S_2 + \lambda_4 \cdot T^2)}}{1 + \lambda_1 e^{(\lambda_2 \cdot S_1 + \lambda_3 \cdot S_2 + \lambda_4 \cdot T^2)}}$$

$$T = \begin{cases} ECI, & \text{если } ECI \geq 0,45 \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$c, \gamma, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \mu_1, \mu_2, \mu_3$  – константы;

$Y$  – валовый региональный продукт в 2019 году

$K$  – стоимость основных фондов на конец 2019 года

$L$  – среднегодовая численность занятых за 2019 год

$P$  – численность исследователей за 2019 год

$ECI$  – индекс экономической сложности, рассчитанный по данным за 2019 год;

$S_1$  и  $S_2$  – отраслевые индексы, рассчитанные за 2019 год;

$\epsilon$  – ошибки модели (8).

Заметим, что найденное выражение для ВРП оценено с большей точностью, а именно  $R^2 = 0,982$ , что больше чем в работе [16].

Эндогенность в модели (8) возникает, когда ошибка  $\epsilon$  статистически зависима от одной или нескольких объясняющих переменных среди  $K, L, P, S_1, S_2, T$ . А именно:

$$E(\epsilon | K, L, P, S_1, S_2, T) \neq 0.$$

Как известно, наличие эндогенности приводит к смещенности и несостоятельности МНК-оценок параметров модели, что приводит к неверным выводам о статистической значимости связей. Чтобы проверить гипотезу об отсутствии эндогенности требуется проверить гипотезу о независимости каждой из объясняющих переменных и ошибок в модели (8). Для проверки независимости воспользуемся критерием независимости Гильберта–Шмидта [25]. В отличие от теста Хаусмана независимости объясняющих переменных и ошибок модели, которая предполагается линейной [26], критерий независимости Гильберта–Шмидта допускает наличие нелинейной зависимости. Высокое значение критерия независимости Гильберта–Шмидта для пары переменных указывает на их зависимость, а низкое значение отвечает независимости. В предположении, что нулевая гипотеза состоит в независимости рассматриваемой пары переменных, в таблице 3 представлены результаты проверки.

Как можно видеть из результатов таблицы 3, не отвергается гипотеза о том, что ошибки в модели (8) являются независимыми от объясняющих переменных.

Для того, чтобы убедиться, что наблюдаемое отсутствие связи ошибок и объясняющих переменных не обусловлена искажающими переменными сделаем проверку на условную независимость. Для этого также можно воспользоваться критерием независимости Гильберта–Шмидта, см. таблицу 4.

Таблица 2.

Значения оценок параметров модели (1) и их статистическая значимость

	Оценка	Ст. ошибка	t-значение	p-значение	
$C$	6,77	0,42	4,53	0,00	***
$\mu_1$	1,79	0,21	2,72	0,01	**
$\mu_2$ (индекс добывающей промышленности; фонды)	0,01	0,00	3,53	0,00	***
$\mu_3$ (индекс обрабатывающей промышленности; фонды)	-0,02	0,01	-3,68	0,00	***
$\lambda_1$	0,33	0,26	-4,35	0,00	***
$\lambda_2$ (индекс добывающей промышленности; занятые)	-0,01	0,01	-1,96	0,05	*
$\lambda_3$ (индекс обрабатывающей промышленности; занятые)	0,05	0,01	3,83	0,00	***
$\lambda_4$ (экономическая сложность)	3,34	1,16	2,89	0,01	**
$\gamma$ (исследователи)	0,05	0,02	2,81	0,01	**

Обозначения: \*\*\* – p-значение на уровне менее 0,001, \*\* – p-значение на уровне менее 0,01, \* – p-значение на уровне менее 0,05.

Таблица 3.

**Тестирование гипотезы о независимости ошибок модели (8)  
и ее объясняющих переменных**

Пары переменных	Критерий независимости Гильберта-Шмидта	<i>p</i> -значение	Наличие независимости
$\epsilon, T$	0,0000033	0,13	независимы
$\epsilon, K$	0,0000364	0,8	независимы
$\epsilon, L$	0,0000366	0,79	независимы
$\epsilon, P$	0,0000257	0,97	независимы
$\epsilon, S_1$	0,000193	0,27	независимы
$\epsilon, S_2$	0,000237	0,23	независимы

Таблица 4.

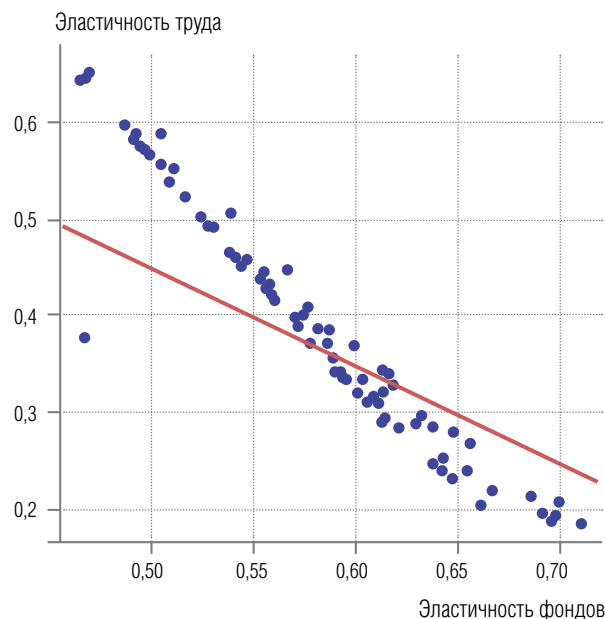
**Тестирование гипотез об условной независимости ошибок модели (8)  
и ее объясняющих переменных**

Пары переменных   условие	Критерий независимости Гильберта-Шмидта	<i>p</i> -значение	Наличие независимости
$(\epsilon, T T, L, P, S_1, S_2)$	0,00000154	0,11	независимы
$(\epsilon, K T, L, P, S_1, S_2)$	0,0000503	0,98	независимы
$(\epsilon, L T, K, P, S_1, S_2)$	0,000258	0,45	независимы
$(\epsilon, P T, K, L, S_1, S_2)$	0,000149	0,89	независимы
$(\epsilon, S_1 T, K, L, P, S_2)$	0,000368	0,77	независимы
$(\epsilon, S_2 T, K, L, P, S_1)$	0,000657	0,18	независимы

Согласно результатам, представленным в *таблице 4*, подтверждается также гипотеза о наличии условной независимости ошибок и объясняющих переменных в модели (8).

Наличие статистически значимого положительного параметра  $\lambda_4$  при усеченной экономической сложности говорит о возможности эффекта «перелива» инноваций. Регионы с более сложной производственной структурой, как правило, имеют более широкую диверсификацию, что создает возможности для межотраслевого распространения знаний и технологий, что в свою очередь может привести к увеличению инноваций и росту производительности. Кроме того, регион, производящий разнообразную продукцию и имеющий взаимосвязанные производственные процессы, имеет больше возможностей для использования эффекта масштаба.

*Рисунок 5* иллюстрирует, что возрастающая отдача от масштаба характерна для регионов с высокой эластичностью труда и низкой эластичностью капитала.



*Рис. 5.* Для каждого региона согласно модели (1):  
 $\beta_1(S_1, S_2)$  – эластичность основных фондов, ось абсцисс;  
 $\beta_2(S_1, S_2, T_1)$  – эластичность труда, ось ординат.  
 Прямая:  $x + y + \gamma = 1$ .

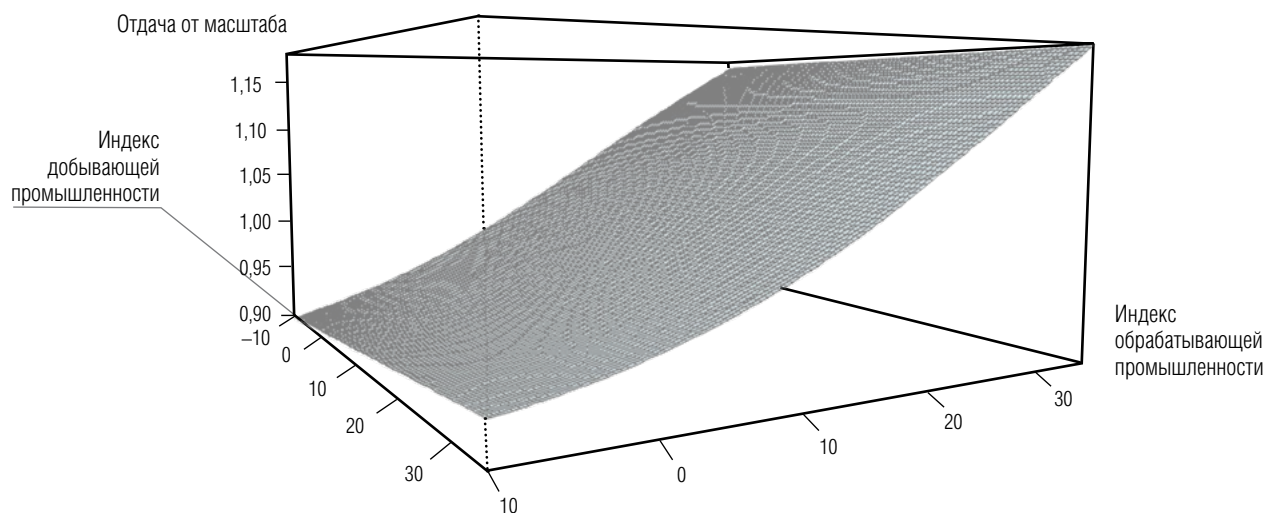


Рис. 6. Ось абсцисс – индекс добывающей промышленности; ось ординат – индекс обрабатывающей промышленности; ось аппликат – отдача от масштаба, рассчитываемая как  $\beta_1(S_1, S_2) + \beta_2(S_1, S_2, T_1) + \gamma$ .

Как видно из рис. 5, рост эластичности труда сопровождается снижением эластичности капитала и наоборот. Это свидетельствует о сдвиге в производственной функции, обусловленном отраслевыми различиями региональных экономик.

Из рис. 6 видно, что наличие убывающей отдачи от масштаба характерно для регионов с высокой концентрацией добывающих отраслей в структуре региональной экономики. Убывающая отдача от

масштаба означает, что пропорциональное увеличение труда и капитала приводит к менее чем пропорциональному увеличению выпуска. Это может быть связано с тем, что добывающие отрасли (например, добыча полезных ископаемых, нефти и газа) часто являются капиталоемкими и могут сталкиваться с такими проблемами, как истощение ресурсов, экологические нормы или высокие эксплуатационные расходы.

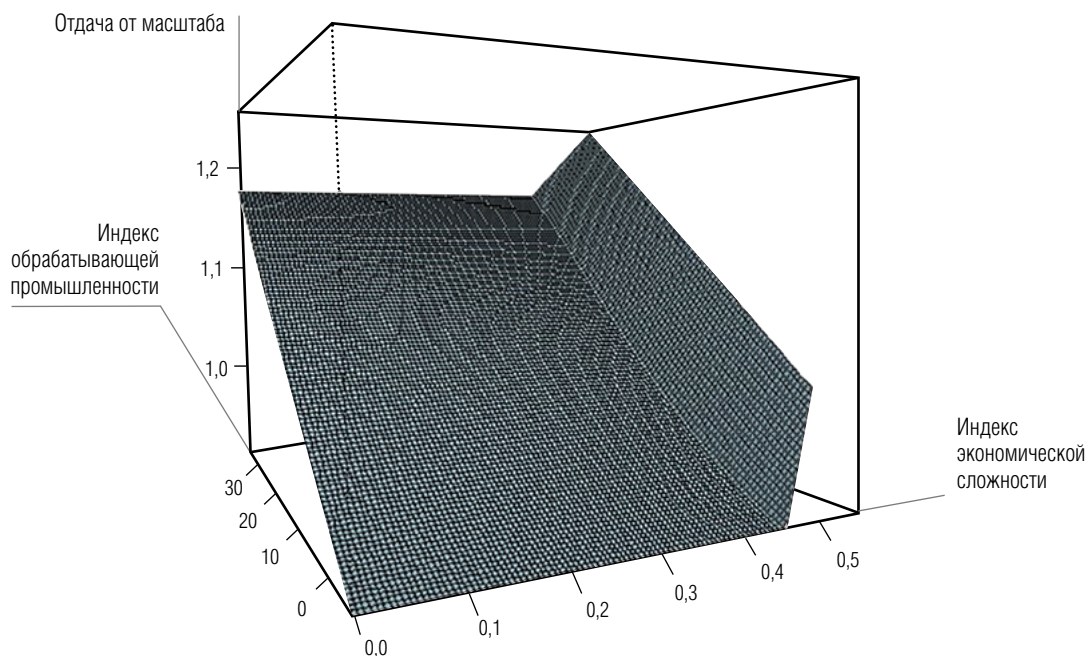


Рис. 7. Ось абсцисс – индекс экономической сложности; ось ординат – индекс обрабатывающей промышленности; ось аппликат – отдача от масштаба, рассчитываемая как  $\beta_1(S_1, S_2) + \beta_2(S_1, S_2, T_1) + \gamma$ .



На *рис. 7* показано, что возрастающая отдача от масштаба характерна для регионов с большой концентрацией обрабатывающей промышленности и большим значением экономической сложности. Достаточно большие значения экономической сложности, превышающие порог 0,45, отвечают большим значениям отдачи от масштаба.

Так как индекс экономической сложности характеризует концентрацию смежных секторов в структуре экономики, то по мере того, как экономика становится более сложной, сетевое или смежное взаимодействие способствует обмену передовым опытом и сотрудничеству в области инноваций, а, следовательно, способствует повышению производительности. В сложной экономике, характеризующейся сложными межотраслевыми связями и развитым производством, богатство разнообразных знаний и навыков, как правило, велико. Смежность секторов позволяет передавать эти знания между секторами, способствуя повышению общей производительности труда. При высоком уровне отраслевой смежности инновации и технологические достижения легче распространяются по смежным секторам.

Формирование смежных секторов стимулирует совместное развитие, когда сектора растут не изолированно, а за счет совместного развития технологий, навыков и знаний. Такой взаимосвязанный рост может еще больше повысить производительность труда за счет синергии между различными секторами.

Таким образом, регионы с более разнообразными и сложными производственными структурами со специализацией в обрабатывающей промышленности имеют больше возможностей для получения выгоды от эффекта масштаба и реагирования на экономические изменения. Как уже отмечалось ранее, регионы с более сложной экономической структурой, как правило, имеют более диверсифицированную экономику, что делает их более приспособленными к нестабильной экономической конъюнктуре.

### Заключение

Наиболее важные результаты проведенного эконометрического исследования влияния экономической сложности на ВРП субъектов РФ, выполненного путем последовательного использования трех статистических методов (частнокорреляционного анализа выявления непосредственных связей между переменными, метода Надарайя–Ватсона оценки непараметрической регрессии и метода наименьших квадратов для не-

линейных производственных функций) на основе статистических данных 2019 года, состоят в следующем:

- ◆ Отсутствует непосредственная статистическая связь между индексом обрабатывающей промышленности и экономической сложностью для регионов РФ. Это означает, что появление новых обрабатывающих секторов или расширение ранее существующих необязательно сопровождается повышением экономической сложности.
- ◆ Индекс добывающей промышленности имеет непосредственную связь с индексом экономической сложности. Рост индекса добывающей промышленности соответствует снижению индекса экономической сложности.
- ◆ Статистическое оценивание непараметрической регрессии Надарайя–Ватсона показало наличие нелинейной зависимости между ВРП и индексом экономической сложности.
- ◆ Проранжировав регионы по уровню экономической сложности и исключив влияние других переменных выборки, найден такой номер ранга и соответствующий ему уровень экономической сложности, выше которого существует непосредственная связь ВРП и экономической сложности, а ниже которого она отсутствует.
- ◆ Статистические оценки параметров рассмотренной обобщенной производственной функции показывают, что эластичность по капиталу статистически значимо зависит от индексов отраслевой специализации, а эластичность по труду зависит как от индексов отраслевой специализации, так и экономической сложности. Для значений экономической сложности, превышающей определенный порог, высокая экономическая сложность соответствует более высокой эластичности труда. Это свидетельствует о том, что регионы с более сложной, разнообразной и взаимосвязанной производственной структурой обладают более высокой производительностью и, следовательно, имеют больше возможностей для эффективного использования своих трудовых ресурсов.
- ◆ Возрастающая отдача от масштаба проявляется только в регионах, где преобладают отрасли обрабатывающей промышленности и имеется достаточно высокий уровень экономической сложности. Региональные экономики с высокой концентрацией добывающих отраслей характеризуются снижением отдачи от масштаба, что потенциально ограничивает их рост.



◆ Обрабатывающая промышленность может предоставить больше возможностей для повышения производительности и увеличения добавленной стоимости по сравнению с добывающими отраслями.

В целом, результаты исследования взаимосвязи между ВВП и экономической сложностью подчеркивают важность учета экономической сложности в качестве объясняющей переменной производственной функции регионального ВВП в обобщенном ее виде. Стимулирование роста экономической сложности может быть эффективным способом содействия экономическому росту и повышению производительности, но этот эффект проявляется только при достаточно высоком уровне экономической сложности. Увеличивая разнообразие и экономическую сложность своих производственных структур, регионы могут повысить производительность, конкурентоспособность и экономическую стабильность, что приведет к более высоким уровням ВВП и устойчивости экономического роста.

Следует также подчеркнуть важность состава секторов экономики и баланса между трудом и капиталом в формировании производства и роста. Регионы, сосредоточенные на отраслях с высокой эластичностью по труду, характеризуются возрастающей отдачей от масштаба и, следовательно, потенциально более высокими темпами роста экономики. И наоборот, регионы с высокой концентрацией добывающих отраслей могут стол-

кнуться со снижением отдачи от масштаба, что потенциально ограничивает их рост. Это подчеркивает важность политики, направленной на повышение производительности труда и диверсификацию от добывающих отраслей для устойчивого экономического роста.

Представленная в данной работе методология количественной оценки влияния сложности экономики на валовой региональный продукт (ВРП) может быть полезной в процессе принятия решений о размещении новых производственных мощностей, распределительных центров или филиалов предприятий. Понимание влияния сложности экономики на ВРП может помочь выявить экономически устойчивые и достаточно диверсифицированные регионы с более благоприятными условиями для бизнеса. Однако, регионы со сложной структурой экономики характеризуются также более высоким потенциальным уровнем конкуренции.

Более высокий ВРП обычно коррелирует с более высокой покупательной способностью потребителей. Поэтому представленные результаты могут помочь предприятиям выявить потенциально прибыльные региональные рынки для сбыта своей продукции или услуг. Однако, важно отметить, что при всей своей полезности данная методика является одним из инструментов и должна использоваться в сочетании с другими источниками данных и маркетинговыми исследованиями для принятия комплексных решений. ■

### Литература

1. Hirschman A.O. The strategy of economic development. New Haven: Yale Univ. Press, 1958. Vol. 10.
2. Rosenstein-Rodan P.N. Problems of industrialization of eastern and southeastern Europe // The Economic Journal. 1943. Vol. 53(210/211). P. 202–211.
3. Teece D., Rumelt R., Dosi G., Winter S. Understanding corporate coherence: Theory and evidence // Journal of Economic Behavior & Organization. 1994. Vol. 23(1). P. 1–30.
4. Bernard A.B., Jones C.I. Productivity and convergence among U.S. States. National Bureau of Economic Research, 1996.
5. Imbs J., Wacziarg R. Stages of diversification // The American Economic Review. 2003. Vol. 93(1). P. 63–86.
6. Boschma R., Iammarino S. Related variety, trade linkages, and regional growth in Italy // Economic Geography. 2009. Vol. 85(3). P. 289–311.
7. Frenken K., Oort F.V., Verburg T. Related variety, unrelated variety and regional economic growth // Regional Studies. 2007. Vol. 41(5). P. 685–697.
8. Frenken K., Saviotti P. Export variety and the economic performance of countries // Journal of Evolutionary Economics. 2008. Vol. 18(2). P. 201–218.
9. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Chung S., Jimenez J., Simoes A. The building blocks of economic complexity // PLOS One. 2007. Vol. 2(1). e268.

10. Hausmann R, Hidalgo C.A. Atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity. MIT Press, 2017.
11. Hidalgo C.A., Hausmann R. The building blocks of economic complexity // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2009. Vol. 367(1897). P. 1817–1825.
12. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Simoes A., Yildirim M.A., Hwang J. The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity. MIT Press, 2014.
13. Ravallion M. Competing concepts of inequality in the globalization debate // *Brookings Trade Forum Globalization, Poverty, and Inequality*. 2004. P. 1–38. [Электронный ресурс]: <https://www.jstor.org/stable/25063189> (дата обращения 14.02.2023).
14. Hartmann D., Guevara M.R., Jara-Figueroa C., Aristarán M., Hidalgo C. Linking economic complexity, institutions, and income inequality // *World Development*. 2017. Vol. 93. P. 75–93.
15. Hidalgo C.A., Klinger B., Barabási A.L., Hausmann R. The product space conditions the development of nations // *Science*. 2007. Vol. 317(5837). P. 482–487.
16. Гаврилец Ю.Н., Кудров А.В., Тараканова И.В. Анализ внутренней структуры экономического потенциала роста // *Вестник ЦЭМИ РАН*. 2018. Т. 1. № 1.
17. Гаврилец Ю.Н., Кудров А.В., Тараканова И.В. Статистический анализ и моделирование взаимосвязи региональной экономики и науки // *Экономика и математические методы*. 2022. Т. 58. № 4. С. 56–70.
18. Регионы России. Социально-экономические показатели, 2017–2019 гг. М.: Росстат, 2020.
19. Отчеты о налоговой базе и структуре начислений по налогам и сборам за 2019–2020 гг. [Электронный ресурс]: [https://www.nalog.gov.ru/rn77/related\\_activities/statistics\\_and\\_analytics/forms/](https://www.nalog.gov.ru/rn77/related_activities/statistics_and_analytics/forms/) (дата обращения 14.02.2023).
20. Афанасьев М.Ю., Кудров А.В. Экономическая сложность и вложенность структур региональных экономик // *Экономика и математические методы*. 2021. Т. 57. № 3. С. 67–78.
21. Bierens H.J. Topics in advanced econometrics estimation, testing, and specification of cross-section and time series models. Cambridge University Press, 1994.
22. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning. Springer, 2006.
23. Ratkowsky D. Principles of nonlinear regression modeling // *Journal of Industrial Microbiology*. 1993. Vol. 12. P. 195–199.
24. Seber G.A.F., Wild C.J. Nonlinear regression. New York: Wiley–Interscience, 2003.
25. Gretton A., Fukumizu K., Harchaoui Z., Sriperumbudur B.K. A kernel statistical test of independence // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2009. P. 1067–1074.
26. Hausman J.A. Specification tests in econometrics // *Econometrica*. 1978. Vol. 46(6). P. 1251–1271.

### Об авторе

#### **Кудров Александр Владимирович**

кандидат физико-математических наук;

ведущий научный сотрудник, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

Email: kovlal@inbox.ru

ORCID: 0000-0003-2495-5496

# The impact of economic complexity and industry specialization on the gross regional product of Russian regions

**Alexander V. Kudrov**

E-mail: kovlal@inbox.ru

Central Economic and Mathematical Institute, Russian Academy of Sciences

Address: 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia

## Abstract

The economic complexity index defines the basis of the modern theory of economic complexity and reflects the level of knowledge embedded in the production structure of the economy. This study examines the direct relationship between the economic complexity index and gross regional product (GRP) while taking into account other factors of the GRP production function in its generalized representation. As a result, we can isolate the impact of the economic complexity index from other phenomena. The non-linear nature of the relationship between economic complexity and GRP is revealed, and the direct relationship is manifested only at sufficiently high values of economic complexity, exceeding a certain threshold, which is found endogenously using econometric methods. In addition, the paper studies the relationship between economic complexity and indices of sectoral specialization. We found that there is a direct relationship between economic complexity and the extractive industry index and no relationship with the level of development of manufacturing industry. We obtained a clarification of the generalized production function of GRP, in which the threshold effect of the influence of economic complexity manifested itself as a factor of nonlinear dependence describing the elasticity of labor: a high level of economic complexity provides greater labor productivity. Overall, the results of the study of the dependence of GRP on economic complexity lead to the conclusion that increasing economic complexity can be an effective way to stimulate economic growth and development, but only starting from a certain threshold level. This suggests that an economy must reach a minimum level of diversity and complexity in its industrial activities before it can experience the productivity gains necessary for substantial GRP growth.

**Keywords:** economic complexity index, sectoral specialization, generalized production function, direct relationships, nonparametric regression, nonlinear regression, returns to scale

**Citation:** Kudrov A.V. (2023) The impact of economic complexity and industry specialization on the gross regional product of Russian regions. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 25–40. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.25.40

## References

1. Hirschman A.O. (1958) *The strategy of economic development*. New Haven: Yale Univ. Press.
2. Rosenstein-Rodan P.N. (1943) Problems of industrialization of eastern and southeastern Europe. *The Economic Journal*, vol. 53(210/211), pp. 202–211.

3. Teece D., Rumelt R., Dosi G., Winter S. (1994) Understanding corporate coherence: Theory and evidence. *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 23(1), pp. 1–30.
4. Bernard A.B., Jones C.I. (1996) *Productivity and convergence among U.S. States*. National Bureau of Economic Research.
5. Imbs J., Wacziarg R. (2003) Stages of diversification. *The American Economic Review*, vol. 93(1), pp. 63–86.
6. Boschma R., Iammarino S. (2009) Related variety, trade linkages, and regional growth in Italy. *Economic Geography*, vol. 85(3), pp. 289–311.
7. Frenken K., Oort F.V., Verburg T. (2007) Related variety, unrelated variety and regional economic growth. *Regional Studies*, vol. 41(5), pp. 685–697.
8. Frenken K., Saviotti P. (2008) Export variety and the economic performance of countries. *Journal of Evolutionary Economics*, vol. 18(2), pp. 201–218.
9. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Chung S., Jimenez J., Simoes A. (2007) The building blocks of economic complexity. *PLoS One*, vol. 2(1), e268.
10. Hausmann R., Hidalgo C.A. (2017) *Atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity*. MIT Press.
11. Hidalgo C.A., Hausmann R. (2009) The building blocks of economic complexity. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 367(1897), pp. 1817–1825.
12. Hausmann R., Hidalgo C.A., Bustos S., Coscia M., Simoes A., Yildirim M.A., Hwang J. (2014) *The atlas of economic complexity: Mapping paths to prosperity*. MIT Press.
13. Ravallion M. (2004) Competing concepts of inequality in the globalization debate. *Brookings Trade Forum Globalization, Poverty, and Inequality*, pp. 1–38. Available at: <https://www.jstor.org/stable/25063189> (accessed 14 February 2023).
14. Hartmann D., Guevara M.R., Jara-Figueroa C., Aristarán M., Hidalgo C. (2017) Linking economic complexity, institutions, and income inequality. *World Development*, vol. 93, pp. 75–93.
15. Hidalgo C.A., Klinger B., Barabási A.L., Hausmann R. (2007) The product space conditions the development of nations. *Science*, vol. 317(5837), pp. 482–487.
16. Gavrilets Y.N., Kudrov A.V., Tarakanova I.V. (2018) Analysis of the internal structure of economic growth potential. *Bulletin of CEMI RAS*, vol. 1, no. 1 (in Russian).
17. Gavrilets Y., Kudrov A., Tarakanova I. (2022) Statistical analysis and modeling of regional economy and science relationship. *Ekonomika i matematicheskie metody*, vol. 58(4), pp. 56–70. <https://doi.org/10.31857/S042473880023019-9> (in Russian).
18. *Regions of Russia. Socio-economic indicators, 2017–2019*. Moscow: Rosstat (in Russian).
19. *2019–2020 tax base and accrual structure reports for taxes and levies*. Available at: [https://www.nalog.gov.ru/rn77/related\\_activities/statistics\\_and\\_analytics/forms/](https://www.nalog.gov.ru/rn77/related_activities/statistics_and_analytics/forms/) (accessed 14 February 2023) (in Russian).
20. Afanasiev M., Kudrov A. (2021) Economic complexity and embedding of regional economies' structures. *Ekonomika i matematicheskie metody*, vol. 57(3), pp. 67–78. <https://doi.org/10.31857/S042473880016410-0> (in Russian).
21. Bierens H.J. (1994) *Topics in advanced econometrics estimation, testing, and specification of cross-section and time series models*. Cambridge University Press.
22. Bishop C.M. (2006) *Pattern recognition and machine learning*. Springer.
23. Ratkowsky D. (1993) Principles of nonlinear regression modeling. *Journal of Industrial Microbiology*, vol. 12, pp. 195–199.
24. Seber G.A.F., Wild C.J. (2003) *Nonlinear Regression*. New York: Wiley–Interscience.
25. Gretton A., Fukumizu K., Harchaoui Z., Sriperumbudur B.K. (2009) A kernel statistical test of independence. *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 1067–1074.
26. Hausman J.A. (1978) Specification tests in econometrics. *Econometrica*, vol. 46(6), pp. 1251–1271.

### About the author

#### Alexander V. Kudrov

Cand. Sci. (Phys.-Math.);

Leading Researcher, Central Economic and Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: kovlal@inbox.ru

ORCID: 0000-0003-2495-5496

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

# Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности\*

**Р.С. Рогулин** 

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Владивостокский государственный университет  
Адрес: Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41Дальневосточный федеральный университет  
Адрес: Россия, 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10

## Аннотация

Формирование цепочек поставок сырья очень тесно связано с проблемами производства на лесоперерабатывающем предприятии. С начала второй промышленной революции актуальным стоял вопрос о формировании цепочек поставок сырья и об оптимальном расчете объемов производства для каждого отдельного дня. В данной статье рассматривается лесопромышленное предприятие, не имеющее собственных источников древесины, которое ежедневно решает задачу обеспечения поставок сырья и оптимальной загрузки производства. В качестве источника сырья рассматривается товарно-сырьевая биржа, где лоты случайно появляются каждый день в разных сырьевых регионах. В научной литературе существует множество подходов к расчету оптимального значения прибыли на всем горизонте планирования, однако они не учитывают множество важных для лесоперерабатывающего предприятия особенностей. В работе представлена математическая модель, которая представляет собой механизм принятия ежедневного решения на всем горизонте планирования, и отличающуюся тем, что позволяет учитывать долю полезного объема и время доставки сырья в условиях неопределенности. Результатом модели является оптимальная траектория прибыли, учитывающая объемы сырья, время доставки лотов, объем прибыли, объем производства товаров. Модель протестирована на данных товарно-сырьевой биржи России и одного из предприятий Приморского края. Анализ результатов показал, что существуют сложности в планировании цепочек поставок и объемов производства. Выполнена оценка оптимальности сырьевых регионов. Сформулированы достоинства и недостатки математической модели.

\* Статья опубликована при поддержке Программы НИУ ВШЭ «Университетское партнерство»

**Ключевые слова:** оптимизация производства, транспортная задача, лесная промышленность, товарно-сырьевая биржа, цепочки поставок, выпуск продукции

**Цитирование:** Рогулин Р.С. Математическая модель формирования цепочек поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

## Введение

**Ц**епочка поставок древесины играет жизненно важную роль в мировой экономике, обеспечивая необходимым сырьем различные отрасли промышленности, такие как строительство [1–4], производство мебели [5–7] и бумаги [8]. Цепочки поставок сложны и динамичны, их формирование зависит от эффективности управления лесным хозяйством, процессами заготовки, переработки древесины, распределения и потребления продукции из нее. Эффективное управление цепочкой поставок (Supply Chain Management, далее SC, SCM) древесины имеет решающее значение для обеспечения устойчивости производства и сохранения ресурсов при одновременном содействии экономическому росту.

В последние годы возрос интерес к моделированию цепочки поставок древесины для оптимизации и повышения устойчивости производства [9–11]. Современные модели формирования SC разрабатываются для получения менеджментом ценной информации о производительности цепочки поставок и могут использоваться для повышения устойчивости и эффективности стратегий управления [12, 13]. Существует значительное количество исследований, область применения которых лежит в различных областях лесопромышленного производства: управление лесным хозяйством и процессами лесозаготовки, переработки, распределения и потребления.

Моделирование процессов управления цепочками поставок древесины имеет решающее значение для эффективного использования ресурсов, снижения воздействия на окружающую среду и улучшения экономических показателей. С развитием технологий при разработке моделей стали использоваться такие методы анализа данных, как машинное обучение и стохастическая оптимизация, обеспечивающие более точные прогнозы и эффективные инструменты для принятия решений.

## 1. Обзор литературы

Цепочка поставок древесины представляет собой сложную сеть процессов, включающую такие, как управление лесным хозяйством, заготовку, транспортировку, переработку и распределение. Эффективное управление цепочкой поставок древесины имеет решающее значение для оптимизации операций и достижения целей устойчивого развития любого предприятия лесопромышленной отрасли. Математическое моделирование является мощным инструментом поддержки процессов принятия решений и оптимизации различных аспектов управления цепочками поставок древесины. Рассмотрим опыт моделирования проблемы управления цепочками поставок.

### 1.1. Модели оптимизации заготовки древесины

Оптимизация процессов заготовки древесины необходима для устойчивого лесопользования и максимизации экономической отдачи. Математические модели, такие как модели смешанно-целочисленного линейного программирования (Mixed-Integer Linear Programming, далее MILP), широко применяются для определения оптимального времени и пространственного распределения лесозаготовок. В таких моделях учитываются различные факторы, включая рост древесины, рыночный спрос, эксплуатационные расходы и экологические ограничения, для поддержки процессов принятия решений. Например, в работе [9] авторы предлагают модель MILP, которая оптимизирует операции по заготовке древесины и строительству дорог в нескольких лесозаготовительных районах с учетом экономических, экологических и транспортных факторов. Модель направлена на максимизацию чистой приведенной стоимости доходов от древесины при минимизации затрат на лесозаготовку и воздействия на окружающую среду.

Эффективная логистика и транспортировка являются важнейшими компонентами цепочки поставок древесины, обеспечивая своевременную



доставку продукции из древесины и минимизируя транспортные расходы. Методы математического моделирования применяются для оптимизации транспортных маршрутов, планирования транспортных средств и управления запасами. Авторы исследования [10] разработали модель MILP для многодневной маршрутизации грузовых автомобилей. Применялась модель в бразильской лесозаготовительной компании, управляющей одной фабрикой и несколькими лесозаготовительными площадками, оборудованными кранами. Модель учитывает проблему LTL (Less Than Truckload problem), допуская многократное перемещение грузовиков между несколькими лесными пасаками. Целевая функция направлена на минимизацию транспортных расходов, количество грузовиков, количество рейсов и затраты на сверхурочные. Модель была применена к случаю с 5 доступными харвестерами и 48 грузовиками. Методы, напрямую использующие модели оптимизации, чувствительны к размерности проблемы с точки зрения количества переменных и ограничений. Кроме того, такие модели обычно требуют допущений, например, о полных грузовиках, как в работе [10], чтобы появилась возможность сформулировать математическую модель решаемой проблемы.

### 1.2. Модели управления запасами и цепями поставок

В литературе известны многие модели, посвященные разработке и применению различных подходов к решению множества проблем в области управления запасами/цепочками поставок. Например, применялись интуиционистские нечеткие множества (Intuitionistic Fuzzy Set, далее IFS) [14, 15]. Меры возможности, необходимости и достоверности используются, как новый подход к решению интуиционистских задач нечеткой оптимизации [16, 17]. Они также применяются в производстве, моделях запасов с дефицитом для получения оптимальных по Парето решений [18]. Многокритериальная оптимизация IFS применялась, например, в исследованиях [19–21].

Кроме того, применялись и методы динамического программирования для оптимизации проблем многоступенчатой цепочки поставок. Так была разработана модель нейродинамического программирования в работе [22] для решения двухэтапной задачи оптимизации запасов в условиях неопределенности спроса. Апробация модели на практи-

ке показала снижение затрат предприятия на 10%. Авторы исследования [23] сформулировали задачу маршрутизации запасов, управляемую поставщиком, в виде марковского процесса принятия решений и применили метод приближенного динамического программирования для ее решения. Авторы работы [24] разработали модель приближенного динамического программирования (Approximate Dynamic Programming, далее ADP) на основе лагранжевой релаксации для управления запасами сети с одним продуктом и несколькими сайтами. Авторы работы [25] используют методы ADP и применяют стохастическую аппроксимацию для расчета оптимальных уровней базовых запасов с учетом проблем поставщика новостей на горизонте нескольких периодов с невыполненными заказами и упущенных продаж. Авторы исследования [26] применяют методы ADP для решения проблемы управления запасами на нескольких предприятиях и с заданным количеством продуктов с учетом изменчивости некоторых процессов.

Обучение с подкреплением также применялось к проблеме управления запасами (Inventory Management Problem, далее IMP) [27]. Так коллектив авторов работы [28] используют Q-learning для четырехступенчатой IMP с 12-недельным циклом и нестационарным спросом. В работе [29] авторы обучили архитектуру нейронной сети Deep Q-Network, чтобы достигать почти оптимальных результатов в игре Beer Game – классический пример многоуровневой IMP. В работе [30] используются методы Q-обучения и модель SARSA для оптимального пополнения складских запасов со скоропортящимися товарами.

### 1.3. Выводы и формулировка проблемы исследования

Моделирование стало важным инструментом анализа и улучшения цепочек поставок в различных областях производства. Сложность цепочки поставок, наряду с растущим требованием минимизировать воздействие на окружающую среду, внедрять устойчивые методы и учитывать социальные и операционные соображения, привело к разработке широкого спектра моделей. В цепочке поставок древесины моделирование позволяет оптимизировать поток сырья от его происхождения до конечного пункта назначения за счет минимизации затрат, снижения воздействия на окружающую среду и повышения эффективности.

Как показал обзор литературы, существует большое количество работ, посвященных тематике SCM, однако многие модели и подходы неприменимы на практике при управлении лесопромышленным предприятием в вопросах формирования цепей поставок в совокупности с определением объемов производства.

Стоит отметить, что в существующих моделях сказывается отсутствие, во-первых, учета коэффициента полезного объема сырья, который дойдет до склада, который предстоит сперва отделить от гнили, а затем переработать в труху и далее путем пресса произвести ОСБ плиты, во-вторых, инструмента ежедневного принятия решения, основанного на предложении лотов с сырьем на бирже в текущий день. Например, работа [12] посвящена схожей проблеме, но не учитывает рассматриваемой особенности с полезным объемом сырья, который дойдет до склада, а, кроме того, при отсутствии качественного прогноза ситуации на товарно-сырьевой бирже (когда и в каком объеме появятся лоты в продаже на бирже) и вовсе не является применимой на практике. Работа [11] посвящена этой же проблеме, но с уклоном на ценообразование на конечные товары. Здесь также, как в работе [12], не наблюдается учет коэффициента полезного объема сырья, которое может дойти до склада. Кроме того, повторяется и вторая отрицательная сторона модели – нет возможности ежедневного принятия решения на основе текущего предложения на бирже. Однако стоит отметить, что проблема с учетом коэффициента полезного объема сырья не нова и рассматривалась в работе [13]. Эта статья посвящена оценке оптимального значения прибыли на всем горизонте планирования производственного цикла лесопромышленного производства, а именно: SCM и расчет объемов производства, где поток сырья осуществляется с товарно-сырьевой биржи. Однако, все также нет четкого описания, как использовать модель так, чтобы предприятие могло принимать решения, связанные одновременно с проблемами закупки сырья с биржи и с расчетом объемов производства так, чтобы значение прибыли в конце горизонта планирования было максимальным и одновременно предельно близким к оптимальному.

Таким образом, остается нерешенной проблема управления предприятием лесопромышленной от-

расли, у которого нет собственных источников сырья для производства, и которое каждый день принимает решение по формированию потока сырья с товарно-сырьевой биржи и одновременно по объему выпуска готовой продукции на всем горизонте планирования, максимизируя значение суммарной прибыли, в условиях неопределенности предложения лотов на бирже и с учетом коэффициента полезного объема сырья, технологии производства товаров и специфики логистики сырья до склада. Данная работа посвящена разработке модели, решающую текущую проблему.

## 2. Цель, задачи и гипотеза исследования

Рассмотрим процессы функционирования предприятия. Наиболее важными для лесопромышленного производства являются: формирование цепочек поставок сырья и объемы производства товаров.

Рассмотрим источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами лесных участков из различных регионов об использовании торговой площадки. После совершения биржевой сделки между предприятием по переработке сырья (лесопромышленным комплексом) – заказчиком и арендатором лесных участков (лесозаготовителем) – продавцом, заявленный в договоре<sup>1</sup> объем сырья отправляется заказчику. Выкупить лот на бирже можно лишь целиком [11–13, 31–33].

Цель настоящего исследования заключается в разработке математической модели, которая позволяет формировать цепочки поставок сырья с товарно-сырьевой биржи в условиях неопределенности предложения и отличающуюся от уже известных моделей тем, что, во-первых, процесс принятия решения осуществляется ежедневно, и, во-вторых, позволяет учитывать вероятное время доставки сырья до склада и изменение рабочего объема сырья, которое зависит от внешних факторов (температура, насекомые и др.).

Задачи исследования:

1. Построение экономико-математической модели.
2. Составление алгоритма поиска решения для разработанной модели.
3. Анализ результатов тестирования модели.

<sup>1</sup> В договоре купли–продажи указываются способы и цена доставки древесины. Доставка может осуществляться силами предприятия, однако далее мы будем рассматривать доставку сырья силами поставщика.

Сформулируем гипотезу исследования. Известно, что такую задачу можно решить оптимально, когда уже известны все величины, которые были разыграны (лоты, время в пути). Однако нет понимания, а можно ли принимать решения каждый день по формированию цепочек поставок сырья и об объемах производства так, чтобы значение прибыли было максимально близко к оптимальному. Выдвинем предположение, что такая модель, которая позволяет решать задачу максимально близко к оптимальному, существует, где решения принимаются каждый день, имея лишь данные текущего дня и множество предположений о том, какая ситуация будет «завтра».

### 3. Математическая модель<sup>2</sup>

Любое производство, в том числе лесопромышленное, не способно функционировать без существования источника сырья. Для обеспечения поставок необходимого объема сырья требуется определить поставщиков древесины. Для этого воспользуемся услугами Санкт-Петербургской международной товарно-сырьевой биржи (СПбМТСБ)<sup>3</sup>. На бирже каждый день публикуются данные о том, сколько сделок (заявок) было совершено, по какой цене и какой объем сырья был продан. Кроме того, биржа оказывает услуги по доставке сырья до потребителя, что также включается в цену товара. На бирже представлены многие регионы, откуда потенциально может поступать сырье [11–13, 33]. Входные данные для решения задачи будем специально изменять или расширять, чтобы затруднить поиск решения моделью.

После поступления достаточного объема сырья на склад производства предприятие должно принять решение об оптимальном векторе производства конечной продукции, с ориентацией на максимально возможный объем производства [11–13, 33].

Рассмотрим схему закупки сырья и расчет объемов производства. Известно, что максимизация прибыли на предприятии достигается тогда и только тогда, когда в единой модели происходит расчет необходимых величин, то есть в модели учитывается одновременно и объем производства, и поток сырья. Поскольку предприятие обычно не знает, что будет завтра на рынке (бирже), то оно прини-

мает решение только сегодня с опорой на расчетную ситуацию на предприятии «завтра».

Отсюда возникает вопрос о том, какой срок планирования  $\tilde{T} \geq 1$  выбрать. В этой работе будем его задавать одним значением для решения всей задачи.

Введем некоторое предположение. Пусть, во-первых, предприятию за некоторое значение  $E$  периодов известно, какие были лоты на бирже разыграны и ситуация с загруженностью на железных дорогах (ЖД), во-вторых, предположим, что ситуация на рынке сырья не сильно меняется с годами, тогда предприятие, исходя из этих данных при наличии информации на своем предприятии за эти же периоды может построить модель для поиска оптимального решения. Тогда можно получить множество оптимальных траекторий значений прибыли и объемов сырья на складе каждый день на всем горизонте планирования. В данной работе сосредоточимся на рассмотрении траектории запасов сырья на складе.

В этом случае можно построить регрессию, которая бы отражала среднее ожидаемое значение совокупно по всем типам сырья на складе  $\tilde{b}_m$  в каждый отдельный день  $m$  на всем горизонте планирования в  $M$  дней в зависимости от того какие лоты сегодня доступны.

Поскольку решение предстоит искать на некотором интервале  $[m, \min(M, m + \tilde{T})]$ , а значение ожидаемого суммарного объема сырья известно лишь на текущий день  $m$   $\tilde{b}_m$ , то возникает вопрос о том, какой объем сырья на складе мы ожидаем в следующие дни  $[m + 1, \min(M, m + \tilde{T})]$ , где  $m + 1 \neq M$ .

Вернемся к найденным оптимальным траекториям суммарного объема сырья на складе на предыдущих  $E$  периодах. Отсюда можно рассчитать значение

$$\tau(m) = \begin{cases} \frac{\sum_{e=1}^E \sum_l b_{lm}(e)}{\sum_l b_{l(m-1)}(e)}, & m < M, \\ 0, & m = M \end{cases}$$

где  $\sum_l b_{lm}(e)$  – это суммарный объем сырья по всем их типам  $l$  в день  $m$  для каждой отдельной выборки входных данных  $e \in E$ . Тогда будем осуществлять поиск такого решения текущей зада-

<sup>2</sup> С программной реализацией разработанной модели и статистикой продаж биржи можно ознакомиться по ссылке <https://drive.google.com/drive/folders/1THzU7BHjGgpUgZiXQbvJNaIA14biWO1t?usp=sharing>

<sup>3</sup> <https://spimex.com/>

чи, которое бы принимало во внимание прогнозное значение  $\tilde{b}_m$  в текущий день  $m$  и некоторую коррекцию на весь период планирования  $\min(M - m, \tilde{T})$  вперед

$$\prod_{t=1}^{\tilde{T}} \tau(m + \underline{t}), t = 0: \min(M - m, m + \tilde{T}).$$

Введем следующий набор параметров и переменных.

Параметры:

$p_{km}$  – цена на товар типа  $k$  в день  $m$ ;

$c_{ilrm}$  – цена лота  $i$  с типом сырья  $l$  из региона  $r$ , появившаяся на бирже в день  $m$ ;

$A_{lk}$  – норма потребления сырья типа  $l$  на производство единицы товара типа  $k$ ;

$\gamma_{\tilde{m}m}$  – коэффициент порчи сырья, купленного в день  $\tilde{m}$  ко дню  $m$  ( $m \geq \tilde{m}$ );

$V_{ilrm}$  – объем сырья в лоте  $i$  с типом сырья  $l$  из региона  $r$ , появившаяся на бирже в день  $m$ ;

$H_{nk}$  – максимальный объем производства товаров типа  $k$  в день  $m$ ;

$\underline{b}$  – неприкосновенный уровень запаса сырья;

$\bar{b}$  – максимальная вместимость склада;

$B_0$  – начальный бюджет;

$FC$  – постоянные издержки;

$M$  – горизонт планирования;

$L_r$  – расстояние от склада до региона  $r$ ;

$S_m$  – расстояние, пройденное заявкой в день  $m$ ;

$\pi_m$  – значение прибыли на момент день  $m$ ;

$\varepsilon^{(3)}$  – шумовая (случайная величина) компонента рабочего объема сырья, который дошел до склада;

$left$  и  $right$  – минимальное и максимальное значение случайной величины, распределенной по равномерному закону;

$LN(a_m, \delta_m)$  – логнормальное распределение случайной величины с параметрами  $(a_m, \delta_m)$  соответственно;

$\tilde{T}$  – период, на который предприятие решает задачу  $F_m^{(1,2)}$  (дни);

$E$  – число различных наборов входных параметров  $\{V_{ilrm}(e), c_{ilrm}(e), T_{\tilde{m}}(e)\}$ .

Рассмотрим обозначение с тильдой над параметром и без. Будем считать, что значение с тильдой над переменной – это значение, которое оценивает предприятие, а без тильды – ее реальное значение. Так, например,

$T_{\tilde{m}}$  – время, за которое выкупленный в день  $\tilde{m}$  лот из региона  $r$  дойдет до склада;

$\tilde{T}_{\tilde{m}}$  – время, за которое по оценке предприятия лот, выкупленный в день  $\tilde{m}$  лот из региона  $r$ , дойдет до склада.

Переменные:

$x_{km}$  – объем производства товаров типа  $k$  в день  $m$ ;

$\lambda_{ilrm}$  – факт покупки лота  $i$  с типом сырья  $l$  из региона  $r$ , появившаяся на бирже в день  $m$ ;

$b_{lm}$  – уровень запаса сырья типа  $l$  на складе в день  $m$ ;

$b_{lm}(e)$  – значение запаса сырья типа  $l$  в день  $m$ , которое было найдено при решении задачи на данных  $e$ .

Задача  $F_m^{(1,2)}$  примет вид (1–18). Целевая функция (1) направлена на максимизацию значений прибыли в каждый день  $m + t - 1$ :

$$\sum_{t=1}^{\tilde{T}} \left( \sum_k p_{k(m+t-1)} x_{k(m+t-1)} - \sum_{j=1}^2 \sum_l N^{(j)} \varepsilon_{l(m+t-1)}^{(j)} \right) - \sum_{i,l,r} c_{imrl} \lambda_{imrl} \rightarrow \max \quad (1)$$

Соотношение (2) задает взаимоотношение между объемами сырья на складе, объемом потраченного на производстве сырья и объемами сырья, которые дошли до склада:

$$b_{l(m+t-1)} - b_{l(m+t-2)} + \sum_k A_{lk} x_{k(m+t-1)} - \tilde{\gamma}_{\tilde{m}(m+t-1)} \sum_{i,r} V_{imrl} \lambda_{imrl} + \sum_{j=1}^2 (-1)^j \varepsilon_{l(m+t-1)}^{(j)} = 0, \quad (2)$$

где

$t = 1: \tilde{T}$ ;

$\tilde{T} = \text{const}$ ;

$\tilde{T} \geq \max(\tilde{T}_{\tilde{m}})$ ;

$N^{(j)} \gg 1$ ;

$j = 1: 2$ ;

$b_{l(m-1)} = \text{const}$ ;

$\tilde{T} = \min(\tilde{T}, M - m + 1)$ ;

$\tilde{m} + \tilde{T}_{\tilde{m}} = m + t - 1$ .

Ограничения (3–4) задают возможные пределы значений переменных, отвечающих за объем производства каждого типа товара в каждый день (3) и когда факт покупки сырья на бирже является переменной, а в каких случаях считается константой (4). Так переменная  $\lambda_{imrl}$ , отвечающая за факт принятия решения по покупке лота  $i$  в день  $\tilde{m}$  из региона  $r$  с типом сырья  $l$  является константой тогда и только тогда, когда  $\tilde{m} \leq m$ , где  $\tilde{m}$  – дата

появления рассматриваемого лота на бирже, а  $m$  – день принятия решения. В остальных случаях является переменной оптимизации:

$$x_{km} \in N, \tag{3}$$

$$\lambda_{imrl} = \begin{cases} \text{const}, \tilde{m} \leq m \\ \{0; 1\}, \begin{cases} \tilde{m} = m \\ \tilde{T}_{\tilde{m}} = t - 1. \end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

Ограничение (5) направлено на то, чтобы поиск решения происходил с опором на необходимый суммарный объем сырья на складе. В конце горизонта планирования будем считать, что предприятие останавливает свое производство, поэтому ему не требуется сырье на складе:

$$\sum_l b_{l(m+t-1)} = \begin{cases} \min \left( \bar{b} \cdot \prod_{\underline{t}=1}^t \tau(m+\underline{t}) \cdot \tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m) \right), \\ t \in (1, \tilde{T}) \\ 0, t = M - m + 1, \end{cases} \tag{5}$$

где

$$\sum_l b_{lm} = \tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m);$$

$$\tau(m) = \begin{cases} \frac{\sum_{e=1}^E \sum_l b_{lm}(e)}{\sum_l b_{l(m-1)}(e)}, m < M \\ 0, m = M. \end{cases}$$

Неравенство (6) утверждает, что не может быть ситуации, чтобы объем сырья на складе опустился ниже нуля с учетом штрафных переменных  $\varepsilon_{l(m+t-1)}^{(j)}$ :

$$b_l(m+t-1) + \sum_{j=1}^2 (-1)^j \varepsilon_{l(m+t-1)}^{(j)} \geq 0. \tag{6}$$

Неравенство (7) отражает текущий уровень бюджета предприятия в каждый отдельный день  $m + \underline{t} - 1$  на всем горизонте планирования  $m: m + t - 1$ :

$$\pi_{m-1} + \sum_{\underline{t}=1}^t \left( \sum_k p_{k(m+\underline{t}-1)} x_{k(m+\underline{t}-1)} \right) - \sum_{i,l,r} c_{imrl} \lambda_{imrl} \geq FC \cdot t, \tag{7}$$

где  $\pi_0 = B_0$ .

Неравенство (8) призвано не допустить ситуации, чтобы объем сырья на складе превышал показатель максимальной вместимости:

$$\sum_l b_{l(m+t)} \leq \bar{b}. \tag{8}$$

Формулы (9–10) – это система, разыгранные значения в соответствии с которой отражают максимальное время в пути лота:

$$\tilde{T}_{\tilde{m}} = m^* : \begin{cases} \left| L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \right| \rightarrow \min \\ L_r - \sum_{\underline{m}=\tilde{m}}^{m^*} S_{\underline{m}} \leq 0 \end{cases} \tag{9}$$

$$S_{(m+t-1)} \sim LN(\tilde{a}_{(m+t-1)}, \delta_{(m+t-1)}). \tag{10}$$

Формулы (11–12) задают оценку коэффициента полезного объема сырья, которое дойдет до склада. В формуле (11) используется функция  $\arctg(x)$  для отражения дошедшего до склада полезного объема сырья. Так как функция  $y = \arctg(x)$  может принимать значения в интервале  $[0; \pi/2]$ ,  $x \in [0; \infty]$ , то необходимо внести изменения в зависимость между значением коэффициента<sup>4</sup> дошедшего до склада сырья и тем, сколько времени прошло с момента появления лота на бирже<sup>5</sup> таким образом, чтобы выполнялось условие:  $0 \leq \arctg(x) \leq 1$ ,  $x \in [0; \infty]$ ,  $\beta = \text{const}$ ,  $\tilde{\beta} = \text{const}$ :

$$\tilde{\gamma}_{\tilde{m}(m+t-1)} = \min \left( 1; \max \left[ 0; 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \left( \tilde{\beta} \left( (m+t-1) - \tilde{m} \right) + \tilde{\varepsilon}^{(3)} \right) \right] \right), \tag{11}$$

$$\tilde{\varepsilon}^{(3)} \sim U(\widetilde{left}), (\widetilde{right}). \tag{12}$$

Формулы (13–14) ограничивают значения некоторых переменных:

$$0 \leq x_{k(m+t-1)} \leq H_{k(m+t-1)}, \tag{13}$$

$$\varepsilon_{l(m+t-1)}^{(j)} \geq 0, j = 1:2. \tag{14}$$

После решения происходит расчет следующих ключевых параметров (15–18):

$$\pi_m = \pi_{m-1} + \sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{imrl} \lambda_{imrl} - FC, \tag{15}$$

$$\gamma_{\tilde{m}(m+t-1)} = \min \left( 1; \max \left[ 0; 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \left( \beta \left( (m+t-1) - \tilde{m} \right) + \tilde{\varepsilon}^{(3)} \right) \right] \right), \tag{16}$$

<sup>4</sup> Будем считать, что этот коэффициент находится в интервале от 0 до 1.

<sup>5</sup> Введем допущение о том, что сырье, обозначенное в лоте, было произведено в тот же день, в который лот был выставлен на торги.



$$b_{im} = b_{im-1} - \sum_k A_{ik} x_{km} + \gamma_{im} \left( \sum_{i,r} V_{imrl} \lambda_{imrl} \right), \quad (17)$$

где  $\tilde{m} = m - \tilde{T}_{im}$ ;

$$m = m + 1. \quad (18)$$

Пересчет основных показателей происходит после найденного решения для дня  $m$  (15–17). В равенстве (18) знак равно используется в качестве оператора присваивания значению слева от знака равно значению справа.

#### 4. Калибровка модели

Для апробации модели было выбрано одно из ведущих лесопромышленных предприятий Приморского края. В наибольшей степени на бирже представлены предприятия из четырех регионов: Иркутская область ( $r = 1$ ), Пермский край ( $r = 2$ ), Республика Бурятия ( $r = 3$ ), Московская область ( $r = 4$ ). Горизонт планирования лежит в интервале между 1 февраля 2022 года и серединой мая 2022 года.

Зная координаты предприятий, можно было бы вести с ними диалог напрямую, минуя биржу. Однако биржа скрывает реальные координаты, поэтому все сделки проводятся через биржу как со стороны покупателя, так и со стороны поставщика [11].

С официального сайта биржи и у предприятия за указанный период был собран массив следующих данных: цены предлагаемых заявок  $c_{im}$ , объемы заявок  $v_{ilm}$ , цены реализации конечных товаров  $p_{ki}$ , количество заявок по каждому типу сырья. Поскольку на сайте бирже работает программное обеспечение, которое не позволяет собирать данные автоматически, то можно сделать вывод, что данные не разрешается использовать в больших объемах, поэтому все вышеперечисленные значения будут зашумлены и незначительно изменены.

Основные исходные данные<sup>6</sup>, характеризующие предприятие, представлены в *таблицах 1 и 2*.

Таблица 1.

#### Основные исходные параметры предприятия

Параметры, ед. измерения	Значения
$p_{km}$ , руб	$\forall m: (1; 1,5; 1,6; 1,7) \cdot 10^4$
$N^{(i)}$ , у.е.	$15p_{km}$
$\tilde{T}$ , дни	22
$M$ , дни	100
$\bar{b}$ , м <sup>3</sup>	7000
$FC$ , руб	100 000
$B_0$ , руб	3 000 000
$L_r$ , км	(3740, 7560, 3250, 9000)
$H_{nk}$ , ед.	$\forall m, k: H_{km} = 4$

Источники: предприятие, автор.

Таблица 2.

#### Затраты сырья на производство единицы продукции

	Номер товара ( $k$ )				
	1	2	3	4	
Номер типа сырья ( $l$ )	1	2	3	4	3
	2	1	3	3	5

Источники: предприятие.

Для вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab и функцией из пакета расширения `intlinprog`<sup>7</sup> для поиска решений задач линейной оптимизации.

При оценке функции<sup>8</sup>  $\tilde{b}_m(\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m)$  с входными параметрами  $\{\{V_{imrl}\}_{i,r}, \{c_{imrl}\}_{i,r}, m\}$  использовались нейронные сети<sup>9</sup> (НС) со следующими свойствами<sup>10</sup>: 10 скрытых слоев с функцией активации  $\text{tg}(x)$ , 1 выходной слой (ReLU), алгоритм обучения – Levenberg–Marquardt. Коэффициент детерминации (Евклидова метрика)  $R^2 = 0,78$ .

<sup>6</sup> Автор не имеет прав на публикацию некоторых данных предприятия ввиду подписания им договора «О неразглашении коммерческой тайны». В связи с этим автор приносит свои извинения изучающим текущий труд.

<sup>7</sup> <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

<sup>8</sup> Данные для расчета взяты с Предприятия и с архива публикаций биржи.

<sup>9</sup> <https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/fitnet.html>

<sup>10</sup> Применение НС обусловлено тем, что классические методы регрессионного анализа не дали положительных результатов.



## 5. Обсуждение

Рассмотрим, как изменялся объем сырья на складе (рисунки 1, 2). Видно, что поведение сырья на складе в среднем стабильно в отличие от результатов поиска оптимального решения [13], где максимальное значение суммарного запаса сырья достигается ближе к 70-му дню. Более того, редкие выбросы показывают, что состояние уровней сырья на складе являются стабильными, что позволяет предприятию оптимизировать управление складским помещением и выделить из него максимально точно необходимый объем склада, а осталь-

ную часть использовать под другие нужды без необходимости расширения или наоборот.

На рисунке 3 изображены объемы производства товаров. Видно, что в среднем объемы производства стремятся к максимальной отметке в четыре единицы. Редкие выбросы свидетельствуют о том, что производство работает стабильно. При поиске оптимального решения в работе [13] показано, что объемы производства всегда равны 4. Результаты работы текущего метода поиска решения достаточно близки к оптимальному, с точки зрения объемов производства.

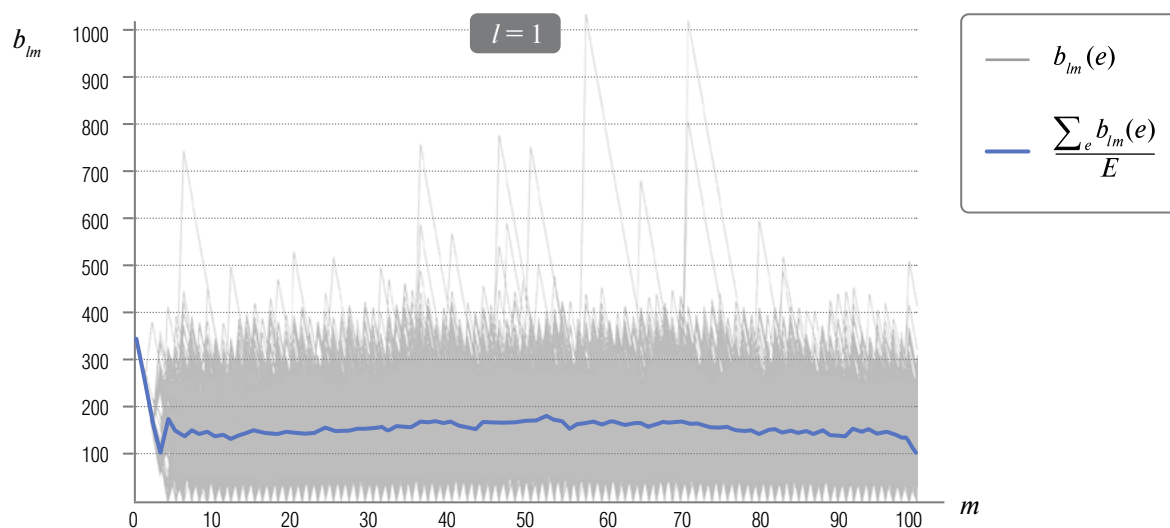


Рис. 1. Визуализация поведения траектории запасов сырья типа  $l = 1$  на складе на всем горизонте планирования.

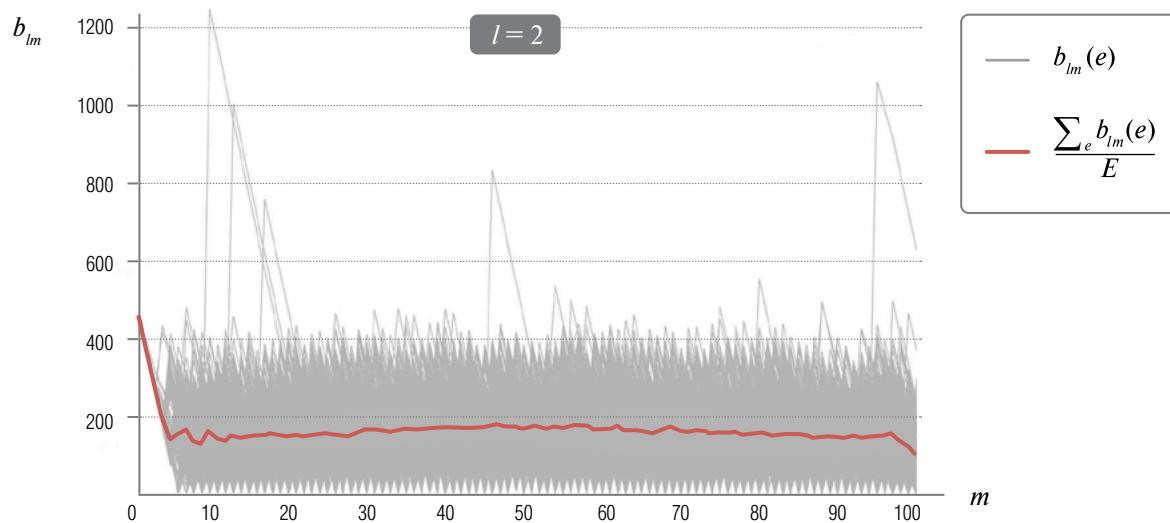


Рис. 2. Визуализация поведения траектории запасов сырья типа  $l = 2$  на складе на всем горизонте планирования.

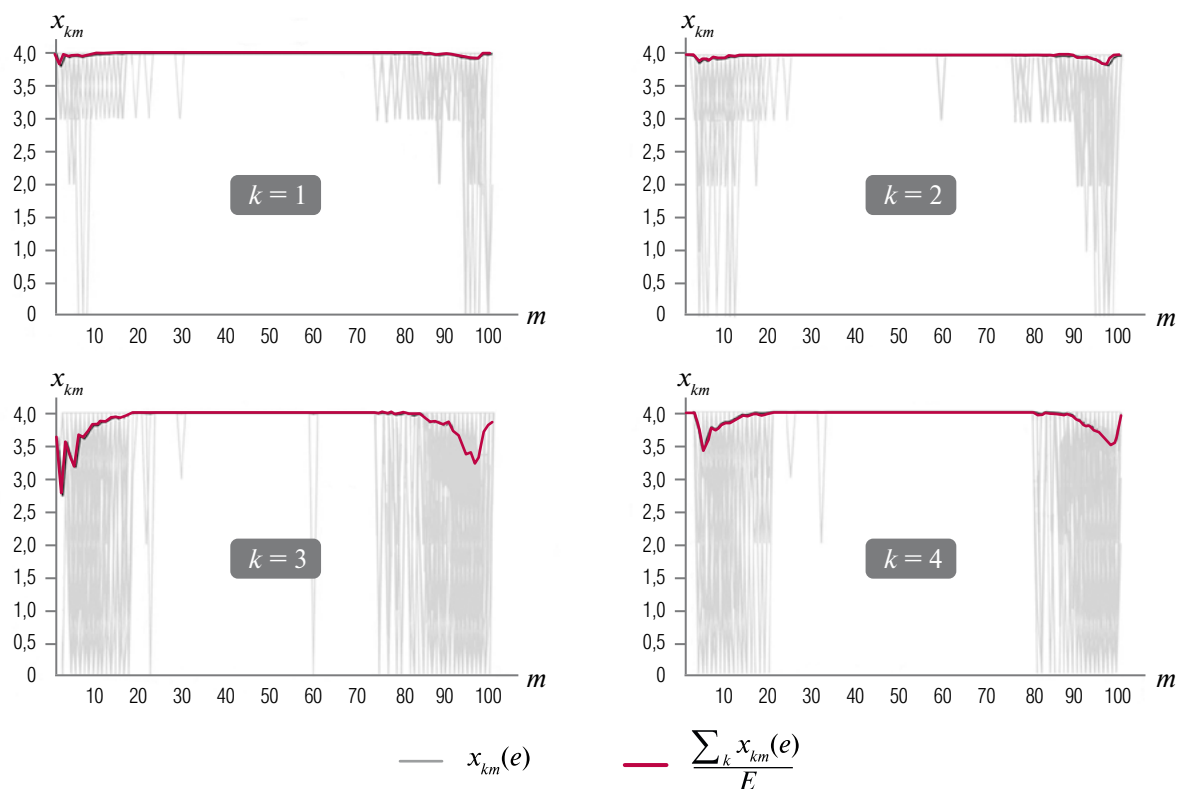


Рис. 3. Визуализация объемов производства товаров по каждому типу.

Наиболее важным показателем остается значение прибыли на всем горизонте планирования. Для оценки траектории прибыли рассмотрим рисунок 4. Обозначим через  $opt_m(e)$  оптимальное значение прибыли в день  $m$  для выборки данных  $e$ .

Поведение средних значений объемов прибыли показывает, что доля отклонения от оптимального решения не значительна и составляет 0,1964 в конце горизонта планирования. Значение прибыли стабильно растёт.

Рассмотрим положительные, отрицательные стороны и направления для дальнейшего развития текущей модели. К положительным сторонам модели можно отнести:

1. Концептуальную простоту исследования в части моделирования — методы оптимизации линейных задач получили серьезную проработку в науке.
2. Учитывает множество важных аспектов лесопромышленной отрасли, например, полезный объем сырья, который поступит на склад, время лота в пути.
3. Позволяет принимать решение в каждый день планирования, что соответствует тому, как в реальности происходит процесс планирования

производства и формирования цепочек поставок сырья.

4. Как показал анализ полученного решения на примере одного из предприятий Приморского края и данных биржи, полученная прибыль не сильно отличается от оптимального значения.
5. Данная модель может включать в себя и другие процессы лесопромышленного комплекса такие, как логистика, проблема раскрытия и другие.
6. Как следует из работы [12, 13, 34], необходимо учитывать изменение пропускной способности ЖД при формировании цепочек поставок. Данная работа учитывает эту особенность (ограничения (9–10)).
7. Поведение значений сырья на складе более предсказуемые и стабильные, чем при оптимальном, но при этом происходит расплата в области значения прибыли.

К отрицательным сторонам исследования можно отнести следующие пункты:

1. Достоверно неизвестна природа значения  $\beta$  при расчете полезного объема сырья, который дойдет до склада. Вполне может так быть, что  $\beta$  — это не параметр, а некоторая функция, зависящая от времени или от других факторов.

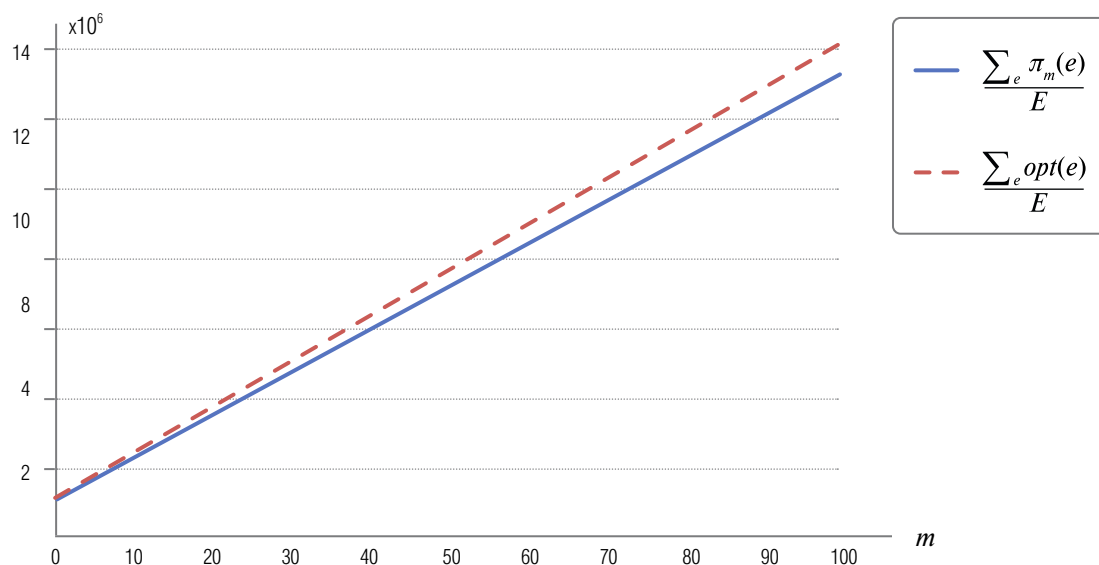


Рис. 4. Визуализация поведения траектории средних значений объемов прибыли на всем горизонте планирования.

2. В работе не рассматривается важный фактор процесса расчета стоимости товаров в каждый отдельный день или на период на всем горизонте планирования.
3. Важный фактор, который может сильно повлиять на прибыль — логистика готовых товаров до пунктов потребления, не рассмотрен в работе, однако указано, что модель можно модифицировать до состояния, когда она будет включать эту подзадачу.
4. Ключевым фактором экономики всегда являлся спрос. В данной работе не отражено влияние спроса на производство товаров.
5. Лесопромышленные предприятия часто закупают сырье в формате B2B. Было бы полезным в качестве диверсификации риска цепочек поставок сырья использовать также этот инструмент.
6. Зачастую решения могут быть носить разные меры риска. Это позволяет при грамотном подходе получать большее значение прибыли. Было бы полезно модифицировать модель так, чтобы лицо принимающее решение имело возможность при заданном уровне риска формировать цепочки поставок сырья.
7. Оценку параметров  $(\tilde{a}_m, \tilde{\delta}_m)$ , отвечающих за расчет расстояния, пройденного лотами следует рассчитывать не исходя из опыта работы предприятия (так существует высокая вероятность допустить ошибку в планировании), а математическими методами, например, нейронными сетями.
8. 2021 и 2022 годы показали, насколько важно уметь формировать и перестраивает цепочки поставок, включая сырьевые, под воздействием влияния «черных лебедей» (Black Swan Theory) и/или «носорогов» (Rhino problem). В текущей работе не представлены какие-либо рассуждения по этому поводу.
9. Неясно, как будет работать модель в случае, если качество оценки суммарного объема запаса сырья на складе  $(\tilde{b}_m(\{V_{imr}\}_{i,r}, \{c_{imr}\}_{i,r}, m))$  и  $\tau(m)$  будет низкой, и будет ли в этой ситуации модель показывать такие же результаты.

### Заключение

В работе рассмотрена модель, посвященная проблеме оптимального управления производством лесопромышленного предприятия в вопросах расчета объемов производства и формирования цепочек поставок сырья в условиях неопределенности. Модель позволяет максимизировать значение прибыли до налогообложения и представляет собой многопериодную задачу линейного программирования, отличающуюся возможностью принимать решения одновременно по обоим рассматриваемым вопросам: расчет объемов производства и формирование цепочек поставок. Результаты реализации модели включают структуру производства и последовательность закупки лотов с товарно-сырьевой биржи, а также дату последних поступления на склад. Многопериодность достигается разбиением

нием задачи на множество более мелких для ее решения в каждый отдельный день подобно тому, как это и происходит на предприятиях.

Процесс поиска решения представляет собой последовательный процесс решения задач линейного программирования по принятию решения об объемах производства и формировании цепочек поставок в каждый день. Каждый день предприятие принимает решение исходя из оценок того, когда товар придет на склад и в каком объеме, где последний уменьшается в процессе доставки под давлением внешних механических факторов. Для достижения близости решения к оптимальному принято решение рассчитать регрессию зависимости целевого суммарного объема сырья на складе в каждый отдельный день от значений текущих доступных лотов и номера дня. Также для планирования была рассчитана еще одна регрессия, которая позволяет оценить зависимость коэффициента изменения суммарного объема запаса сырья на складе от номера дня. Все регрессии рассчитывались на данных оптимальных траекторий запаса сырья, которые были получены путем использования одной из известных моделей поиска оптимального решения текущей задачи комплексно на всем горизонте планирования, которая принимала все необходимые разграниченные значения за предыдущий период.

Апробация разработанной методики поиска решения проведена на примере лесопромышленного предприятия Приморского края. На основе проведенных расчетов и найденного решения сформулированы рекомендации компании по сотрудничеству с товарно-сырьевой биржей России. Анализ решения показал, что, несмотря на территориальную близость Иркутской области к Приморскому краю, стоит обратить внимание на покупку сырья из Московской области и Республики Бурятия. Это объясняется множеством причин, среди которых можно выделить наиболее важные: достаточный потенциал в части добываемого сырья и более приемлемая ценовая политика компаний. Проведен краткий анализ возможных объемов производства продукции каждого типа. Анализ найденного решения демонстрирует, что производство большинства типов товаров должно быть максимальным на всем горизонте планирования за редким исключением.

Приведены положительные, отрицательные стороны модели, а также рассмотрены идеи для дальнейшего ее развития.

В целом, можно утверждать, что разработанная модель эффективна при поиске решения поставленной задачи. ■

### Литература

1. Kanchana S., Sneha P. A study on supply chain management in construction projects // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 5. P. 993–996.
2. Banihashemi S.A., Khalilzadeh M., Antucheviciene J., Edalatpanah S.A. Identifying and prioritizing the challenges and obstacles of the green supply chain management in the construction industry using the fuzzy BWM method // *Buildings*. 2023. Vol. 13. P. 38. <https://doi.org/10.3390/buildings13010038>
3. Cigolini R., Gosling J., Iyer A., Senicheva O. Supply chain management in construction and engineer-to-order industries // *Production Planning & Control*. 2022. Vol. 33. P. 803–810. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1837981>
4. Longhui L., Chuan Y., Lirong Q. Construction supply chain management: A systematic literature review and future development // *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 382. Article ID: 135230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135230>
5. Cervený L., Sloup R., Cervená T., Riedl M., Palátová P. Industry 4.0 as an opportunity and challenge for the furniture industry – A case study // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. Article ID: 13325. <https://doi.org/10.3390/su142013325>
6. Sachan S., Kumar V., Vardhan S., Mittal A., Verma P., Bag S. Key supply chain strategies for post-COVID-19 recovery: evidence from an Indian smart furniture industry // *International Journal of Emerging Markets*. 2022. Vol. 18. No. 6. P. 1378–1396. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-12-2021-1926>
7. Ahmadreza A., Ajang T., Shademan P., Mohammad N. I., Lashgari A. Sustainable supply chain management and performance in Iran's wooden furniture industry // *Wood Material Science & Engineering*. 2022. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2116995>
8. Jaehn F., Juopperi R. A description of supply chain planning problems in the paper industry with literature review // *Asia–Pacific Journal of Operational Research*. 2019. Vol. 36. No. 01. 1950004. <https://doi.org/10.1142/S0217595919500040>
9. Mobtaker A., Montecinos J., Ouhimmou M., Rönnqvist M. Integrated forest harvest planning and road-building model with consideration of economies of scale // *Canadian Journal of Forest Research*. 2020. Vol. 50(10). P. 989–1001. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0380>
10. Monti C.A., Gomide L.R., Oliveira R.M., França L.C. Optimization of wood supply: The forestry routing optimization model // *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2020. Vol. 92(3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263>

11. Рогулин Р.С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 3. С. 60–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.60.77>
12. Рогулин Р.С. Модель оптимизации плана закупок сырья из регионов России лесоперерабатывающим комплексом // Бизнес-информатика. 2020. Т. 14. № 4. С. 19–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.4.19.35>
13. Рогулин Р.С. Модель поиска решения задачи о формировании цепочек поставок сырья в условиях неопределенности с товарно-сырьевой биржи на склад предприятий лесопромышленной отрасли с учетом производственно-логистических особенностей // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023 (в печати).
14. De S.K., Sana S.S. A multi-periods production-inventory model with capacity constraints for multi-manufacturers – a global optimality in intuitionistic fuzzy environment // Applied Mathematical Computations. 2014. Vol. 242. P. 825–841.
15. De S.K., Goswami A., Sana S.S. An interpolating by pass to Pareto optimality in intuitionistic fuzzy technique for an EOQ model with time sensitive backlogging // Applied Mathematical Computations. 2014. Vol. 230. P. 664–674.
16. Chakraborty D., Jana D.K., Roy T.K. A new approach to solve intuitionistic fuzzy optimization problem using possibility, necessity, and credibility measures // International Journal of Engineering Mathematics. 2014. P. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2014/593185>
17. Ahmadini A.A.H., Modibbo U.M., Shaikh A.A., Ali I. Multi-objective optimization modelling of sustainable green supply chain in inventory and production management // Alexandria Engineering Journal. 2021. Vol. 60. P. 5129–5146. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.075>
18. Chakraborty S., Pal M., Nayak P.K. Intuitionistic fuzzy optimization technique for Pareto optimal solution of manufacturing inventory models with shortages // European Journal of Operations Research. 2012. Vol. 228(2). P. 381–387.
19. Garg H., Rani M. An approach for reliability analysis of industrial systems using PSO and IFS technique // ISA Transactions. 2013. Vol. 52(6). P. 701–710.
20. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. Bi-objective optimization of the reliability-redundancy allocation problem for series-parallel system // Journal of Manufacturing Systems. 2014. Vol. 33(3). P. 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.008>
21. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. Intuitionistic fuzzy optimization technique for solving multi-objective reliability optimization problems in interval environment // Expert Systems with Applications. 2014. Vol. 41(7). P. 3157–3167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.014>
22. Roy B.V., Bertsekas D.P., North L. A neuro-dynamic programming approach to admission control in ATM networks // Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Munich, Germany, 21–24 April 1997.
23. Kleywegt A.J., Non V.S., Savelsbergh M.W. Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem // Transportation Science. 2004. Vol. 38. P. 42–70.
24. Topaloglu H., Kunnumkal S. Approximate dynamic programming methods for an inventory allocation problem under uncertainty // Naval Research Logistics. 2006. Vol. 53. P. 822–841. <https://doi.org/10.1002/nav.20164>
25. Kunnumkal S., Topaloglu H. Using stochastic approximation methods to compute optimal base-stock levels in inventory control problems // Operations Research. 2008. Vol. 56. P. 646–664.
26. Cimen M., Kirkbride C. Approximate dynamic programming algorithms for multidimensional inventory optimization problems // Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing, Modeling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, 19–21 June 2013. Vol. 46. P. 2015–2020.
27. Perez H.D., Hubbs C.D., Li C., Grossmann I.E. Algorithmic approaches to inventory management optimization // Processes. 2021. Vol. 9. Article ID: 102. <https://doi.org/10.3390/pr9010102>
28. Mortazavi A., Khamseh A.A., Azimi P. Designing of an intelligent self-adaptive model for supply chain ordering management system // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2015. Vol. 37. P. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.09.004>
29. Luo L., O’Hehir J., Regan C.M., Meng L., Connor J.D., Chow C.W.K. An integrated strategic and tactical optimization model for forest supply chain planning // Forest Policy and Economics. 2021. Vol. 131. Article ID: 102571. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102571>
30. Kara A., Dogan I. Reinforcement learning approaches for specifying ordering policies of perishable inventory systems // Expert Systems With Applications. 2018. Vol. 91. P. 150–158.
31. Prajapati D., Chan F.T.S., Chelladurai H., Lakshay L., Pratap S. An Internet of Things embedded sustainable supply chain management of B2B E-Commerce // Sustainability. 2022. Vol. 14. Article ID: 5066. <https://doi.org/10.3390/su14095066>
32. Wang S., Fang Z., Wu D. Internet of things-enabled tourism economic data analysis and supply chain modeling // Technological and Economic Development of Economy. 2022. P. 1–18. <https://doi.org/10.3846/tede.2022.17120>
33. Li J., Zhang R., Jin Y., Zhang H. Optimal path of internet of things service in supply chain management based on machine learning algorithms // Computational Intelligence and Neuroscience. 2022. Article ID 4844993. <https://doi.org/10.1155/2022/4844993>
34. Vinogradova M., Rogulin R., Ermakova M., Okhrimenko I. Assessing the sources of uncertainty in supply chain management // Strategic Change. 2021. Vol. 30(5). P. 453–460. <https://doi.org/10.1002/jsc.2465>

### Об авторе

**Роголин Родион Сергеевич**

кандидат экономического наук;

доцент, кафедра математики и моделирования, Владивостокский государственный университет, Россия, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41;

старший преподаватель, департамент программной инженерии и искусственного интеллекта, Дальневосточный федеральный университет, Россия, 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

# Mathematical model of the formation of supply chains of raw materials from a commodity exchange under conditions of uncertainty

**Rodion S. Rogulin**

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Vladivostok State University

Address: 41, Gogolya Sreet, Vladivostok 690014, Russia

Far Eastern Federal University

Address: 10, Ajax Village, Russky Island, Primorskiy Territory 690922, Russia

**Abstract**

The formation of raw material supply chains is very closely related to production problems at a timber processing plant. Since the beginning of the second industrial revolution, one urgent question has been the formation of supply chains for raw materials and the optimal calculation of production volumes for each individual day. This article examines a forestry enterprise that does not have its own sources of wood, which daily solves the problem of ensuring the supply of raw materials and optimal production load. A commodity exchange is considered as a source of raw materials where lots randomly appear every day in different raw material regions. In the scientific literature, there are many approaches to calculating the optimal profit value over the entire planning horizon, but they do not consider many features that are important for a timber processing enterprise. This paper presents a mathematical model which is a



mechanism for making daily decisions over the entire planning horizon and differs in that it allows one to take into account the share of useful volume and the delivery time of raw materials under conditions of uncertainty. The result of the model is the optimal profit trajectory, considering the volume of raw materials, the delivery time of lots, the volume of profit and the production volume of goods. The model was tested on data from the Russian Commodity and Raw Materials Exchange and one of the Primorsky Territory enterprises. Analysis of the results showed that there are difficulties in planning supply chains and production volumes. An assessment of the optimality of raw material regions was carried out. The advantages and disadvantages of the mathematical model are formulated.

**Keywords:** production optimization, transport problem, forest industry, commodity exchange, supply chains, product release

**Citation:** Rogulin R.S. (2023) Mathematical model of the formation of supply chains of raw materials from a commodity exchange under conditions of uncertainty. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 41–56. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.41.56

## References

1. Kanchana S., Sneha P. (2018) A study on supply chain management in construction projects. *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, pp. 993–996.
2. Banihashemi S.A., Khalilzadeh M., Antucheviciene J., Edalatpanah S.A. (2023) Identifying and prioritizing the challenges and obstacles of the green supply chain management in the construction industry using the fuzzy BWM method. *Buildings*, vol. 13, pp. 38. <https://doi.org/10.3390/buildings13010038>
3. Cigolini R., Gosling J., Iyer A., Senicheva O. (2022) Supply chain management in construction and engineer-to-order industries. *Production Planning & Control*, vol. 33, pp. 803–810. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1837981>
4. Longhui L., Chuan Y., Lirong Q. (2023) Construction supply chain management: A systematic literature review and future development. *Journal of Cleaner Production*, vol. 382, article ID: 135230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135230>
5. Cervený L., Sloup R., Cervená T., Riedl M., Palátová P. (2022) Industry 4.0 as an opportunity and challenge for the furniture industry – A case study. *Sustainability*, vol. 14, article ID: 13325. <https://doi.org/10.3390/su142013325>
6. Sachan S., Kumar V., Vardhan S., Mittal A., Verma P., Bag S. (2022) Key supply chain strategies for post-COVID-19 recovery: evidence from an Indian smart furniture industry. *International Journal of Emerging Markets*, vol. 18, no. 6, pp. 1378–1396. <https://doi.org/10.1108/IJOEM-12-2021-1926>
7. Ahmadreza A., Ajang T., Shademan P., Mohammad N. I., Lashgari A. (2022) Sustainable supply chain management and performance in Iran's wooden furniture industry. *Wood Material Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2116995>
8. Jaehn F., Juopperi R. (2019) A description of supply chain planning problems in the paper industry with literature review. *Asia–Pacific Journal of Operational Research*, vol. 36, no. 01, 1950004. <https://doi.org/10.1142/S0217595919500040>
9. Mobtaker A., Montecinos J., Ouhimmou M., Rönnqvist M. (2020) Integrated forest harvest planning and road-building model with consideration of economies of scale. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 50(10), pp. 989–1001. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0380>
10. Monti C. A., Gomide L. R., Oliveira R. M., França L. C. (2020) Optimization of wood supply: the forestry routing optimization model. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 92(3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020200263>
11. Rogulin R.S. (2021) Mathematical model for the formation of pricing policy and plan for the production and transport system of a timber industry enterprise. *Business Informatics*, vol. 15, no. 3, pp. 60–77. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.60.77>
12. Rogulin R.S. (2020) A model for optimizing the plan for the procurement of raw materials from the regions of Russia by a timber processing complex. *Business Informatics*, vol. 14, no. 4, pp. 19–35. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2020.4.19.35>
13. Rogulin R.S. Mathematical model for finding the optimal solution to the problem of forming supply chains of raw materials in conditions of uncertainty from the commodity exchange to the warehouse of timber industry enterprises, taking into account production and logistics features. *Journal of Information Technologies and Computing Systems*, 2023 (in press) (in Russian).
14. De S.K., Sana S.S. (2014) A multi-periods production-inventory model with capacity constraints for multi-manufacturers – a global optimality in intuitionistic fuzzy environment. *Applied Mathematical Computations*, vol. 242, pp. 825–841.
15. De S.K., Goswami A., Sana S.S. (2014) An interpolating by pass to Pareto optimality in intuitionistic fuzzy technique for a EOQ model with time sensitive backlogging. *Applied Mathematical Computations*, vol. 230, pp. 664–674.

16. Chakraborty D., Jana D.K., Roy T.K. (2014) A new approach to solve intuitionistic fuzzy optimization problem using possibility, necessity, and credibility measures. *International Journal of Engineering Mathematics*, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1155/2014/593185>
17. Ahmadini A.A.H., Modibbo U.M., Shaikh A.A., Ali I. (2021) Multi-objective optimization modelling of sustainable green supply chain in inventory and production management. *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, pp. 5129–5146. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.03.075>.
18. Chakraborty S., Pal M., Nayak P.K. (2012) Intuitionistic fuzzy optimization technique for Pareto optimal solution of manufacturing inventory models with shortages. *European Journal of Operations Research*, vol. 228(2), pp. 381–387.
19. Garg H., Rani M. (2013) An approach for reliability analysis of industrial systems using PSO and IFS technique. *ISA Transactions*, vol. 52(6), pp. 701–710.
20. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. (2014) Bi-objective optimization of the reliability-redundancy allocation problem for series-parallel system. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33(3), pp. 335–347. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.02.008>
21. Garg H., Rani M., Sharma S., Vishwakarma Y. (2014) Intuitionistic fuzzy optimization technique for solving multi-objective reliability optimization problems in interval environment. *Expert Systems with Applications*, vol. 41(7), pp. 3157–3167. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.11.014>
22. Roy B.V., Bertsekas D.P., North L. A neuro-dynamic programming approach to admission control in ATM networks. Proceedings of the *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Munich, Germany, 21–24 April 1997*.
23. Kleywegt A.J., Non V.S., Savelsbergh M.W. (2004) Dynamic programming approximations for a stochastic inventory routing problem. *Transportation Science*, vol. 38, pp. 42–70.
24. Topaloglu H., Kunnumkal S. (2006) Approximate dynamic programming methods for an inventory allocation problem under uncertainty. *Naval Research Logistics*, vol. 53, pp. 822–841. <https://doi.org/10.1002/nav.20164>
25. Kunnumkal S., Topaloglu H. (2008) Using stochastic approximation methods to compute optimal base-stock levels in inventory control problems. *Operations Research*, vol. 56, pp. 646–664.
26. Cimen M., Kirkbride C. Approximate dynamic programming algorithms for multidimensional inventory optimization problems. Proceedings of the *7th IFAC Conference on Manufacturing, Modeling, Management, and Control, Saint Petersburg, Russia, 19–21 June 2013*, vol. 46, pp. 2015–2020.
27. Perez H.D., Hubbs C.D., Li C., Grossmann I.E. (2021) Algorithmic Approaches to Inventory Management Optimization. *Processes*, vol. 9, article ID: 102. <https://doi.org/10.3390/pr9010102>
28. Mortazavi A., Khamseh A.A., Azimi P. (2015) Designing of an intelligent self-adaptive model for supply chain ordering management system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 37, pp. 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.09.004>
29. Luo L., O’Hehir J., Regan C.M., Meng L., Connor J.D., Chow C.W.K. (2021) An integrated strategic and tactical optimization model for forest supply chain planning. *Forest Policy and Economics*, vol. 131, article ID: 102571. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102571>
30. Kara A., Dogan I. (2018) Reinforcement learning approaches for specifying ordering policies of perishable inventory systems. *Expert Systems with Applications*, vol. 91, pp. 150–158.
31. Prajapati D., Chan F.T.S., Chelladurai H., Lakshay L., Pratap S. (2022) An Internet of Things embedded sustainable supply chain management of B2B E-Commerce. *Sustainability*, vol. 14, article ID: 5066. <https://doi.org/10.3390/su14095066>
32. Wang S., Fang Z., Wu D. (2022) Internet of things-enabled tourism economic data analysis and supply chain modeling. *Technological and Economic Development of Economy*, pp. 1–18. <https://doi.org/10.3846/tede.2022.17120>
33. Li J., Zhang R., Jin Y., Zhang H. (2022) Optimal path of internet of things service in supply chain management based on machine learning algorithms. *Computational Intelligence and Neuroscience*, article ID 4844993. <https://doi.org/10.1155/2022/4844993>
34. Vinogradova M., Rogulin R., Ermakova M., Okhrimenko I. (2021) Assessing the sources of uncertainty in supply chain management. *Strategic Change*, vol. 30(5), pp. 453–460. <https://doi.org/10.1002/jsc.2465>

### About the author

#### Rodion S. Rogulin

Cand. Sci. (Econ.);

Associated Professor, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University, 41, Gogolya Street, Vladivostok 690014, Russia;

Senior Lecturer, Software and Artificial Intelligence Department, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Village, Russky Island, Primorskiy Territory 690922, Russia;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.57.72

# Влияние широты технологического стека на результат работы цифрового продукта: взгляд с позиций теории поглощающей способности

**И.В. Соловьев** 

E-mail: solovjev.iw@yandex.ru, isolovev@hse.ru

**В.А. Семенихин** 

E-mail: vsemenikhin@planear.ru, vasemenikhin@hse.ru

**С.П. Кущ** 

E-mail: skushch@hse.ru

Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Адрес: Россия, 119049, Москва, улица Шаболовка, д. 26–28

## Аннотация

В современной экономике, основанной на знаниях и инновациях, развитие поглощающей способности компаний является важнейшим аспектом конкурентоспособности бизнеса. В данном исследовании технологический стек сайтов рассматривается как конкретная, измеримая часть цифрового и инновационного развития компании. Вопрос о том, какие именно технологии и в каком количестве должны включаться в технологический стек сайтов на сегодняшний день является актуальным, но недостаточно освещенным. С точки зрения оценки технологического стека, в основном предлагаются качественные методы, которые являются достаточно ресурсозатратными. Целью данного исследования является определение влияния используемых технологий по характеристикам количества, уникальности и популярности в технологическом стеке продукта на результат (отсутствие критических ошибок); а также в разработке количественного подхода к оценке влияния используемых технологий на результат цифрового продукта. Количественный подход разработан и концептуализирован на основе литературного обзора, апробирован на 12 сайтах крупных российских банков, включающих 12 основных доменов и 595 субдоменов. Анализ исследования 216 онлайн-заявок на банковские

продукты показал положительную связь между долей уникальных технологий в видимом стеке технологий банка и количеством ошибок, а также отрицательную связь между долей популярных технологий в стеке и ошибками. Это исследование расширяет дискуссию о развитии поглощающей способности, способствует пониманию ограничений поглощающей способности компаний и предлагает новый количественный подход к аудиту стека технологий на веб-сайтах компаний.

**Ключевые слова:** стек технологий, инновации, поглощающая способность, цифровой маркетинг, веб-сайт

**Цитирование:** Соловьев И.В., Семенихин В.А., Куш С.П. Влияние широты технологического стека на результат работы цифрового продукта: взгляд с позиций теории поглощающей способности // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 57–72. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.57.72

### Введение

Бизнес в современном мире находится в сильной зависимости от знаний и инновационного развития. Многие исследователи отмечают способность фирмы к инновациям, актуальным преобразованиям, как один из основных факторов конкурентоспособности и перспектив ее развития (например, [1, 2]). Тем не менее знания, ведущие к актуальным преобразованиям в бизнесе, в основном рождаются за пределами конкретной компании, в неуправляемых динамичных системах, включающих большое количество акторов [3], что актуализирует вопросы, связанные с выявлением, ассимиляцией и использованием внешних знаний.

В 1990 году Коэн и Левинталь [4] предложили концепцию поглощающей способности (absorptive capacity) организаций, которая включает в себя способность распознавания ценности новой информации, ее усвоение и применение в коммерческих целях. В течение последних десятилетий данная концепция получила серьезное развитие: ряд исследователей сфокусировались на развитии концептуализации и операционализации данной концепции [5, 6], другие исследователи обратились к изучению внутренних факторов компании и факторов внешней среды, влияющих на поглощающую способность компаний [3, 7–9]. Еще одним значимым направлением развития данной концепции стало изучение эффектов на компанию от развития поглощающей способности.

Знания, полученные в рамках последнего направления исследований, на сегодняшний день являются достаточно фрагментарными, иногда

противоречивыми. Так несмотря на то, что ряд исследований подтверждает положительную связь между внедрением инноваций в компании и демонстрируемыми результатами [10–14], существуют также исследования, которые указывают на то, что связь может быть и отрицательной: стремление к инновациям может приводить к более рискованным, сложным и менее линейным процессам [15] и (потенциально) к более асимметричной отдаче [16]. Другие ученые утверждают, что фирмы с высокой инновационной активностью страдают от малых залоговых активов и длительных и неопределенных сроков окупаемости [17, 18].

В 2022 году Леманн, Менгер и Виршинг обнаружили, что взаимосвязь между производительностью фирмы и поглощающей способностью имеет перевернутую U-образную форму [9], указывая на то, что у компаний есть некая точка оптимума, после пересечения которой увеличение поглощения знаний, рост инвестиций в НИОКР нецелесообразны. Тем не менее, до сих пор не было представлено убедительных предложений относительно того, как определять эту самую точку оптимума; как выявлять полезные и неполезные инновации; как оценить собственную компанию, с точки зрения достаточной насыщенности инновациями и избежать отрицательного влияния.

В данном исследовании рассматривается технологический стек сайтов банков, как конкретная, измеримая часть цифровой и инновационной развитости компании. Сегодня невозможно представить организацию без онлайн-присутствия в виде сайта, посадочных страниц для продвижения конкретных товаров или услуг и онлайн-форм для заполнения

заявок. Чем активнее компания взаимодействует со своими клиентами в цифровых каналах, тем больше внимания она уделяет онлайн технологиям и технологическому стеку.

С ростом диверсификации доступных технологий, расширением функциональных возможностей, увеличением количества поставщиков таких инструментов, а также изменениями в законодательстве, например, по защите конфиденциальности [19], стек технологий стал крайне перспективным объектом анализа с точки зрения его оптимизации, использования в нем тех или иных технологий.

Включая большое количество технологических инструментов в собственный стек (увеличивая его широту), банки, с одной стороны, демонстрируют высокий уровень развития поглощающей способности, с другой стороны, повышают риски их совместной «неусвояемости», что может привести к техническим ошибкам и сбоям в работе цифрового продукта. Исследователи полагают, что аудит текущего технологического стека позволяет не только избавляться от ненужных технологий, но и способствует развитию более осознанного подхода к выбору технологий в будущем [20, 21].

Тем не менее, для изучения и аудита технологического стека исследователи и практики, в основном предлагают качественный подход, который связан с анализом каждой технологии по отдельности на предмет необходимости ее использования [20]. Несмотря на то, что такой подход обладает определенными преимуществами, тем не менее, он требует серьезных человеческих и временных ресурсов.

В соответствии с обозначенными пробелами, цель данного исследования заключается в определении влияния используемых технологий по характеристикам количества, уникальности и популярности в технологическом стеке продукта на результат; в разработке количественного подхода к оценке влияния используемых технологий на полученный результат цифрового продукта.

Были сформулированы следующие исследовательские вопросы:

1. Каким образом увеличение широты технологического стека (включение большого количества технологий) влияет на результат работы продуктов (количество ошибок)?
2. Как использование уникальных технологий влияет на результат работы продуктов (количество ошибок)?

3. Как использование популярных технологий влияет на результат работы продуктов (количество ошибок)?

В данном исследовании представлен и апробирован количественный подход к оценке результативности такого продукта, как сайт компании (основной домен и все субдомены) на основе анализа технологического стека. Была обнаружена положительная связь между долей уникальных технологий и количеством ошибок, а также отрицательная связь между долей популярных технологий и количеством ошибок.

Данное исследование вносит вклад в развитие теории поглощающей способности, в частности, в направление изучения результатов компании, полученных от развития поглощающей способности, выраженной в использовании широкого набора внешних продуктов, а также предлагает конкретный практический инструмент для оценки результативности от добавления к собственному технологическому стеку большого количества уникальных технологий и популярных технологий.

### 1. Поглощающая способность

В основополагающей работе Коэн и Левинталь (1990) поглощающая способность (*absorptive capacity*) рассматривается, как «способность распознавать ценность новой информации, усваивать ее и применять в коммерческих целях» [4]. Одним из важнейших предположений данной концепции является то, что способность находить и использовать внешние знания способствует развитию инновационного потенциала компаний, что особенно важно в условиях экономики, основанной на знаниях [3]. Генераторами поглощающей способности Коэн и Левинталь (1990) назвали инвестиции компании в НИОКР, производственную деятельность компании и инвестиции непосредственно в поглощающую способность (например, через обучение персонала) [4].

Дальнейшее развитие этой концепции было подхвачено многими исследователями, которые в том числе пытались переосмыслить ее и создать более точную концептуальную рамку. В частности, Захра и Джордж [5] выделили четыре способности, которые в совокупности представляют поглощающую способность компании: приобретение, ассимиляция, трансформация и эксплуатация. Более того, в ответ на вопрос о том, могут ли быть усвоены и использованы все приобретенные знания, исследователями было предложено разделение поглощающей



способности на две подкатегории: потенциальная поглощающая способность (potential absorptive capacity), которая включает в себя процессы приобретения и ассимиляции знаний; реализованная поглощающая способность (realized absorptive capacity), которая включает в себя процессы трансформации и эксплуатации знаний [5].

Разделение поглощающей способности на потенциальную и реализованную стало закономерным следствием проблемы приобретенных, но не использованных компаниями знаний по различным причинам [8]. Среди факторов, оказывающих непосредственное влияние на поглощающую способность компании выделяют внутренние: предшествующая база знаний [4, 6, 7, 9], способность к освоению, компетенции сотрудников, размер компании, инвестиции в НИОКР [4, 6], организационные структуры [6, 7] и др.; внешние: среда знаний, положение компании в сетях знаний [6].

Также одним из наиболее важных вопросов об использовании компаниями внешних знаний является вопрос о том, будет ли расти инновационный потенциал компаний бесконечно при постоянном приобретении новых знаний. В 2022 году Леманн, Менгер и Виршинг обнаружили, что взаимосвязь между производительностью фирмы и поглощающей способностью имеет перевернутую U-образную форму [9], указывая на то, что у компаний есть некая точка оптимума, после пересечения которой увеличение поглощения знаний, рост инвестиций в НИОКР нецелесообразны. Тем не менее методы оценки оптимума, а также причины снижения эффективности после его пересечения остаются недостаточно изученными.

Таким образом, предположение о том, что не все приобретенные знания могут быть усвоены и внедрены компаниями, а также предположение, что «больше не значит лучше» являются ключевыми предпосылками для проведения данного исследования и разработки количественного подхода к оценке работы продукта в зависимости от количества встроенных в него инноваций.

## 2. Технологический стек

Технологический стек представляет собой совокупность технологий, на базе которых разрабатываются цифровые приложения и сайты. В стек технологий могут интегрироваться различные цифровые

инструменты, базы данных, языки программирования и пр. [22]. С ростом диверсификации доступных технологий, расширением функциональных возможностей, увеличением количества поставщиков таких инструментов, а также изменениями в законодательстве, например, по защите конфиденциальности [19], стек технологий стал крайне перспективным объектом анализа с точки зрения его оптимизации, использования в нем тех или иных технологий.

Мотивацией для усложнения собственного технологического стека и интеграции в него большого количества цифровых решений, помимо функциональных преимуществ, является также и растущий запрос клиентов, которые ожидают видеть все более автоматизированные и высокотехнологичные решения своих проблем. При этом, хорошо продуманный стек технологий может быть источником конкурентного преимущества [21].

Все это побуждает компании постоянно изучать появление новых технологий и определять приоритеты инвестирования в технологический стек компании [23]. Кроме поиска новых технологий, современные исследователи акцентируют особое внимание на необходимости проведения регулярных аудитов своих технологических стеков на предмет избыточности. Более того исследователи также полагают, что аудит текущего технологического стека позволяет не только избавляться от ненужных технологий, но и способствует развитию более осознанного подхода к выбору технологий в будущем [20, 21], что также соответствует положениям развития поглощающей способности, о необходимости обладать предшествующими знаниями для корректного усвоения новых. Также возможности технологического стека значимо зависят и от команды, которая занимается его разработкой и оптимизацией [21].

Одной из важнейших проблем, которые могут возникнуть вследствие некорректного использования технологий или использования непроверенных технологий для цифровых продуктов, является появление «критических» ошибок, которые не позволяют достигать ключевых целей продукта.

Так, например, главным показателем эффективности посадочной страницы является конверсия из посетителя в число завершивших заполнение заявки [24], а взаимодействие потребителей с сайтом компании в целом является важной частью



взаимоотношений компании со своей аудиторией [25]. Посадочная страница – это комплексный продукт, который может иметь сколь угодно сложную структуру фронт-энда (все, что браузер может читать, выводить на экран и/или запускать) и серверной части, и по-разному вести себя в зависимости от среды в которой тестируется, например, различные модели операционных систем телефонов, различные бренды и различные версии браузеров. Все это с одной стороны актуализирует стремление компаний внедрять все новые и новые инновации в собственный технологический стек, с другой стороны это ведет к увеличению рисков возникновения «критических ошибок».

В данном исследовании результат работы технологического стека посадочных страниц оценивается именно через выявление наличия или отсутствия «критических» ошибок, то есть не позволяющих пользователям дойти до полного завершения заполнения анкеты (например, не приходит СМС для подтверждения данных, или не нажимается кнопка «далее» для заполнения анкеты, или после перехода в портал Госуслуг и получения согласий на использование данных эти данные не сохраняются и их надо вводить заново вручную, и т.д.). На основании вышеизложенного мы формулируем первый исследовательский вопрос:

– Каким образом увеличение количества технологий в технологическом стеке влияет на результат работы продуктов (количество ошибок)?

Использование вновь появившихся или просто редких для рынка технологий требует времени, человеческих ресурсов и специализации, и, в конечном счете затрат на R&D для их поглощения и усвоения. Соответственно данным исследованием мы стремимся определить, есть ли взаимосвязь между количеством уникальных технологий (которыми никто кроме этой компании или фирмы не пользуется) и количеством ошибок; есть ли отрицательная взаимосвязь между долей популярных технологий (которыми пользуется более половины исследуемых агентов) и количеством ошибок. Соответственно, два других исследовательских вопроса:

– Как использование уникальных технологий влияет на результат работы продуктов (количество ошибок)?

– Как использование популярных технологий влияет на результат работы продуктов (количество ошибок)?

Для изучения технологического стека исследователи и практики, в основном предлагают качественный подход, который связан с анализом каждой технологии по отдельности на предмет необходимости ее использования [20]. Несмотря на то, что такой подход обладает определенными преимуществами перед количественными исследованиями, тем не менее, он требует серьезных человеческих и временных ресурсов.

В данном исследовании предлагается оригинальный количественный подход к проведению аудита технологического стека сайтов, позволяющий оценить состояние собственного технологического стека в сравнении с аналогичными компаниями, а также выявить технологии, которые потенциально могут влиять на увеличение количества ошибок.

### 3. Количественный подход

Для того чтобы оценить количество используемых технологий в технологическом стеке сайтов банков мы выбрали широко известный сервис BuiltWith, который собирает и классифицирует большинство известных технологий на всех зарегистрированных доменах с 2002 года, на основании сигналов самих сайтов об использовании той или иной технологии.

Выбор отрасли для проведения исследования был основан на том, чтобы изучить наиболее развитые, с точки зрения внедрения технологий компании. Банки были выбраны в качестве объектов исследования, так как российский финансовый сектор является одним из лидеров цифровой трансформации. «Согласно расчетам ИСИЭЗ НИУ ВШЭ по данным Росстата, индекс цифровизации отечественного финансового сектора по итогам 2019 г. достиг значения 34 и уступил только промышленности (с показателем 36)» [26, с.159], при этом «внутренние затраты организаций финансового сектора на создание, распространение и использование цифровых технологий и связанных с ними продуктов и услуг составили 380,2 млрд. руб., что соответствует 8,9% валовой добавленной стоимости сектора, оставляя по этим важнейшим показателям далеко позади все другие отрасли экономики и социальной сферы» [26, с. 159–160]. По результатам исследования FINIX компании Яков и Партнеры (бывшее российское подразделение McKinsey) в марте 2023 года «крупные российские банки успешно пережили потрясения 2022 г. и удержали мировое лидерство с точки

зрения цифровизации» [27]. Таким образом, банки представляют из себя особо интересный сектор с точки зрения исследования технологического стека.

Для исследования были отобраны банки по показателю активов [28], после этого были направлены запросы на проверку используемых технологий с помощью вышеуказанного сервиса Built With. Некоторые банки не предоставляли разрешение роботам сервиса провести учет технологий, соответственно в итоговый список были включены только те банки, по которым были доступны данные.

Собранные списки технологий, обнаруженных на основных сайтах и субдоменах были перенесены в таблицы Excel и проанализированы. Было подсчитано количество технологий по каждому из стандартных рубрикаторов сервиса, подсчитано общее количество технологий используемых банком, количество неповторяющихся технологий в стеке каждого из банков, доли уникальных технологий в стеке (количество технологий, то есть используемых только одним банком из списка к количеству неповторяющихся технологий используемых этим банком), «редких» технологий в стеке (количество технологий, используемых только 1–2 банками из списка к количеству неповторяющихся технологий используемых этим банком), «популярных» технологий в стеке (количество технологий, используемых большинством, то есть более чем 6 банками из списка к количеству неповторяющихся технологий используемых этим банком) [29].

Для оценки работоспособности сайтов исследовался процесс заполнения онлайн-заявок на банковские продукты получения одобрения банка. Осуществлялась запись экрана мобильного телефона или компьютера. Далее для целей нашего исследования были подсчитаны случаи появления критических ошибок при заполнении анкеты (которых быть не должно). Критическими мы называли ошибки, когда пользователь не мог продолжить заполнение анкеты (например, не приходит СМС для подтверждения данных, или не нажимается кнопка «далее» для заполнения анкеты, или после перехода в портал Госуслуг и получения согласий на использование данных эти данные не сохраняются и их надо вводить заново вручную, и т.д.). В 2021–2022 годах были публично опубликованы материалы, на базе данного исследования, которые учитывали количество зафиксированных исследователями ошибок. С большинством исследованных банков были подписаны договоры, предусма-

тривающие детальный обзор процесса заполнения заявок и рассмотрение ошибок. Не было ни одного прецедента, когда банк бы оспаривал учтенную и записанную на экране смартфона или компьютера фактическую ошибку. Ссылки на публичные материалы приведены в Приложении.

Затем был применен непараметрический критерий Спирмена для поиска корреляции между вышеуказанными показателями технологического стека и долей встречающихся ошибок при заполнении онлайн-анкет.

#### 4. Результаты

На момент исследования 1 июня 2022 года было доступно для проверки 12 доменов и 595 субдоменов исследованных банков (таблица 1).

Таблица 1.

Исследованные банки, домены и субдомены

Название банка	Наименование домена	Количество исследованных субдоменов
Альфа-Банк	ALFABANK.RU	100
БСПБ	BSPB.RU	25
Газпромбанк	GAZPROMBANK.RU	25
МКБ	MKB.RU	64
МТС Банк	MTSBANK.RU	102
Банк «Открытие»	OPEN.RU	52
Райффайзен Банк	RAIFFEISEN.RU	57
Росбанк	ROSBANK.RU	36
Россельхозбанк	RSHB.RU	38
СМП Банк	SMPBANK.RU	29
Совкомбанк	SOVCOMBANK.RU	30
Тинькофф Банк	TINKOFF.RU	37
<b>Общее количество</b>	<b>12</b>	<b>595</b>

После группировки по типам технологий в соответствии с классификатором предложенным сервисом BuiltWith, было обнаружено 529 неповторяющихся технологий, собранных в 25 групп, которые использовались банками 2189 раз (таблица 2). Клидерам по количеству использований банками можно

Таблица 2.

## Выявленные технологии, разбитые по группам в рамках рубрикатора builtwith

Технологии \ Банки и их основные веб-домены	ALFABANK.RU (Альфа-Банк)	BSPB.RU (Банк Санкт-Петербург)	GAZPROMBANK.RU (Газпромбанк)	МКВ.RU (Московский кредитный банк)	MTSBANK.RU (МТС банк)	OPEN.RU (банк Открытие)	RAIFFEISEN.RU (Райффайзен Банк)	ROSBANK.RU (Росбанк)	RSHB.RU (Россельхозбанк)	SMPBANK.RU (СМП банк)	SOVCOMBANK.RU (Совкомбанк)	TINKOFF.RU (банк Тинькофф)	Для всех банков
Advertising	23	6	5	6	7	8	3	5	3	4	6	9	<b>85</b>
Analytics and Tracking	28	15	10	10	18	27	16	17	11	7	17	33	<b>209</b>
Audio / Video Media	2		1	1	2	5	4	1			4		<b>20</b>
Content Delivery Network	14	6	1	4	5	10	8	2	8		3	3	<b>64</b>
Content Management System	10	2	2		9	3	2		2	3		4	<b>37</b>
Copyright	2	3	1	3	1	3	3	1		1			<b>18</b>
e-Commerce	1			1					1			1	<b>4</b>
Email Hosting Providers	6	2	4	2	5	4	4	2	2	2	4	9	<b>46</b>
Frameworks	36	10	3	45	18	14	6	6	6	5	18	23	<b>190</b>
JavaScript Libraries and Functions	81	49	37	81	48	66	55	22	39	37	45	62	<b>622</b>
Language	1	1	1	1	1	4	1	1	1	1	3	1	<b>17</b>
Mapping	1	1	2	1	1		2		1			1	<b>10</b>
Mobile	30	9	8	14	11	13	27	6	8	10	7	9	<b>152</b>
Name Server			2			1				1		4	<b>8</b>
Operating Systems and Servers	6	4	2		2	2	2	1	1	1	3	2	<b>26</b>
Payment	7	4	4	8	6	7	3	6	4	2	6	13	<b>70</b>
Robots.txt	8	4	1	1	2	7	1	3	2	2	6	14	<b>51</b>
SSL Certificates	25	8	8	18	18	30	20	4	6	3	6	32	<b>178</b>
Syndication Techniques	3					1						2	<b>6</b>
Verified CDN	1					1							<b>2</b>
Verified Link									3		1	1	<b>5</b>
Web Hosting Providers	9	4	3	1	6	4	4				1	50	<b>82</b>
Web Master Registration	1	2		3	1	2	4	1	2		2	2	<b>20</b>
Web Servers	13	16	8	1	15	19	9	1	4	8	6	18	<b>118</b>
Widgets	20	21	5	14	11	17	8	10	6	3	14	20	<b>149</b>
Количество использованных технологий	328	167	108	215	187	248	182	89	110	90	152	313	<b>2189</b>
Количество неповторяющихся технологий	239	134	96	123	140	172	126	85	107	73	136	168	<b>529</b>

отнести следующие технологии: JavaScript Libraries anFunctions (622 раза); Analytics and Tracking (209 раза); Frameworks (190 раз). Наибольшее количество раз технологии используются в Тинькофф, в Альфа-Банке, в банке «Открытие», наименьшее в Росбанке, СМП банке и Газпромбанке.

В таблице 3 для каждого из банков рассчитано общее количество уникальных (используется только в одном банке), редких (используется в двух банках и менее) и популярных (использует более шести банков) технологий.

Наибольшее количество уникальных технологий было обнаружено в Альфа-Банке (54 технологии), что составляет 22,6% и Тинькофф, что составляет 30,4%.

Количество обнаруженных и зафиксированных ошибок при заполнении онлайн заявок на банковские продукты составило 25 на 216 исследованных анкет (12%). Частота ошибок на анкету для каждого из банков приведена в таблице 4.

Для обнаружения взаимосвязи между показателем технологического стека и ошибками были подсчитаны следующие показатели в разрезе банков:

- а) общее количество используемых технологий;
- б) количество неповторяющихся технологий;
- в) доля уникальных технологий в стеке банка (уникальные – то есть используемые только данным банком из списка исследованных банков);
- г) доля «редких» технологий (то есть используемых в 1–2 из исследованных банков);
- д) доля «популярных» технологий (то есть используемых в более чем половине исследованных банков).

Графически полученные результаты отражены на рисунке 1.

На основании данных, представленных на рисунке 1, можно сделать вывод, что популяция банков неоднородна по показателю редких или уникальных технологий, существенно выделяются два банка у которых число уникальных технологий выше (табл. 4): это Альфа-Банк (54 уникальная технология) и банк Тинькофф (51). Они также выделяются и по показателю «редких технологий» – таких насчитывается 96 у Альфа-Банка и 76 у банка Тинькофф. Доли «редких» (40% и 45%, соответственно) и уникальных технологий (23% и 30%)

Таблица 3.

#### Анализ технологий в технологических стеках сайтов банков

Банки и их основные веб-домены	Количество уникальных технологий	Количество редких технологий	Количество популярных технологий	Доля уникальных технологий	Доля редких технологий	Доля популярных технологий
ALFABANK.RU (Альфа-Банк)	54	96	71	22,6%	40,2%	29,7%
BSPB.RU (Банк Санкт-Петербург)	22	33	68	16,4%	24,6%	50,7%
GAZPROMBANK.RU (Газпромбанк)	7	18	49	7,3%	18,8%	51,0%
MKB.RU (Московский кредитный банк)	20	30	55	16,3%	24,4%	44,7%
MTSBANK.RU (МТС банк)	15	32	67	10,7%	22,9%	47,9%
OPEN.RU (банк Открытие)	25	44	68	14,5%	25,6%	39,5%
RAIFFEISEN.RU (Райффайзен Банк)	12	25	57	9,5%	19,8%	45,2%
ROSBANK.RU (Росбанк)	4	8	58	4,7%	9,4%	68,2%
RSHB.RU (Россельхозбанк)	19	25	54	17,8%	23,4%	50,5%
SMPBANK.RU (СМП банк)	6	12	43	8,2%	16,4%	58,9%
SOVCOMBANK.RU (Совкомбанк)	22	34	71	16,2%	25,0%	52,2%
TINKOFF.RU (банк Тинькофф)	51	76	61	30,4%	45,2%	36,3%

**Таблица 4.**  
**Частота обнаруженных ошибок при исследовании онлайн анкет банков**

Наименование домена	Количество анкет	Обнаружено ошибок	Ошибок на анкету
ALFABANK.RU	21	1	0,05
BSPB.RU	8	2	0,25
GAZPROMBANK.RU	21	1	0,05
MKB.RU	15	5	0,33
MTSBANK.RU	17	1	0,06
OPEN.RU	21	4	0,19
RAIFFEISEN.RU	21	4	0,19
ROSBANK.RU	21	0	0,00
RSHB.RU	21	5	0,24
SMPBANK.RU	8	1	0,13
SOVCOMBANK.RU	21	0	0,00
TINKOFF.RU	21	1	0,05
<b>Всего</b>	<b>216</b>	<b>25</b>	<b>12%</b>

максимальны для стеков каждого из этих банков в сравнении с остальными исследованными. При этом доля технологий, которыми пользуются большинство банков в стеке этих банков минимальна для выборки (30% и 36%). То есть оба банка заметно выделяются по показателям стека из общей совокупности.

На следующем этапе анализа для выявления взаимосвязи был рассчитан непараметрический критерий ранговой корреляции Спирмена, который оказался незначим для всех выбранных групп в рамках всей совокупности банков ( $n = 12$ ). Однако после выделения двух указанных банков – Тинькофф и Альфа-Банк – из совокупности (по показателю количества или доли уникальных технологий в стеке), для остальной совокупности банков ( $n = 10$ ) была обнаружена значимая обратная корреляция ( $p$  менее 0,05) между долей ошибок в анкетах и долей популярных технологий в стеке банка, и такая же значимая корреляция между долей ошибок и долей уникальных технологий в стеке банка (табл. 5).

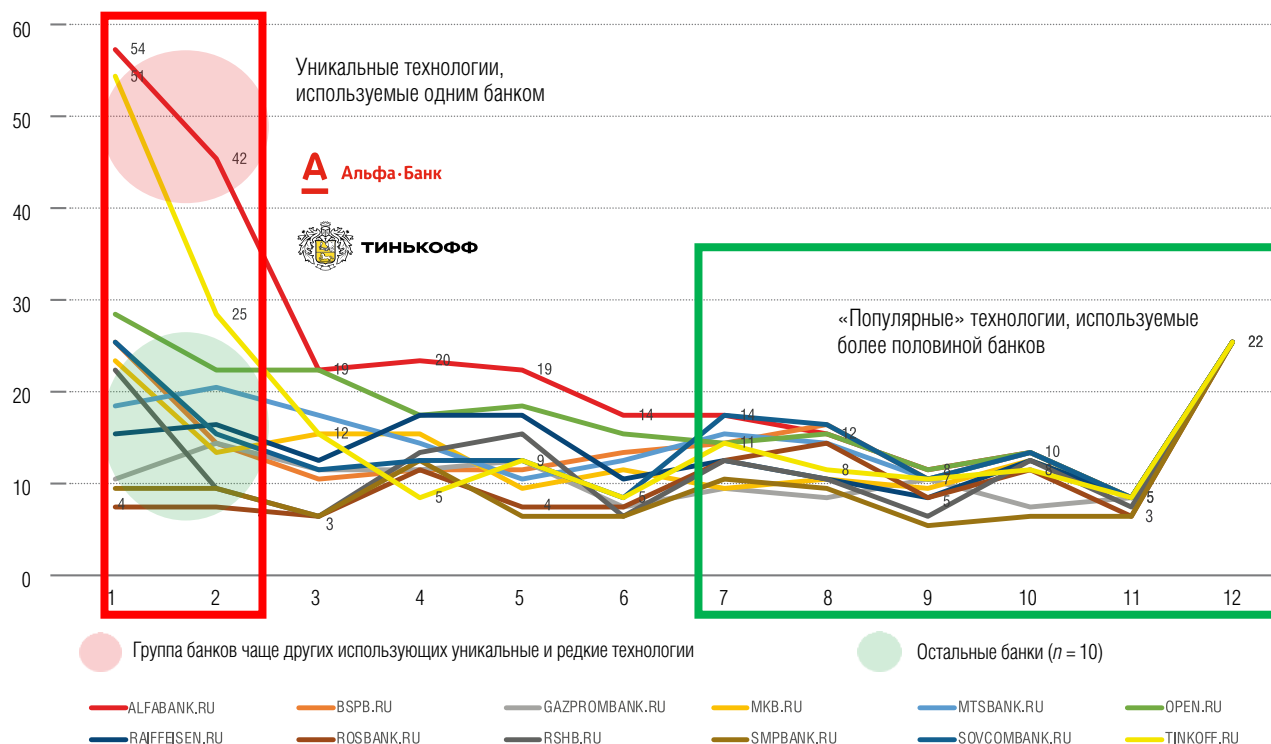


Рис. 1. Распределение уникальных технологий по частоте встречаемости в исследованных банках ( $n = 12$ ): ось X – в каком количестве банков используется такая же технология, ось Y – количество таких технологий у банка.

Таблица 5.

**Показатели распределения технологий по исследованным доменам и субдоменам банков, исследованные анкеты, обнаруженные ошибки и корреляции по группам**

Веб-домен банка	Всего технологий	Количество уникальных технологий	Доля редких технологий в стеке (2-)	Доля уникальных технологий в стеке (<2)	Доля популярных технологий в стеке (7+)	Количество исследованных анкет	Выявлено ошибок	Количество ошибок как доля от анкет
ALFABANK.RU	328	239	40%	23%	30%	21	<b>1</b>	0,05
BSPB.RU	167	134	25%	16%	51%	8	<b>2</b>	0,25
GAZPROMBANK.RU	108	96	19%	7%	51%	21	<b>1</b>	0,05
MKB.RU	215	123	24%	16%	45%	15	<b>5</b>	0,33
MTSBANK.RU	187	140	23%	11%	48%	17	<b>1</b>	0,06
OPEN.RU	248	172	26%	15%	40%	21	<b>4</b>	0,19
RAIFFEISEN.RU	182	126	20%	10%	45%	21	<b>4</b>	0,19
ROSBANK.RU	89	85	9%	5%	68%	21	<b>0</b>	0,00
RSHB.RU	110	107	23%	18%	50%	21	<b>5</b>	0,24
SMPBANK.RU	90	73	16%	8%	59%	8	<b>1</b>	0,13
SOVCOMBANK.RU	152	136	25%	16%	52%	21	<b>0</b>	0,00
TINKOFF.RU	313	168	45%	30%	36%	21	<b>1</b>	0,05
Корреляция Спирмена (n = 12)	0,14	-0,10	0,01	0,23	-0,22	216	25	12%
Корреляция Спирмена, без Альфа-Банка и банка Тинькофф (n = 10)	0,51	0,11	0,37	0,69	-0,63			
Значимость (n = 10)				$p < 0,05$	$p < 0,05$			

В соответствии с полученными результатами, статистически значимой корреляции между увеличением количества технологий в технологическом стеке и результатом работы продукта (количество ошибок) не было обнаружено. Аналогичный результат был получен и после удаления двух выделяющихся банков ( $n = 10$ ), и, хотя показатель Спирмена увеличился, корреляция не достигла уровня значимости равного 0,05.

Показатель доли уникальных технологий в технологическом стеке также не показал значимой корреляции с результатом работы продуктов (количество ошибок) для всех банков ( $n = 12$ ), однако показал значимую корреляцию ( $p < 0,05$ ) после удаления из выборки двух выделяющихся бан-

ков ( $n = 10$ ). То есть чем больше доля уникальных технологий в стеке, тем вероятнее появление ошибок на посадочной странице.

Доля популярных технологий в стеке имеет обратную корреляцию с количеством ошибок ( $p < 0,05$ ) для выборки после исключения Альфа-Банка и банка Тинькофф ( $n = 10$ ), и может являться хорошим показателем. В противоположность уникальности стека, мы видим что для большинства исследованных банков использование популярных технологий обратно взаимосвязано с показателем качества работы сайта (количеством ошибок), и одновременно может нести очевидные выгоды для разработки и поддержки сложных цифровых продуктов без использования редких технологий и ред-



ких специалистов, получая возможную экономию в фонде оплаты труда и сокращая разнообразие поддерживаемых компетенций в разработке продуктов и их тестировании.

## 5. Обсуждение

В данном исследовании предпринята попытка оценить влияние технологий, включенных в технологический стек сайтов банков, на результативность данного цифрового продукта, как пример влияния поглощающей способности.

Изучив технологический стек сайтов на предмет количества используемых технологий в технологическом стеке и на предмет количества ошибок связь между ними не была обнаружена, что скорей всего связано со сложной природой технологического развития и уникальностью подходов каждого отдельного банка к отбору и встраиванию технологий, что соответствует предшествующим исследованиям, указывающим на то, что успех поглощения инноваций зависит от таких факторов, как предшествующая база знаний [4, 6, 7, 9], способность к освоению, компетенции сотрудников, размер компании, инвестиции в НИОКР [7, 14], организационные структуры [4, 6] и др.

Тем не менее была обнаружена умеренная положительная связь между долей уникальных технологий и количеством ошибок для десяти банков, после исключения из анализа двух выделяющихся. То есть чем больше доля уникальных технологий в стеке, тем вероятнее появление ошибок на посадочной странице. Интерпретируя полученный результат, мы обращаем внимание на тот факт, что «выделяющиеся банки» являются примером банков, сделавших ставку на уникальность используемого стека (судя по показателям высокой доли уникальных и редких технологий и низкой доли «популярных» технологий). Также эти банки являются лидерами в основных технологических рейтингах на российском рынке, таких как MarksWebb [30], «Банковское обозрение» [31], FrankRG [32], эти банки хорошо рекомендовали себя в работе со своим уникальным стеком и демонстрируют хорошие деловые результаты. Для банков, которые еще не определили свой уникальный стек, вероятно стоит обращать внимание на использование количественного подхода к оценке технологического стека, как прогностического показателя, позволяющего оперативно оценить степень уникальности используемых техно-

логий и возможно принять меры по качественному сокращению неоправданного разнообразия технологий с целью сокращения числа ошибок. Дополнительными выгодами от сокращения числа уникальных технологий могут являться преимущество в подборе и наборе персонала (нет необходимости в поиске и тестировании редких специалистов), скорости запуска (сокращение этапов знакомства с технологией и поддержка компетенций по использованию уникальных для рынка технологий), отсутствие «переплаты за уникальность» специалиста, сокращение риска поиска замены уникального специалиста, непредсказуемости поведения новых экзотических технологий и т.д.

Также была обнаружена умеренная отрицательная связь между долей популярных технологий и количеством ошибок для десяти банков, после исключения из анализа двух выделяющихся. В дополнение к тому результату, что количество уникальных технологий ведет к увеличению количества ошибок, было обнаружено что для большинства исследованных банков использование популярных технологий обратно взаимосвязано с показателем качества работы сайта (количество ошибок), и одновременно может нести очевидные выгоды в части разработки и поддержки сложных программных продуктов без использования редких технологий и редких специалистов, получая возможную экономию в фонде оплаты труда и сокращая разнообразие поддерживаемых компетенций в разработке продуктов и их тестировании.

Результаты, полученные в ходе исследования, подтверждают текущую дискуссию, о необходимости проведения аудита технологических стеков компаний [20, 21]. Использование предложенного количественного подхода позволит компаниям определить степень уникальности и популярности технологического стека в своем конкурентном окружении и предположить сравнительные показатели риска ошибок, и сформировать качественный план по дальнейшей оптимизации технологического стека с тем чтобы сохранить в нем только эффективные технологии, соответствующие уровню компетенций специалистов компании.

## Заключение

Таким образом, данное исследование продолжит и расширяет дискуссию о развитии поглощающей способности, вносит вклад в понимание огра-

ничений поглощающей способности компаний и предлагает количественный подход, позволяющий производить аудит технологического стека сайтов компаний.

Исходя из полученных результатов, можно предположить, что предложенный количественный подход, в первую очередь будет применим для тех компаний, которые еще не определили свой уникальный технологический стек. Использование уникальных технологий может способствовать большему количеству ошибок в том числе у тех компаний, которые не обладают достаточными ресурсами, такими как компетенции команды, предшествующие знания. В свою очередь, использование популярных технологий, наоборот будет способствовать меньшему количеству ошибок.

В качестве значимых направлений для будущих исследований можно выделить повторную апробацию разработанного количественного подхода на большой выборке, а также качественное изучение уникальных и популярных технологий. Более того, исходя из полученных неоднозначных результатов в отношении двух выделяющихся банков, цифровых лидеров, перспективным направлением является разработка факторной модели, характеризующей

ключевые факторы, оказывающие влияние на усвояемость и корректность использования различных технологий в собственных цифровых продуктах. Перспективным направлением для дальнейших исследований также является разработка комбинированных подходов к аудиту технологического стека, включающих, как количественные, так и качественные исследования. Разработка такого подхода должна быть сосредоточена на максимизации сильных сторон каждого из сочетаемых подходов и на минимизации слабых.

Безусловно, данное исследование имеет ряд ограничений. Так, была рассмотрена только банковская отрасль, в дальнейшем предложенный количественный подход может быть апробирован во многих отраслях и может быть произведена сравнительная оценка. Еще одним ограничением является небольшая выборка, связанная, в первую очередь, с ограничением доступа к анализу технологического стека со стороны многих банков. В качестве еще одного ограничения может быть выделен использованный подход разделения технологий только по индикаторам уникальности, редкости и популярности, тем не менее в дальнейшем для оценки могут быть использованы иные классификаторы. ■

*Приложение.*

#### **Опубликованные материалы, в которых учитывалось количество ошибок, зафиксированных исследователями**

<https://bosfera.ru/bo/dorobotat-mir-2>  
<https://bosfera.ru/bo/na-potreby-publike-god-spustya>  
<https://bosfera.ru/bo/rabota-nad-kreditkami>  
<https://bosfera.ru/bo/vklad-v-druzhelyubie>  
<https://bosfera.ru/bo/dorobotat-mir>  
<https://bosfera.ru/bo/vybiraem-mir>  
<https://bosfera.ru/bo/na-potreby-publike>  
<https://bosfera.ru/bo/kreditnaya-karta-onlayn-trudnosti-i-luchshie-praktiki-bankov>

#### **Литература**

1. Schumpeter J.A. The theory of economic development. London: Oxford University Press. 1934.
2. Möller K. Sense-making and agenda construction in emerging business networks – How to direct radical innovation // Industrial Marketing Management. 2010. Vol. 39. No. 3. P. 361–371. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2009.03.014>
3. Dell'Anno D., del Giudice M. Absorptive and desorptive capacity of actors within university-industry relations: does technology transfer matter? // Journal of Innovation and Entrepreneurship. 2015. Vol. 4. No. 1. Corpus ID: 256236239. <https://doi.org/10.1186/s13731-015-0028-2>
4. Cohen W.M., Levinthal D.A. Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation // Administrative Science Quarterly. 1990. Vol. 35. No. 1. P. 128–152. <https://doi.org/10.2307/2393553>
5. Zahra S.A., George G. Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension // The Academy of Management Review. 2002. Vol. 27. No. 2. P. 185–203. <https://doi.org/10.5465/amr.2002.6587995>
6. Noblet J.-P., Simon E., Parent R. Absorptive capacity: a proposed operationalization // Knowledge Management Research & Practice. 2011. Vol. 9. No. 4. P. 367–377. <https://doi.org/10.1057/kmrp.2011.26>

7. Caiazza R., Phan P., Lehmann E., Etkowitz H. An absorptive capacity-based systems view of Covid-19 in the small business economy // *International Entrepreneurship and Management Journal*. 2021. Vol. 17. No. 3. P. 1419–1439. <https://doi.org/10.1007/s11365-021-00753-7>
8. Grandinetti R. Absorptive capacity and knowledge management in small and medium enterprises // *Knowledge Management Research & Practice*. 2016. Vol. 14. No. 2. P. 159–168. <https://doi.org/10.1057/kmrp.2016.2>
9. Lehmann E.E., Menter M., Wirsching K. University spillovers, absorptive capacities, and firm performance // *Eurasian Business Review*. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 125–150. <https://doi.org/10.1007/s40821-021-00199-5>
10. Arrighetti A., Vivarelli M. The role of innovation in the postentry performance of new small firms: Evidence from Italy // *Southern Economic Journal*. 1999. Vol. 65. No. 4. P. 927–939. <https://doi.org/10.2307/1061285>
11. Audretsch D.B. Firm profitability, growth, and innovation // *Review of Industrial Organization*. 1995. Vol. 10. No. 5. P. 579–588. <https://doi.org/10.1007/bf01026883>
12. Calvo J.L. Testing Gibrat's law for small, young and innovating firms // *Small Business Economics*. 2006. Vol. 26. No. 2. P. 117–123. <https://doi.org/10.1007/s11187-004-2135-5>
13. Colombelli A., Krafft J., Quatraro F. Properties of knowledge base and firm survival: Evidence from a sample of French manufacturing firms // *Technological Forecasting and Social Change*. 2013. Vol. 80. No. 8. P. 1469–1483. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.03.003>
14. Wagner S., Cockburn I. Patents and the survival of internet-related IPOs // *Research Policy*. 2010. Vol. 39. No. 2. P. 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.12.003>
15. Samuelsson M., Davidsson P. Does venture opportunity variation matter? Investigating systematic process differences between innovative and imitative new ventures // *Small Business Economics*. 2009. Vol. 33. No. 2. P. 229–255. <https://doi.org/10.1007/s11187-007-9093-7>
16. Scherer F.M., Harhoff D. Technology policy for a world of skew-distributed outcomes // *Research Policy*. 2000. Vol. 29. No. 4–5. P. 559–566. [https://doi.org/10.1016/s0048-7333\(99\)00089-x](https://doi.org/10.1016/s0048-7333(99)00089-x)
17. Brown J.R., Martinsson G., Petersen B.C. Do financing constraints matter for R&D? // *European Economic Review*. 2012. Vol. 56. No. 8. P. 1512–1529. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2012.07.007>
18. Minetti R. Informed finance and technological conservatism // *Review of Finance*. 2010. Vol. 15. No. 3. P. 633–692. <https://doi.org/10.1093/rof/rfq024>
19. Burford N., Shipilov A., Furr N. How GDPR changed European companies' tech stacks // *Harvard Business Review Digital Articles*. 2023. [Электронный ресурс]: <https://hbr.org/2023/02/how-gdpr-changed-european-companies-tech-stacks> (дата обращения 10.12.2023).
20. Spiller C. Why and how planners need to audit their tech stack: Practice leaders need a clear view of their firm's tech capabilities and costs // *Journal of Financial Planning*. 2022. Vol. 35. No. 12. P. 60–63.
21. Weekes S. In focus: Creating a great recruitment tech stack // *Recruiter*. 2023. P. 16–17.
22. What is a Tech Stack: Examples, Components, and Diagrams // *Heap*. 2023. [Электронный ресурс]: <https://www.heap.io/topics/what-is-a-tech-stack> (дата обращения 10.12.2023).
23. Tax W.K. Accounting techniques to keep your tech stack on the leading edge // *Accountingtoday.Com*. N.PAG. 2021.
24. Гвоздецкая С. Эффективность лендинга: как провести ревизию одностраничника. 2021. [Электронный ресурс]: <https://vc.ru/services/264089-effektivnost-lendinga-kak-provesti-reviziyu-odnostranichnika> (дата обращения 10.12.2023).
25. Park H., Reber B.H. Relationship building and the use of Web sites: How Fortune 500 corporations use their Web sites to build relationships // *Public Relations Review*. 2008. Vol. 34. No. 4. P. 409–411. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2008.06.006>
26. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты // Докл. к XXII Апр. междунар. науч. конф. по проблемам развития экономики и общества, Москва, 13–30 апр. 2021 г. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021.
27. Как отразились санкции на цифровизации банков // *Plusworld.ru*. 2023. [Электронный ресурс]: <https://plusworld.ru/articles/51319/> (дата обращения 10.12.2023).
28. Онлайн-заявки на банковские продукты: ошибки и возможности // *Банковское обозрение*. 2022. [Электронный ресурс]: <https://bosfera.ru/bo/onlayn-zayavki-na-bankovskie-produkty-oshibki-i-i-vozmozhnosti> (дата обращения 10.12.2023).
29. Семенихин В.А., Микаелян А.М., Серова И.В., Цилюков А.Р. Технологий много не бывает? // *Банковское обозрение*. 2022. № 7. С. 68–71.
30. Лааксо П. «Альфа-Банк» возглавил рейтинг лучших мобильных банков для ежедневных задач на Android по версии Marksw Webb. 2022. [Электронный ресурс]: <https://vc.ru/finance/568392-alfa-bank-vozglavil-reyting-luchshih-mobilnyh-bankov-dlya-ezhednevnyh-zadach-na-android-po-versii-markswwebb> (дата обращения 10.12.2023).
31. Семенихин В.А., Гладько А.М., Микаелян А.М. Скорость и дружелюбие глазами нового клиента // *Банковское обозрение*. 2021. № 9. С. 64–69.
32. Тинькофф Премиум признан лучшим цифровым банком для премиальных клиентов по версии Frank RG // *Тинькофф*. 2022. [Электронный ресурс]: <https://www.tinkoff.ru/about/news/02-11-2022-tinkoff-premium-best-digital-bank-for-preium-clients-according-to-frg/> (дата обращения 10.12.2023).

## Об авторах

### Соловьев Иван Владимирович

аспирант, преподаватель, Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 119049, Москва, ул. Шаболовка, д. 26–28;

E-mail: Solovjev.iw@yandex.ru, isolovev@hse.ru

ORCID: 0000-0002-3120-9726

### Семенихин Вячеслав Алексеевич

аспирант, Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 119049, Москва, ул. Шаболовка, д. 26–28;

E-mail: vsemenikhin@planear.ru, vasemenikhin@hse.ru

ORCID: 0000-0001-6923-0363

### Куш Сергей Павлович

доктор экономических наук, профессор;

руководитель департамента операционного менеджмента и логистики, академический руководитель магистерской программы «Стратегическое управление логистикой и цепями поставок в цифровой экономике», Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Россия, 119049, Москва, ул. Шаболовка, д. 26–28;

E-mail: skushch@hse.ru

ORCID: 0000-0002-6749-184X

# The influence of the breadth of the tech stack on the result of the digital product: A view through the theory of absorbtion capacity

## Ivan V. Solovyov

E-mail: solovjev.iw@yandex.ru, isolovev@hse.ru

## Viatcheslav A. Semenikhin

E-mail: vsemenikhin@planear.ru, vasemenikhin@hse.ru

## Sergey P. Kushch

E-mail: skushch@hse.ru

Graduate School of Business, HSE University

Address: 26–28, Shabolovka Str., Moscow 119049, Russia

## Abstract

In today's economy based on knowledge and innovation, the development of absorptive capacity by companies is a critical aspect of business competitiveness. In this study, the tech stack of sites is considered as a specific, measurable part of the digital and innovative development of a company. In literature to date,

there is no clear answer to which technologies and in what quantity should be included in the tech stack. From the point of view of assessing the tech stack, mainly qualitative methods are proposed that are quite resource intensive. Accordingly, the purpose of this study is to determine the impact of the technologies used by the characteristics of quantity, uniqueness and popularity in the tech stack of the product on the result (the absence of critical errors); as well as in developing a quantitative approach for assessing the impact of the technologies used on the result of a digital product. The quantitative approach was developed and conceptualized based on previous literature, tested on 12 sites of large Russian banks, including 12 main domains and 595 subdomains. An analysis of a study of 216 online applications for banking products showed a positive relationship between the share of unique technologies in the bank's visible tech stack and the number of errors, as well as a negative relationship between the share of popular technologies in the stack and errors. This study expands the discussion on the development of absorptive capacity, contributes to the understanding of the limitations of absorptive capacity of companies and proposes a quantitative approach for auditing the operational tech stack of companies' websites.

**Keywords:** tech stack, innovation, absorption capacity, digital marketing, website

**Citation:** Solovyov I.V., Semenikhin V.A., Kushch S.P. (2023) The influence of the breadth of the tech stack on the result of the digital product: A view through the theory of absorption capacity. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 57–72. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.57.72

## References

1. Schumpeter J.A. (1934) *The theory of economic development*. London: Oxford University Press.
2. Möller K. (2010) Sense-making and agenda construction in emerging business networks – How to direct radical innovation. *Industrial Marketing Management*, vol. 39, no. 3, pp. 361–371. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2009.03.014>
3. Dell'Anno D., del Giudice M. (2015) Absorptive and desorptive capacity of actors within university–industry relations: does technology transfer matter? *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, vol. 4, no. 1, corpus ID: 256236239. <https://doi.org/10.1186/s13731-015-0028-2>
4. Cohen W.M., Levinthal D.A. (1990) Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, vol. 35, no. 1, p. 128–152. <https://doi.org/10.2307/2393553>
5. Zahra S.A., George G. (2002) Absorptive capacity: A review, reconceptualization, and extension. *The Academy of Management Review*, vol. 27, no. 2, pp. 185–203. <https://doi.org/10.5465/amr.2002.6587995>
6. Noblet J.-P., Simon E., Parent R. (2011) Absorptive capacity: a proposed operationalization. *Knowledge Management Research & Practice*, vol. 9, no. 4, pp. 367–377. <https://doi.org/10.1057/kmrp.2011.26>
7. Caiazza R., Phan P., Lehmann E., Etkowitz H. (2021) An absorptive capacity-based systems view of Covid-19 in the small business economy. *International Entrepreneurship and Management Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 1419–1439. <https://doi.org/10.1007/s11365-021-00753-7>
8. Grandinetti R. (2016) Absorptive capacity and knowledge management in small and medium enterprises. *Knowledge Management Research & Practice*, vol. 14, no. 2, pp. 159–168. <https://doi.org/10.1057/kmrp.2016.2>
9. Lehmann E.E., Menter M., Wirsching K. (2022) University spillovers, absorptive capacities, and firm performance. *Eurasian Business Review*, vol. 12, no. 1, pp. 125–150. <https://doi.org/10.1007/s40821-021-00199-5>
10. Arrighetti A., Vivarelli M. (1999) The role of innovation in the postentry performance of new small firms: Evidence from Italy. *Southern Economic Journal*, vol. 65, no. 4, pp. 927–939. <https://doi.org/10.2307/1061285>
11. Audretsch D.B. (1995) Firm profitability, growth, and innovation. *Review of Industrial Organization*, vol. 10, no. 5, pp. 579–588. <https://doi.org/10.1007/bf01026883>
12. Calvo J.L. (2006) Testing Gibrat's law for small, young and innovating firms. *Small Business Economics*, vol. 26, no. 2, pp. 117–123. <https://doi.org/10.1007/s11187-004-2135-5>
13. Colombelli A., Krafft J., Quatraro F. (2013) Properties of knowledge base and firm survival: Evidence from a sample of French manufacturing firms. *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 80, no. 8, pp. 1469–1483. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.03.003>
14. Wagner S., Cockburn I. (2010) Patents and the survival of Internet-related IPOs. *Research Policy*, vol. 39, no. 2, pp. 214–228. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2009.12.003>
15. Samuelsson M., Davidsson P. (2009) Does venture opportunity variation matter? Investigating systematic process differences between innovative and imitative new ventures. *Small Business Economics*, vol. 33, no. 2, pp. 229–255. <https://doi.org/10.1007/s11187-007-9093-7>
16. Scherer F.M., Harhoff D. (2000) Technology policy for a world of skew-distributed outcomes. *Research Policy*, vol. 29, nos. 4–5, pp. 559–566. [https://doi.org/10.1016/s0048-7333\(99\)00089-x](https://doi.org/10.1016/s0048-7333(99)00089-x)



17. Brown J.R., Martinsson G., Petersen B.C. (2012) Do financing constraints matter for R&D? *European Economic Review*, vol. 56, no. 8, pp. 1512–1529. <https://doi.org/10.1016/j.euroecorev.2012.07.007>
18. Minetti R. (2010) Informed finance and technological conservatism. *Review of Finance*, vol. 15, no. 3, pp. 633–692. <https://doi.org/10.1093/rof/rfq024>
19. Burford N., Shipilov A., Furr N. (2023) How GDPR changed European companies' tech stacks. *Harvard Business Review Digital Articles*. Available at: <https://hbr.org/2023/02/how-gdpr-changed-european-companies-tech-stacks> (accessed 10 December 2023).
20. Spiller C. (2022) Why and how planners need to audit their tech stack: Practice leaders need a clear view of their firm's tech capabilities and costs. *Journal of Financial Planning*, vol. 35, no. 12, pp. 60–63.
21. Weekes S. In focus: Creating a great recruitment tech stack. *Recruiter*, pp. 16–17.
22. Heap (2023) *What is a Tech Stack: Examples, components, and diagrams*. Available at: <https://www.heap.io/topics/what-is-a-tech-stack> (accessed 10 December 2023).
23. Tax W.K. (2021) Accounting techniques to keep your tech stack on the leading edge. *Accountingtoday.Com*, N.PAG.
24. Gvozdetskaya S. (2021) *Landing efficiency: How to audit a one-pager*. Available at: <https://vc.ru/services/264089-effektivnost-lendinga-kak-provesti-reviziyu-odnostranichnika> (accessed 10 December 2023) (in Russian).
25. Park H., Reber B.H. (2008) Relationship building and the use of Web sites: How Fortune 500 corporations use their Web sites to build relationships. *Public Relations Review*, vol. 34, no. 4, pp. 409–411. <https://doi.org/10.1016/j.pubrev.2008.06.006>
26. Digital transformation sets: starting conditions and priorities (2021) *April 22 intl. scientific conf. on Problems of Development of the Economy and Society, Moscow, 13–30 April 2021*. Moscow: HSE University, 2021 (in Russian).
27. Plusworld.ru (2023) *How sanctions affected the digitalization of banks*. Available at: <https://plusworld.ru/articles/51319/> (accessed 10 December 2023) (in Russian).
28. Banking Review (2022) *Online applications for banking products: errors and opportunities*. Available at: <https://bosfera.ru/bo/onlayn-zayavki-na-bankovskie-produkty-oshibki-i-i-vozmozhnosti> (accessed 10 December 2023) (in Russian).
29. Semenikhin V.A., Mikaelyan A.M., Serova I.V., Tsilikov A.R. (2022) Isn't there too much technology? *Banking Review*, no. 7, pp. 68–71 (in Russian).
30. Laakso P. (2022) *Alfa-Bank topped the ranking of the best mobile banks for daily tasks on Android according to Markswebb*. Available at: <https://vc.ru/finance/568392-alfa-bank-vozglavil-reyting-luchshih-mobilnyh-bankov-dlya-ezhednevnyh-zadach-na-android-po-versii-markswebb> (accessed 10 December 2023) (in Russian).
31. Semenikhin V.A., Gladko A.M., Mikaelyan A.M. (2021) Speed and friendliness through the eyes of a new client. *Banking Review*, no. 9, pp. 64–69 (in Russian).
32. Tinkoff (2022) *Tinkoff Premium is recognized as the best digital bank for premium clients by Frank RG*. Available at: <https://www.tinkoff.ru/about/news/02-11-2022-tinkoff-premium-best-digital-bank-for-preium-clients-according-to-frg/> (accessed 10 December 2023) (in Russian).

### About the authors

#### Ivan V. Solovyov

Postgraduate Student, Lecturer, Department of Operational Management and Logistics, Graduate School of Business, HSE University, 26–28, Shabolovka Street, Moscow 119049, Russia;

E-mail: [solovjev.iw@yandex.ru](mailto:solovjev.iw@yandex.ru), [isolovev@hse.ru](mailto:isolovev@hse.ru)

ORCID: 0000-0002-3120-9726

#### Viatcheslav A. Semenikhin

Postgraduate Student, Department of Operational Management and Logistics, Graduate School of Business, HSE University, 26–28, Shabolovka Street, Moscow 119049, Russia;

E-mail: [vsemenikhin@planear.ru](mailto:vsemenikhin@planear.ru), [vasemenikhin@hse.ru](mailto:vasemenikhin@hse.ru)

ORCID: 0000-0001-6923-0363

#### Sergey P. Kushch

Dr. Sci. (Econ.), Professor

Professor, Head of the Department of Operational Management and Logistics, Graduate School of Business, HSE University, 26–28, Shabolovka Street, Moscow 119049, Russia;

E-mail: [skushch@hse.ru](mailto:skushch@hse.ru)

ORCID: 0000-0002-6749-184X



DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.73.93

# Методы и модели обоснования прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий

**Ю.Ф. Тельнов** 

E-mail: telnov.yuf@rea.ru

**В.А. Казаков** 

E-mail: kazakov.va@rea.ru

**А.А. Брызгалов** 

E-mail: bryzgalov.aa@rea.ru

**И.Г. Федоров** 

E-mail: fedorov.ig@rea.ru

Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова  
Адрес: Россия, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36

## Аннотация

Процесс цифровой трансформации предприятий связан с организацией производственных и бизнес-процессов в рамках выбираемых типов бизнес-моделей и цифровых платформ, распределением и экономическим обоснованием ролей участников сетевых взаимодействий, обеспечением семантической интероперабельности их взаимодействия. В настоящее время накоплен определенный опыт по внедрению современных бизнес-моделей цифровой трансформации предприятий, который отражен в концепциях Индустрии четвертого поколения, промышленного интернета вещей, создания киберфизических производственных систем, смарт-предприятий, интеллектуального производства. Вместе с тем, вопросы концептуального моделирования архитектуры цифровых предприятий, определяющей построение производственных и бизнес-процессов, и ее экономического обоснования в зависимости от различных факторов внешней среды и внутреннего экономического потенциала еще недостаточно исследованы и разработаны, что определяет актуальность представленной работы. Цель исследования заключается в разработке онтологических и экономических методов обоснования

прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов в зависимости от выбираемых типов бизнес-моделей и цифровых платформ. Для решения поставленной задачи применяется методы классификации, онтологического инжиниринга, функционально-стоимостного анализа, анализа денежных потоков доходов и расходов. В статье представлен анализ сценариев цифровизации предприятий в зависимости от видов производственных и бизнес-процессов, используемых типов бизнес-моделей и цифровых платформ. Построена онтологическая модель цифровой трансформации предприятия, обеспечивающая выбор прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов для различных типов бизнес-моделей и цифровых платформ. Предлагается экономическая модель обоснования вариантов построения прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов в зависимости от распределения ролей участников сетевого взаимодействия с использованием методов функционально-стоимостного анализа затрат и анализа денежных потоков.

**Ключевые слова:** сетевое предприятие, прикладной сценарий цифровизации, тип бизнес-модели, тип цифровой платформы, производственные и бизнес-процессы, онтологическая модель, экономическая модель

**Цитирование:** Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Брызгалов А.А., Федоров И.Г. Методы и модели обоснования прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов сетевых предприятий // Бизнес-информатика. 2023. Т. 17. № 4. С. 73–93. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.73.93

## Введение

Внедрение современных цифровых технологий в промышленности приводит к переходу от массового производства к массовой кастомизации, когда преобладающим становится выпуск мелкосерийной и единичной продукции [1]. В основе цифровой трансформации в промышленности лежит использование передовых производственных технологий на основе применения промышленного интернета вещей, киберфизических систем, цифровых двойников и платформ, искусственного интеллекта. В этой связи изменяются требования к системам управления предприятиями в части адаптивности оперативного управления и гибкости конфигурирования производственных цепочек не только на уровне одного предприятия, но и на уровне взаимодействия между предприятиями в рамках формирования сетевых бизнес-структур (сетевых предприятий).

В основе организации гибкого производства на современном этапе лежит применение киберфизических систем (CPS), интеллектуальных активов, оснащенных RFID и поддерживаемых технологией промышленного интернета вещей, и киберфизических производственных систем (CPPS), объединяющих отдельные активы в системы с помощью тех-

нологии цифровых двойников и цифровых нитей на уровне цехов, фабрик и цепочек поставок [2–4].

Развитие в Индустрии четвертого поколения современных производственных технологий существенным образом изменяет архитектуру систем управления предприятиями и временные интервалы оперативного и тактического планирования и регулирования процессов. В первую очередь организация цифровых производственных систем характерна для уровня управления отдельным оборудованием и технологическими линиями. Вместе с тем, распространение технологии цифровых двойников, реализуемых с помощью многоагентных систем, на организационные субъекты, участников цепочки создания стоимости сетевых предприятий, позволяет модернизировать системы управления производственными и бизнес-процессами.

Существующие системы цифровых двойников, описанные в [5–7], в основном ориентированы на информационное отображение состояния объектов физического и/или виртуального мира с организацией доступа к этой информации всем заинтересованным лицам, участвующим в реальных производственных или бизнес-процессах предприятия или осуществляющим управление этими процессами. Цифровые двойники также позволяют осуществлять

имитационное моделирование производственных и бизнес-процессов в целях оптимизации использования ресурсов предприятия [8–10].

Для повышения эффективности функционирования производственных систем активно ведутся разработки концепции индустриального агента, под которой понимается «автономная и самодостаточная киберфизическая сущность, представляющая функциональность одного или нескольких промышленных активов и управляющая ими, обеспечивая постоянную или временную физическую связь с целью выполнения функций и процессов» [11]. Автономность индустриальных агентов означает их способность реагировать на события, возникающие во внешней среде, принятие решений и их исполнение. В основе построения таких производственных систем лежит применение интеллектуальных технологий, связанных с построением динамических многоагентных систем.

Для интеграции участников сетевых предприятий на первое место выходят вопросы создания и использования цифровых платформ и подключаемых интеллектуальных агентов, которые должны обеспечивать реализацию принципов децентрализации управления, вертикальной и горизонтальной интеграции производственных и бизнес-процессов, быстрого реконфигурирования производственных цепочек и повышение надежности функционирования всей производственной системы [3, 4, 12].

Под цифровой платформой (ЦТ) с технологической точки зрения будем понимать набор программных сервисов, объединенных общей программной средой, для реализации различных функций создания и функционирования бизнес-экосистемы и отдельных сетевых предприятий [13].

В работе [14] проводится обобщение опыта использования цифровых платформ на различных промышленных предприятиях Германии и Японии, в результате которого авторы предлагают следующую классификацию:

- ♦ Облачная платформа реализует с помощью облачных сервисов централизованный сбор и обработку данных о работе производственных компаний, которые обрабатываются с целью своевременной диагностики отклонений от планов и долгосрочного прогнозирования работоспособности производственной структуры. Облачные платформы открытого типа функционируют для всей бизнес-экосистемы, а платформы закрытого

типа — только для участников отдельных цифровых или сетевых предприятий.

- ♦ Периферийно-разворачиваемая платформа расширяет облачную платформу вычислительной инфраструктурой, развертываемой локально на удаленных объектах, соответствующих таким производственным активам, как оборудование, производственные линии, цеха и фабрики. В этом отношении сбор и первичная обработка данных осуществляется на удаленных объектах в замкнутом режиме, а обобщенная информация и принятие централизованных решений — возможно в открытой облачной среде.
- ♦ Посредническая платформа (торговая площадка) берет на себя функции организации взаимодействия предприятий друг с другом с точки зрения подбора наилучших по различным критериям партнеров по бизнесу, играет роль, в простейшем случае, торговой площадки. Посреднические платформы как правило имеют открытый характер формирования бизнес-экосистемы.
- ♦ Гибридная платформа позволяет комбинировать функциональные возможности различных типов цифровых платформ для различных типов бизнес-моделей сетевых предприятий.

Выбор типа цифровой платформы тесно связан с выбором типа бизнес-модели производственной системы, которая определяет схему взаимосвязанных материальных, информационных и финансовых потоков под углом зрения общей стратегии цифровой трансформации с учетом технологических и ресурсных ограничений [15]. Как правило, этот выбор является взаимно-однозначным, то есть бизнес-модель определяет требования к цифровой платформе, а цифровая платформа задает ограничения на реализацию бизнес-модели.

В работе [16] дана обобщенная классификация бизнес-моделей для систем Индустрии четвертого поколения, в соответствии с которой выделяются: модель платформы промышленного интернета вещей, модель услуг в цепочке создания стоимости, модель брокерской платформы, модель доверенного доступа к данным. В работе [15] была предложена мнокритериальная модель выбора типа бизнес-модели, учитывающая получение сетевых эффектов, факторы цифровой зрелости компании, коммерческих рисков и рисков информационной безопасности.

В принципе на одном предприятии могут применяться различные типы бизнес-моделей (БМ) в за-

висимости от особенностей типа цепочки создания стоимости и стадии жизненного цикла выпускаемой продукции и/или оказываемых услуг [17]. Следовательно, особенности среды функционирования предприятия определяет требования к построению бизнес-модели, а бизнес-модель может коренным образом трансформировать соответствующие производственные и бизнес-процессы с помощью определенного прикладного сценария цифровизации (применения цифровых технологий) [18]. Таким образом, типы цифровых платформ, типы бизнес-моделей и прикладные сценарии цифровизации оказываются сильно взаимосвязанными, влияющими друг на друга.

Вместе с тем внедрение современных цифровых технологий в практику функционирования промышленных предприятий все еще остается недостаточно исследованной областью, требующей обобщения накапливаемого опыта практического применения производственных технологий и формирования методики обоснования выбора тех или иных прикладных сценариев цифровизации в увязке с выбором типов используемых бизнес-моделей и цифровых платформ.

Рабочей группой Plattform Industrie 4.0 AG2 (R&D Working Group) [19] было проведено обобщение практики применения цифровых платформ в организации производственных и бизнес-процессов и предложены перспективные прикладные сценарии для новых проектов цифровой трансформации предприятий. На базе выделенных прикладных сценариев возможно построение испытательных стендов, на которых возможна отработка различных режимов работы предприятий. Аналогичные работы по формированию типовых сценариев цифровизации были проведены рабочей группой Smart Service Welt [20, 21] и в подходе к созданию испытательных стендов Консорциума промышленного Интернета (Industrial Internet Consortium, IIC) [22], которые позволяют тестировать предлагаемые варианты использования прикладных сценариев, исследовать перспективные сценарии развития технологий, формировать требования к стандартизации.

Сравнение перечисленных подходов показало очень сильное пересечение содержания рассматриваемых аспектов цифровизации по прикладному сценарию, основанному на анализе ценности собираемых данных о работе активов, и сценарию обеспечения прозрачности и адаптивности поставляемых продуктов. Вместе с тем, подход к построению прикладных сценариев в концепции

проекта «Платформа Индустрии 4.0» является более полным с точки зрения реализации процессов по всем основным типам видам производственных и бизнес-процессов на различных этапах жизненного цикла. Поэтому в дальнейшем этот подход положен за основу для исследования прикладных сценариев цифровизации для различных типов бизнес-моделей и цифровых платформ.

Накопление опыта внедрения бизнес-моделей, цифровых платформ и прикладных сценариев цифровизации и его обобщение в виде референсных моделей позволяет организовать систему, основанную на знаниях [23], которая бы давала возможность отбирать по качественным признакам адекватные сценарии и бизнес-модели цифровой трансформации предприятий, при необходимости комбинировать и адаптировать их к условиям функционирования конкретного предприятия и осуществлять расчет прямых сетевых эффектов от применения выбранных сценариев. Причем все задачи решаются на основе построения онтологии цифровой трансформации предприятий, а последняя задача — на основе применения комбинации функционально-стоимостного анализа затрат на выполнение производственных и бизнес-процессов и анализа денежных потоков для оценки рентабельности инвестиций в цифровую трансформацию. В соответствии с представленной постановкой проблемы в статье ставится цель разработать методы и модели обоснования сценария цифровизации производственных и бизнес-процессов предприятий с учетом выбора типа бизнес-модели и цифровой платформы.

### **1. Методы обоснования сценариев цифровой трансформации производственных и бизнес-процессов предприятий**

С архитектурной точки зрения трансформация предприятий на основе цифровых технологий выполняется на нескольких архитектурных уровнях [24, 25]:

- ♦ организации бизнеса — определение заинтересованных сторон, их видения цифровой трансформации, декларируемых ценностей, целей и задач цифровизации предприятия;
- ♦ участия пользователей — определение последовательности действий с участием пользователей, которые обеспечивают необходимую функциональность для достижения возможностей цифровой производственной системы;

- ◆ функциональных требований – выделение функциональных компонентов цифровой производственной системы, определение их структуры и взаимосвязи, интерфейсов между ними и с внешней средой;
- ◆ реализации – использование технологий для реализации функциональных компонентов, их коммуникационных схем и процедур жизненного цикла.

В статье предлагается методы обоснования цифровой производственных и бизнес-процессов предприятия, которые определяет взаимосвязанный выбор прикладного сценария цифровизации, типа бизнес-моделей и типа цифровой платформы и обеспечивает требования к цифровой производственной системе на уровне организации бизнеса

и участия пользователей. Взаимосвязь прикладных сценариев цифровизации, типов бизнес-моделей и типов цифровых платформ представлена в таблице соответствия компонентов цифровой трансформации предприятий (таблица 1), которая построена на основе [14, 16, 19].

Примеры реализации прикладных сценариев цифровизации на основе использования различных типов бизнес-моделей и цифровых платформ на практике отражены в работах [26–31].

Предлагаемая методика обоснования цифровой трансформации предприятий, которая реализуется в рамках создаваемой системы, основанной на знаниях, включает последовательное применение следующих методов:

Таблица 1.

Соответствие компонентов цифровой трансформации предприятий

Процессы цепочки создания стоимости	Прикладной сценарий цифровизации	Тип бизнес-модели	Тип цифровой платформы
Управление жизненным циклом создания продукции	IPD – Сеть создания стоимости «Инновационная разработка продукта (создание замысла и конструирование продукта)	Предоставление доверенного доступа к данным	Облачная платформа
	SP2 – Цепочка создания стоимости «Разработка смарт-продуктов для смарт-производства» (полный цикл разработки интеллектуальных продуктов)	Предоставление доверенного доступа к данным; модель платформы IIoT	Облачная платформа
Управление жизненным циклом производственной системы	SPD – цепочка создания стоимости «Бесшовный и динамический инжиниринг» фабрики, организация и оснащение фабрики (цеха)	Предоставление услуг в цепочке создания стоимости	Периферийно-разворачиваемая платформа
	AF – сеть создания стоимости адаптивной фабрики «Адаптивная фабрика», управление производственными ресурсами в производственном процессе	Предоставление услуг в цепочке создания стоимости	Периферийно-разворачиваемая платформа
Управление цепочками поставок	OSP – сеть создания стоимости «Производство, управляемое заказом», управление распределением общего пула ресурсов между участниками цепочки	Предоставление услуг в цепочке создания стоимости	Посредническая платформа (Торговая площадка) Облачная платформа
	SAL – сеть создания стоимости «Самоорганизующаяся и адаптивная логистика», маршрутизация логистики	Предоставление услуг в цепочке создания стоимости	Посредническая платформа (Торговая площадка) Облачная платформа
Управление сервисным обслуживанием активов	VBS – сеть создания стоимости «Сервис, основанный на ценности»	Модель платформы IIoT	Облачная платформа
	TAP – сеть создания стоимости «Транспарентность и адаптивность поддержки поставляемых продуктов», управление и доверенный доступ к данным о продукте	Предоставление доверенного доступа к данным	Облачная платформа



- ◆ Проведение онтологического инжиниринга и анализа применимости различных прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов к условиям функционирования конкретного предприятия, в результате которого для различных типов цепочек создания стоимости выбираются прикладные сценарии цифровизации, типы бизнес-моделей и типы цифровых платформ, составляющие конкретные варианты использования.
- ◆ Выполнение экономического анализа применимости отобранных вариантов использования в виде комбинации прикладного сценария, типа бизнес-модели и типа цифровой платформы на основе расчета прямых сетевых эффектов для всех задействованных сторон.

При выполнении этапа онтологического инжиниринга и анализа в онтологии цифровой трансформации предприятий предлагается отразить типы процессов в рамках цепочек создания стоимости и сценариев их цифровизации [19, 22, 32], типы бизнес-моделей [16, 17], типы цифровых платформ [14], факторы необходимости цифровой трансформации производственных и бизнес-процессов и выбора типов бизнес-моделей [15].

При описании прикладных сценариев цифровизации предприятий необходимо определять такие основные разделы, как [19, 22, 32]: заинтересованные стороны в цифровой трансформации (акторы); их роли в процессе трансформации; по каждой роли видение их реализации; ключевые ценности и опыт, которые актер получает в результате реализации сценария; фундаментальные возможности, которые характеризуют особенности проводимых инноваций под углом зрения внедряемых технологий.

В основе построения онтологического представления типа бизнес-модели и типа цифровой платформы лежит фреймворк построения бизнес-модели Санкт-Галлена [14–17, 33], в котором выделяются следующие основные категории:

- ◆ участники производственных и бизнес-процессов (процессов), и их роли;
  - ◆ предложение ценности на выходе процессов, результат процесса (value proposition);
  - ◆ цепочка ценности, определяющая характеристику выполнения ключевых работ и взаимодействия участников процессов (value chain);
  - ◆ механизм извлечения прибыли, определяющий денежные потоки между участниками процессов,
- которые формируют ценность для потребителей процессов, а также возможную экономию затрат на выполнение работ (revenue mechanism).
- Кроме того, для цифровых платформ задаются следующие дополнительные характеристики [14]:
- ◆ особенности заключения бизнес-контрактов;
  - ◆ описание ключевых инноваций бизнес-модели (описание изменений в бизнес-модели, качественные характеристики сетевых эффектов);
  - ◆ особенности информационной безопасности.
- Для проведения онтологического анализа онтология цифровой трансформации предприятий может использоваться в двух режимах:
- ◆ в справочном режиме, когда любая категория онтологии может быть выведена лицу, принимающему решение, для изучения с необходимой детализацией свойств и отношений;
  - ◆ в режиме выбора и обоснования применения тех или иных компонентов цифровой трансформации: прикладных сценариев, типов бизнес-моделей, типов цифровых платформ по отдельности и во взаимосвязи друг с другом под углом зрения различных аспектов и их комбинации при построении цепочек создания стоимости.
- Во втором случае в запросе задаются основные параметры предприятия, такие как тип предприятия, тип производства, характеристика производимого продукта, стадия жизненного цикла, предполагаемые виды трансформируемых производственных и бизнес-процессов. В соответствующих ответах на запросы выдаются рекомендации.
- Для уровня архитектуры цифровой производственной системы, характеризующего реализацию прикладных сценариев цифровизации, онтология цифровой трансформации предприятий расширяется описанием точек зрения на использование сценария с позиции каждого из участников.
- Описание точки зрения охватывает описание вида деятельности, связанного с использованием прикладного сценария, которое в свою очередь включает условие его выполнения, получаемые результаты, ограничения, и описания последовательности выполняемых задач (работ).
- На основе такого детального представления прикладных сценариев становится возможным проведение второго этапа методики обоснования цифровой трансформации предприятия, связанного с экономическим анализом возможности реализации сценария.



Сущность экономического анализа сводится к оценке сетевого эффекта для каждого участника сетевого взаимодействия по выбранному прикладному сценарию цифровизации предприятия. Эффект отдельного участника определяется как разница от получаемых доходов от оказания услуг в цепочке создания стоимости и расходов, связанных с платежами за использование услуг, предоставляемых другими участниками цепочки создания стоимости, и затратами на собственное выполнение работ. Доходы и расходы каждого участника цепочки создания стоимости вычисляются на основе известных статей платежей, фиксируемых в разделе «Механизм извлечения прибыли» онтологического описания типа бизнес-модели (типа цифровой платформы). Затраты на выполнение собственных работ каждым участником цепочки создания стоимости вычисляются методом функционально-стоимостного анализа по набору выполняемых задач для каждого вида деятельности. Точно также могут быть рассчитаны единовременные затраты на создание цифровой платформы и организацию производственных и бизнес-процессов. Подробно метод экономического анализа эффективности реализации прикладного сценария рассматривается в соответствующем разделе на примере двух вариантов использования прикладного сценария, основанного на ценности.

## 2. Онтологическая модель трансформации цифрового предприятия

Использование онтологии цифровой трансформации предприятий для создания системы, основанной на знаниях, позволяющей формировать бизнес-модели и прикладные сценарии их использования для конкретных цифровых предприятий, обеспечивает решение следующих задач:

- ♦ во-первых, онтология позволяет определить классификацию типовых бизнес-моделей, цифровых платформ и прикладных сценариев, по которой любое цифровое предприятие может сформировать адекватные требования к своей архитектуре;
- ♦ во-вторых, в соответствии с онтологией в консалтинговых компаниях могут накапливаться базы знаний реальных прецедентов использования моделей цифровой трансформации предприятий, которые могут отбираться по аналогии и адаптироваться к условиям функционирования конкретных цифровых предприятий.

Сценарий взаимодействия пользователя и СОЗ представлен на *рис. 1*.



Рис. 1. Взаимодействие пользователя и системы, основанной на знаниях, для обоснования варианта цифровой трансформации предприятия.

Одним из ключевых элементов СОЗ является онтология цифровой трансформации, основанная на принципах построения онтологии проектирования [34] и отражающая методы и модели проектирования компонентов варианта цифровой трансформации (типа бизнес-модели, типа цифровой платформы и прикладного сценария информатизации) сетевого предприятия, ориентированной на реализацию концепции Индустрии четвертого поколения.

Пользователь через интерфейс осуществляет формирование запроса к СОЗ на выбор компонентов варианта цифровой трансформации и получает соответственно из СОЗ ответ.

Поисковый сервис осуществляет отбор компонентов варианта цифровой трансформации, которые соответствуют текущей проблемной ситуации, определенной пользователем СОЗ с помощью онтологии цифровой трансформации.

Система, основанная на знаниях, позволяет эффективно накапливать и систематизировать лучший опыт проектов цифровой трансформации в репозитории, хранящем типовые варианты цифровой трансформации и конкретные применения прикладных сценариев цифровизации.

Модуль поддержки принятия решения реализует качественный и стоимостной анализ отбираемых из репозитория вариантов цифровой трансформации согласно [35].

Рассмотрим онтологическую модель цифровой трансформации сетевого предприятия более детально.

Ключевыми понятиями онтологии цифровой трансформации являются традиционные бизнес-сущности онтологии бизнес-моделирования [36]: Предприятие, Продукт, Тип и Стадия ЖЦ производства продукта, Стратегия, Бизнес-процесс, класс

Бизнес-модели, Роли, их Задачи, Риски, Затраты, Предложения ценности, и место в Цепочке ценности, Механизм получения прибыли в целом. Наряду с этим для целей СОЗ в онтологию интегрируются понятия домена Индустрии четвертого поколения: Цифровая платформа, тип Бизнес-модели, Прикладной сценарий и его виды согласно [19].

Разработанная структура онтологии цифровой трансформации разделена условно в целях наглядности на две части, относящиеся соответственно к выбору типа бизнес-модели (рис. 2) и выбору прикладного сценария цифровизации (рис. 3).

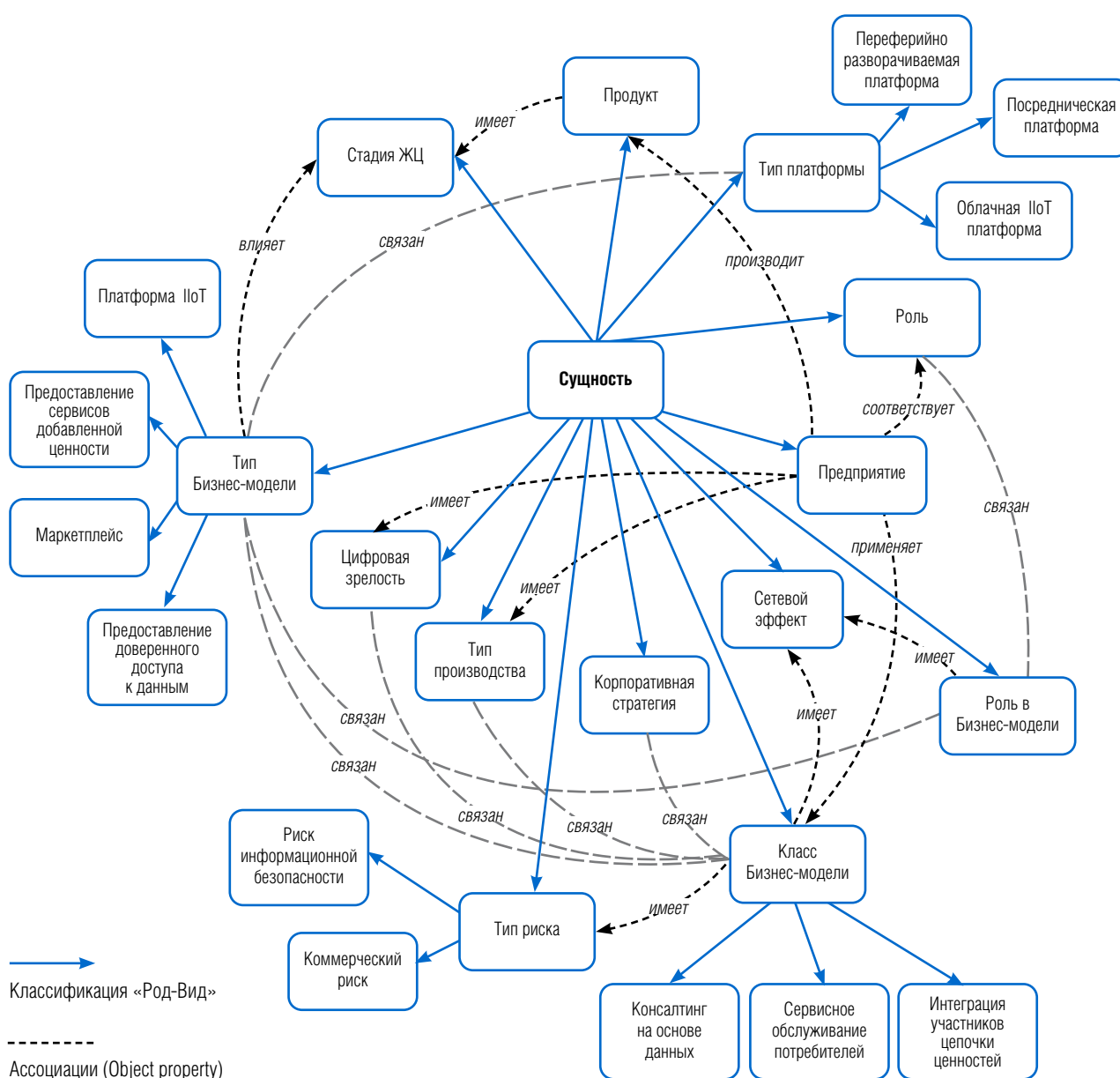


Рис. 2. Онтология цифровой трансформации (часть «Выбор типа бизнес-модели»).

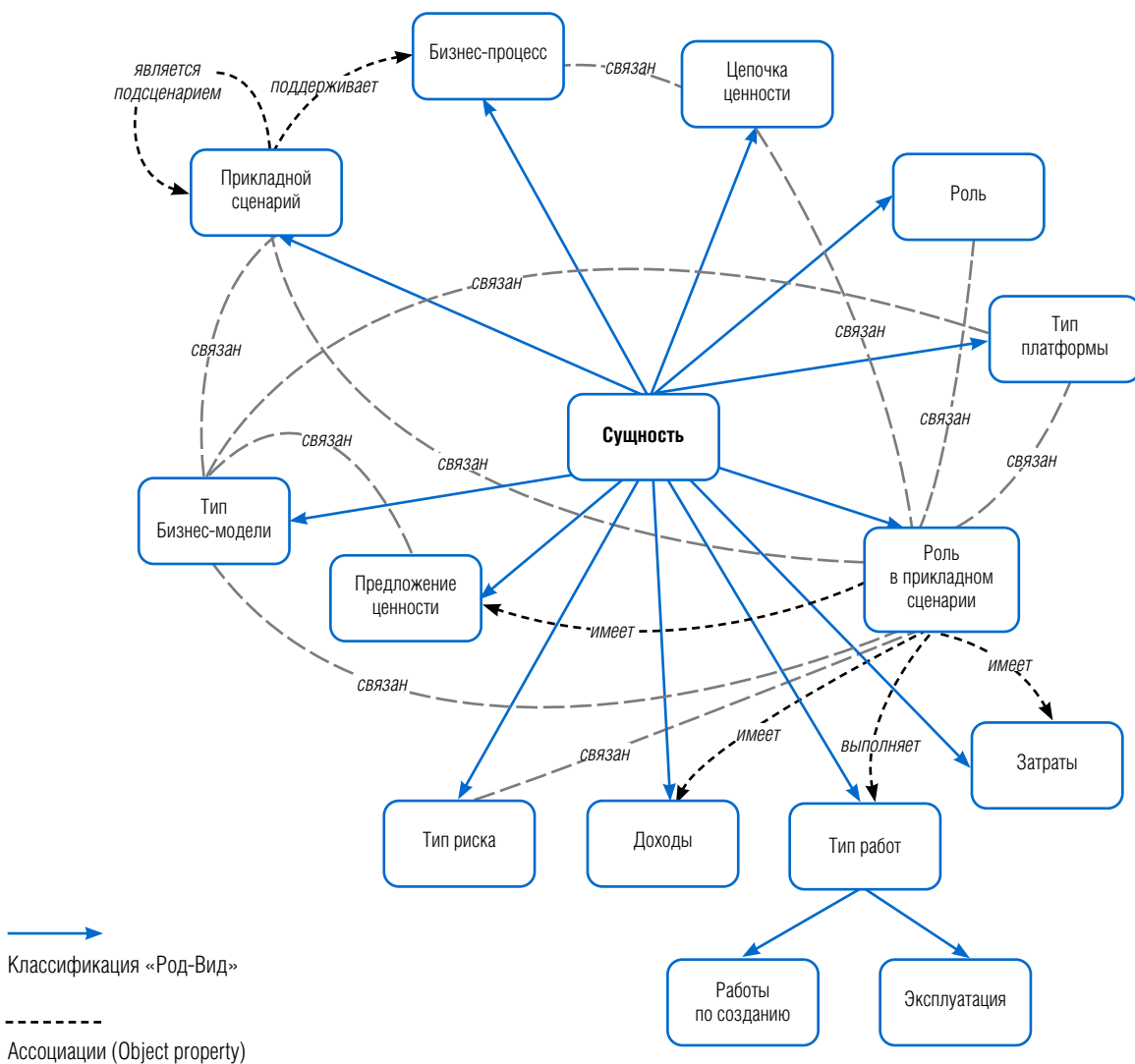


Рис. 3. Онтология цифровой трансформации (часть «Выбор прикладного сценария»).

Для обоснования выбора типа бизнес-модели Индустрии 4.0 (типа цифровой платформы) задаются взаимосвязанные описания, определяющие соответствие характеристик, свойственных организации (корпоративной стратегии, производимой продукции и производственной системы), и характеристик возможной бизнес-модели (необходимого уровня цифровой зрелости, возможных рисков, сетевых эффектов от цифровой трансформации) (рис. 2). Дальнейшие действия пользователя СОЗ позволяют выбрать вариант типа бизнес-модели, отвечающий параметрам конкретной организации [15].

Выбранный тип бизнес-модели характеризует способ организации функционирования сетевого предприятия на основе цифровой платформы, ко-

торый может быть детализирован с использованием прикладных сценариев цифровизации, носящих типовой характер [28, 30] (рис. 3). Отбор прикладных сценариев цифровизации, привязанных к конкретному типу бизнес-модели и включающих описание ролей, структуры доходов и затрат, набора исполняемых задач, осуществляется на основе выполнения типовых запросов к репозиторию СОЗ.

Основной сущностью для описания Прикладного сценария является Роль в прикладном сценарии, описание которой включает ряд характерных атрибутов:

- ♦ выполняемая в рамках конкретного сценария типовая Роль;

- ◆ особенность участия Роли в Цепочке создания ценности;
- ◆ предлагаемая Ролью Ценность;
- ◆ связанный с предложением ценности Доход;
- ◆ инвестиционные и операционные Затраты, которые несет выполняющий соответствующую Роль в прикладном сценарии участник сетевого предприятия (в том числе связанные с получением ценности от другого участника);
- ◆ специфические Работы в области проектирования и эксплуатации платформы, которые связаны с деятельностью соответствующей Роли;
- ◆ коммерческие Риски и риски в области информационной безопасности, с которыми связана деятельность Роли в Прикладном сценарии.

Типовыми запросами являются справочное обращение к описанию прикладных сценариев использования бизнес-моделей из онтологической базы знаний и отбор конкретных прикладных сценариев по различным признакам, интересующих заинтересованных лиц в создании сетевых предприятий.

При дальнейшем развитии СОЗ наряду с типовыми прикладными сценариями в базу знаний могут заноситься новые прикладные сценарии, отражающие лучший опыт предприятия, включающие описание проблемной ситуации и сформированную модель деятельности. При этом создаются понятия и экземпляры понятий, соответствующие описанию деятельности, проблемной ситуации и другим элементам прикладного сценария. После этого устанавливаются отношения между созданным частными и имеющимися типовыми прикладными сценариями. Таким образом, может обеспечиваться регулярное пополнение базы знаний актуальными знаниями о действенных способах цифровой трансформации предприятия и организации цепочек добавленной ценности на основе современных бизнес-моделей и цифровых платформ.

### 3. Экономическая модель обоснования прикладного сценария цифровизации сетевого предприятия

Обоснование целесообразности применения различных вариантов структурной организации производственных и бизнес-процессов, сформированных на основе типа бизнес-модели, типа цифровой платформы и прикладного сценария цифровизации, требует проведения количественного

экономического анализа, доказывающего возможность и эффективность их реализации. В качестве метода оценки варианта цифровой трансформации сетевого предприятия предлагается использовать метод NPV (net present value, чистая приведенная стоимость), который позволяет увязать вместе все денежные потоки разных временных периодов и определить их суммарную стоимость в настоящий момент времени [37, 38]. Целью применения метода NPV ставится решение об инвестировании головного предприятия и потенциальных участников в организацию сетевого предприятия.

В отличие от традиционного предприятия, которое самостоятельно инвестирует в организацию своих производственных и бизнес-процессов, сетевое предприятие требует минимальных первоначальных инвестиций от всех его участников или вовсе не требует их. Инвестирование проводится от заинтересованных сторон в зависимости от их целей в сети создания ценности и ресурсных возможностей, что снижает для многих участников бизнес-экосистемы барьер входа в него.

В общем случае для организации каких-либо прикладных сценариев цифровизации в сетевом предприятии требуются инвестиции в первую очередь в создание цифровой платформы, программных сервисов и агентов, взаимодействующих на платформе, от оператора платформы, провайдер сервисов и разработчика сервиса соответственно. Применение каких-либо вариантов реализации прикладных сценариев формирует периодический денежный поток для каждого участника цепочки создания стоимости, включающий в себя входящие и исходящие платежи предприятия и его внутренние расходы.

Решение об участии потенциального участника сетевого предприятия принимается на основе расчета суммарного значения NPV по всем его ролям, которое должно быть выше некоторого порогового значения:

$$NPV_i = \sum_{j=1}^{r_i} NPV_{ij}, i = 1, \dots, k, \quad (1)$$

где  $NPV_i$  – чистая приведенная стоимость для  $i$ -ого участника сетевого предприятия;

$NPV_{ij}$  – чистая приведенная стоимость для  $j$ -ой роли  $i$ -го участника сетевого предприятия;

$r_i$  – количество ролей  $i$ -ого участника сетевого предприятия;

$k$  – количество участников сетевого предприятия.

В качестве основных ролей участников сетевого предприятия можно определить следующие [19]:

- ◆ производственная компания;
- ◆ поставщик оборудования;
- ◆ оператор платформы;
- ◆ провайдер сервисов;
- ◆ системный интегратор;
- ◆ разработчик сервисов;
- ◆ разработчик платформы.

Сетевое предприятие как правило включает в себя головное предприятие чаще всего с ролью «производственная компания», которое становится инициатором проекта. Оно занимается формированием заказов для участников сетевого предприятия с вышперечисленными ролями. Сетевое предприятие, как правило, формируется на основе бизнес-экосистемы, обладающей цифровой платформой.

Значение NPV одного потенциального участника в сетевом предприятии для каждой роли цепочки создания стоимости определяется по формуле:

$$NPV_j = -IC_j + \sum_{t=1}^N \frac{CF_{jt}}{(1-sd)^t}, j=1, \dots, r, \quad (2)$$

где  $IC_j$  – первоначальные инвестиции для  $j$ -ой роли участника сетевого предприятия;

$CF_{jt}$  – денежный поток  $t$ -ого периода (в определенный год) для  $j$ -ой роли участника сетевого предприятия;

$sd$  – ставка дисконтирования;

$N$  – количество рассматриваемых периодов существования сетевого предприятия.

Денежный поток рассчитывается для каждого года деятельности сетевого предприятия как разность между доходами от платежей от других организаций и затратами, включающими в себя платежи другим организациям, внутренние расходы и затраты на риски. Для каждого потенциального участника должно быть экономически выгодным вхождение в сетевое предприятие.

Назначение ролей участникам сетевого предприятия осуществляется в соответствии с прикладным сценарием цифровизации, для которого определяется собственный характерный набор ролей цепочки создания стоимости в зависимости от направленности использования, например, на процессы управления продуктом, или на процессы управления производственной системой, или на процессы

управления цепочками поставок, или на процессы обслуживания продукта. В то же время в рамках реализации прикладного сценария предприятие может выполнять несколько ролей или множество предприятий могут участвовать в одной роли.

В дальнейшем формализацию экономической модели обоснования прикладного сценария цифровизации будем рассматривать на примере прикладного сценария «Сервис, основанный на ценности» (Value-Based Service, VBS) [28]. Суть сценария заключается в том, что производственная компания арендует у поставщика оборудования станки, которые могут работать с использованием технологии промышленного интернета вещей и, при необходимости, создаваться под индивидуальные требования. Провайдер программных сервисов предоставляет на платформу программные сервисы, которые эксплуатируются оператором платформы. Оператор платформы с подключенных к цифровой платформе станков производственного предприятия получает данные тремя способами и на основе полученных данных предлагает услуги головному производственному предприятию. Услуги представляют собой анализ получаемых данных с последующим формированием рекомендаций от Оператора платформы или Провайдера программных сервисов. Кроме того, данные могут быть переданы провайдеру программных сервисов для разработки новых или обновления старых программных сервисов. В данном варианте реализации прикладного сценария каждой роли соответствовало одно предприятие (рис. 4).

В другом варианте реализации прикладного сценария VBS головное предприятие организует свою собственную цифровую платформу, что позволяет контролировать доступ к платформенным и программным сервисам. В этом случае головное предприятие отказывается от аутсорсинга по работе с платформой и принимает роль производственного предприятия и оператора платформы на себя.

Решение об аутсорсинге цифровых услуг может обуславливаться следующими факторами:

- ◆ недостаточностью собственных финансовых и/или материальных ресурсов на выполнение определенных бизнес-процессов;
- ◆ недостаточной мотивированностью предприятия, к примеру, некоторые бизнес-процессы не являются приоритетными для предприятия, их выполнение может привести к снижению темпа производительности основных процессов;

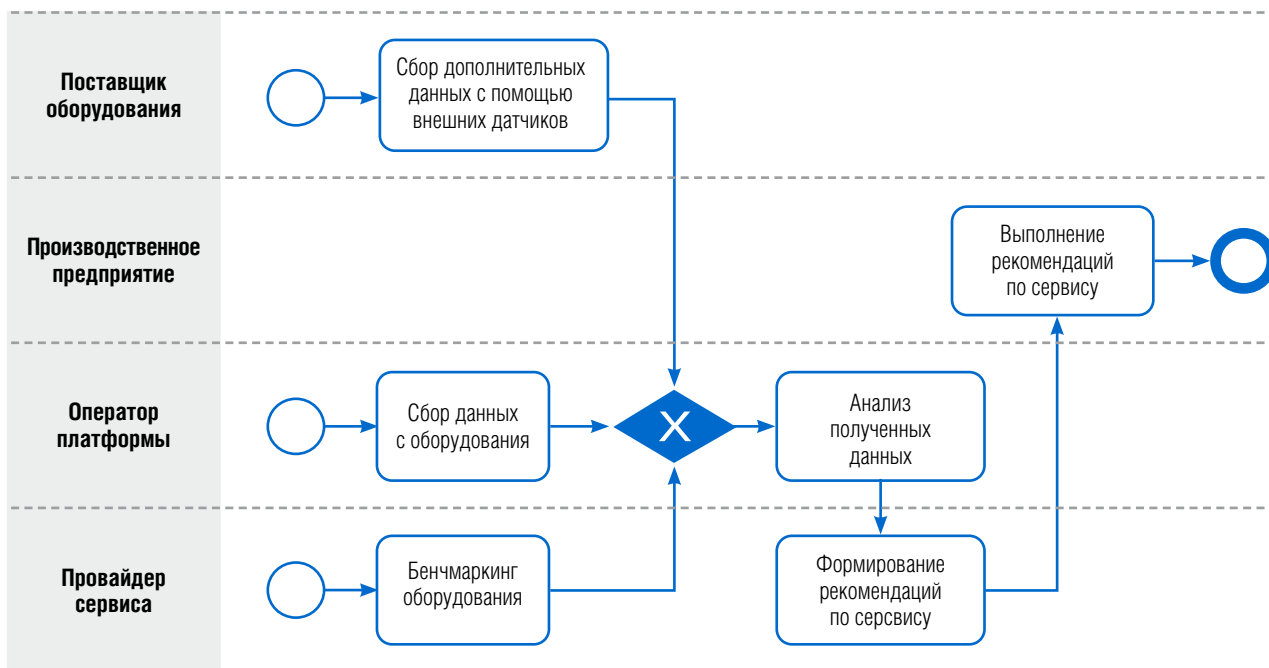


Рис. 4. Процесс выполнения сервиса по сбору и анализу данных о работе оборудования.

- ◆ наличием ограничений, например, связанных с конфиденциальной информацией, утечка которой приведет к потере конкурентоспособности на рынке.

В соответствии с [28] по прикладному сценарию выделяют работы, связанные с организацией платформы и сетевого предприятия, которые требуют первоначальных инвестиций от следующих основных ролей участников сетевого предприятия: Оператор платформы (ОП), Провайдер сервиса (ПС), Поставщик оборудования (ПО), Производственная компания (ПК). Список работ и их распределение по участникам сетевого взаимодействия представлены в *таблице 2*.

Вычисление значения общих затрат на первоначальные инвестиции ( $IC_j$ ) по каждой роли прикладного сценария VBS можно представить в виде суммирования всех видов затрат под конкретной ролью:

$$IC_j = \sum_{i=1}^N a_{ij}, i = 1, \dots, k, \quad (3)$$

где  $a_{ij}$  — элемент таблицы  $i$ -ого вида первоначальных инвестиций и  $j$ -ой роли прикладного сценария;

$N$  — количество видов расхода;

$k$  — количество ролей прикладного сценария.

Применение прикладных сценариев цифровизации приводит к изменению цепочки создания стоимости и соответственно новой структуре затрат и доходов у каждого ее участника. Это связано с тем, что происходит распределение рисков деятельности сетевого предприятия, определенных постоянных и

Таблица 2.

### Первоначальные инвестиции

Инвестиции в установку и настройку оборудования	Роли			
	ОП	ПС	ПО	ПК
Настройка платформы на сетевое предприятие	<i>IDP</i>			
Разработка сервиса		<i>IDS</i>		
Разработка оборудования (индивидуальные требования)			<i>IDE</i>	
Аренда оборудования				<i>IE</i>
Производство оборудования Продукта			<i>IPE</i>	
Подключение и настройка оборудования	<i>ICN<sub>1</sub></i>		<i>ICN<sub>2</sub></i>	<i>ICN<sub>3</sub></i>



переменных затрат между участниками, а также появление новых статей доходов и расходов, которые зависят от исполняемых ролей участника в цепочке создания стоимости и самого прикладного сценария.

Таким образом измененную структуру затрат и доходов ежегодного денежного потока ( $CF_i$ ) у каждого участника сетевого предприятия можно определить по формуле:

$$CF_i = DP_i + DN_i - SP_i - VZ_i, i = 1, \dots, k, \quad (4)$$

где  $k$  – количество предприятий, участвующих в рамках прикладного сценария цифровизации;

$DP_i$  – доход от получения платы за услуги  $i$ -ого предприятия;

$SP_i$  – собственные платежи за оказанные услуги  $i$ -ого предприятия.

$DN_i$  – косвенный сетевой эффект  $i$ -ого предприятия;  $VZ_i$  – внутренние затраты  $i$ -ого предприятия, которые вычисляются на основе применения метода функционально-стоимостного анализа [39–41].

Для производственной компании косвенный эффект – это сокращение издержек на ремонт и обслуживание оборудования. Для провайдера программных сервисов – это создание новых сервисов на основе данных от оборудования производственного предприятия, что приведет к увеличению лицензий. Для оператора платформы – это сокращение издержек на эксплуатацию и поддержку платформы в связи с увеличением числа участников платформы за счет усиления привлекательности платформы для участников сетевого предприятия за счет новых программных сервисов и сервисов платформы. Для поставщика оборудования – это сокращение издержек за счет снижения времени простоя оборудования, так как увеличение количества производственных предприятий даст высокую вероятность, что оборудование будет арендовано.

Помимо издержек, перечисленных в *таблице 3*, внутренние затраты кроме всякого рода издержек включают в себя плату за мероприятия по предотвращению рисков. В данные платы могут входить затраты на анализ и прогнозирование рисков, затраты на ликвидацию последствий непредвиденных рисков и затраты страхования от выбранных рисков.

Для производственной компании в сетевом предприятии можно определить следующие риски, связанные со сбоями в работе:

Таблица 3.

Денежный поток для одного года

Вид расхода (Статьи доходов/расходов)	Роли			
	ОП	ПС	ПО	ПК
Плата за сервис	$S$			$-S$
Плата за сервисы платформы от провайдера сервиса	$SP$	$-SP$		
Плата за сервисы платформы от поставщика оборудования	$SE$	$-SE$		
Плата за подключение оборудования	$-CN$		$CN$	
Плата за настройку оборудования	$-F$		$F$	
Оплата лицензии за использование приложения оператором оборудования	$-L$	$L$		
Издержки на содержание платформы	$-PL$			
Издержки на разработку приложения для сервиса		$-DA$		
Издержки на разработку сервиса		$-DS$		
Плата за аренду оборудования			$AE$	$-AE$
Плата за мероприятия по предотвращению рисков	$-R_1$	$-R_2$	$-R_3$	$-R_4$
Косвенный сетевой эффект	$DN_1$	$DN_2$	$DN_3$	$DN_4$

- ◆ оборудование;
- ◆ платформа, в том числе ограничение доступа к ней;
- ◆ программные сервисы, в том числе ограничение доступа к ним, а также сбои в поставке оборудования под индивидуальный заказ;
- ◆ неверно выполненные индивидуальные заказы на оборудование;
- ◆ отсутствие потребности в продукте у клиентов.

Для провайдера программных сервисов в сетевом предприятии можно определить следующие риски:

- ◆ потеря возможности поставлять программные сервисы на платформу;
- ◆ отказ оператора платформы от программного сервиса в связи с невостребованностью или созданием аналогичного и конкурентоспособного программного сервиса;
- ◆ невозможность интеграции оборудования под индивидуальный заказ и программного сервиса; выявление критических ошибок в программном сервисе;
- ◆ утечка конфиденциальных данных о процессах и пользователях программного сервиса.

Для оператора платформы в сетевом предприятии можно определить следующие риски:

- ◆ отказ от работы на платформе головного предприятия;
- ◆ невозможность работы платформы в связи отсутствием финансовых ресурсов или технологических проблем;
- ◆ потеря репутации из-за некачественных программных сервисов;
- ◆ утечка конфиденциальных данных о процессах и пользователях платформенных сервисов.

Для поставщика оборудования в сетевом предприятии можно определить следующие риски:

- ◆ отказ от индивидуальной разработки оборудования;
- ◆ невозможность интеграции оборудования под индивидуальный заказ и программного сервиса;
- ◆ отказ производственной компании от аренды оборудования в связи с невостребованностью или созданием аналогичного и конкурентоспособного типового оборудования.

В *таблице 3* знак минус означает платеж за услугу или внутренние издержки, отсутствие знака — поступление платежа. Вычисление значения денежного потока ( $CF_j$ ) по каждой роли прикладного сценария VBS можно представить в виде суммирования всех видов расходов под конкретной ролью:

$$CF_j = \sum_{i=1}^N a_{ij}, i = 1, \dots, k, \quad (5)$$

где  $a_{ij}$  — элемент таблицы  $i$ -ого вида расхода и  $j$ -ой роли прикладного сценария цифровизации;

$N$  — количество видов расхода;

$k$  — количество ролей прикладного сценария.

В условиях того, что предприятие может исполнять несколько ролей при организации сетевого предприятия, количество видов входящих и исходящих платежей меняется. В зависимости от того, какие роли на себя берут предприятия в рамках прикладного сценария цифровизации, меняется структура учета рисков, а также основные виды издержек деятельности в сетевом предприятии, когда платежи заменяются на внутренние издержки.

Предложенная экономическая модель обоснования сценариев построения производственных и бизнес-процессов сетевого предприятия на основе методов чистой приведенной стоимости (NPV) и функционально-стоимостного анализа позволяет оценить привлекательность сетевого предприятия для всех его потенциальных участников. Благодаря экономическому анализу принятие решения о применении прикладного сценария цифровизации для создания сетевого предприятия становится экономически обоснованным, в связи с предоставлением информации о возможных доходах, затратах, рисках и других факторах, связанных с цепочкой создания стоимости. Анализ позволяет оценить для каждого предприятия и ему соответствующих ролей потенциальную прибыль, сформированную на основе платежей, получения прямых и косвенных сетевых эффектов и экономии внутренних затрат, сравнить их с первоначальными затратами, а также определить наилучший вариант реализации прикладного сценария цифровизации.

### Заключение

Анализ опыта внедрения бизнес-моделей, цифровых платформ и прикладных сценариев цифровизации на предприятиях показывает необходимость разработки онтологических и экономических методов формирования и обоснования организации производственных и бизнес-процессов в зависимости от типа и потенциала участников сетевых предприятий. Причем онтологическая модель цифровой трансформации должна служить основанием формирования вариантов прикладных сценариев цифровизации для последующего их экономического обоснования.

Предложенный метод онтологического инжиниринга и анализа применимости различных прикладных сценариев цифровизации производственных и бизнес-процессов к условиям функционирования конкретного предприятия предполагает отображение в онтологии классификации типов

бизнес-моделей, цифровых платформ и собственно прикладных сценариев во взаимосвязи для различных типов цепочек создания стоимости.

В статье определены основные типы запросов для обоснования прикладных сценариев цифровизации предприятий, которые позволяют отбирать типовые сценарии цифровизации по отдельным или комбинациям признаков, характеризующих формирование ценностных предложений, получение конкурентных преимуществ, обеспечение положительных денежных потоков в зависимости от исполняемых ролей участников сетевых предприятий. Компьютерная реализация онтологии в формате OWL позволяет также осуществлять справочные запросы по реализации отдельных типов прикладных сценариев.

В перспективе разработанная онтология цифровой трансформации предприятий может служить основой для накопления онтологической базы данных прецедентов внедрения прикладных сценариев, бизнес-моделей и цифровых платформ для поиска наилучшей практики цифровой трансформации и ее адаптации к конкретным условиям.

В основе экономического анализа сетевых эффектов от применения того или иного варианта построения прикладного сценария цифровизации предприятий в статье предлагается применение метода чистой приведенной стоимости NPV, в котором определяются инвестиции по типовым работам подготовки цифровой платформы к эксплуатации, а также текущие доходы и затраты в виде взаимных платежей участников сетевых предприятий с учетом себестоимости выполнения внутренних работ. С этой точки зрения в статье определен

состав статей доходов и затрат для распространенного прикладного сценария получения ценности от анализа цифровых данных. Сравнение суммарного сетевого эффекта по различным вариантам ролевого участия заинтересованных сторон сетевого предприятия позволяет выбрать наилучшую реализацию прикладного сценария. В перспективе предлагается расширение метода экономического анализа вариантов построения прикладных сценариев формализацией моделей получения косвенных сетевых эффектов за счет расширения числа участников бизнес-экосистемы.

Новизна предложенных методов и моделей обоснования вариантов цифровой трансформации производственных и бизнес-процессов предприятий заключается в постановке и решении задачи взаимосвязанного выбора типа бизнес-модели, типа цифровой платформы и прикладного сценария в зависимости от характера предприятия. При этом онтологическая модель цифровой трансформации служит основой для формирования прикладных сценариев цифровизации предприятий, выбор которых уточняется в результате применения модели расчета экономической эффективности по методам NPV и функционально-стоимостного анализа. ■

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-11-00282, <https://rscf.ru/project/22-11-00282/>.

### Литература

1. Цифровая трансформация промышленных предприятий в условиях инновационной экономики / [Под научн. ред. М.Я. Веселовского и Н.С. Хорошавиной]. М.: Мир науки, 2021. [Электронный ресурс]: <https://izd-mn.com/PDF/06MNNPM21.pdf> (дата обращения 30.10.2023).
2. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л. Разработка цифровых двойников для производственных предприятий // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 4. С. 7–16. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2019.4.7.16>
3. Salazar L.A.C., Ryashentseva D., Lüder A., Vogel-Heuser B. Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern – comparison of selected approaches mapping four agent patterns // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Vol. 105. P. 4005–4034. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03800-4>
4. Salazar L.A.C., Vogel-Heuser B. A CPPS-architecture and workflow for bringing agent-based technologies as a form of artificial intelligence into practice // Automatisierungstechnik. 2022. Vol. 70. No. 6. P. 580–598.
5. Цифровые двойники в высокотехнологичной промышленности. Экспертно-аналитический доклад // Инфраструктурный центр «Технет» НТИ. Москва, 2019. [Электронный ресурс]: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12\\_december/28/cifrovoy\\_dvoynik.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoynik.pdf) (дата обращения: 30.10.2023).
6. Минаев В.А., Мазин А.В., Здирук К.Б., Куликов Л.С. Цифровые двойники объектов в решении задач управления // Радиопромышленность. 2019. Т. 29. № 3. С. 68–78. <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78>
7. Абрамов В.И., Бобоев Д.С., Гильманов Т.Д., Семенков К.Ю. Теоретические и практические аспекты создания цифрового двойника компании // Вопросы инновационной экономики. 2022. Т. 12. № 2. С. 967–980. <https://doi.org/10.18334/vinec.12.2.114890>

8. Akopov A.S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 220–230. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.051122>
9. Akopov A.S. Parallel genetic algorithm with fading selection // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2014. Vol. 49. No. 3/4. P. 325–331. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.062368>
10. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // *Бизнес-информатика*. 2021. Т. 15. № 2. С. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
11. Kovalenko I., Tilbury D., Barton K. The model-based product agent: A control oriented architecture for intelligent products in multi-agent manufacturing systems // *Control Engineering Practice*. 2019. Vol. 86. P. 105–117.
12. Komesker S., Motsch W., Popper J., Sidorenko S., Wagner A., Ruskowski M. Enabling a multi-agent system for resilient production flow in modular production systems // *Proceedings of the 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP*. 2022. Vol. 107. P. 991–998.
13. Тельнов Ю.Ф., Казаков В.А., Данилов А.В., Денисов А.А. Требования к программной реализации системы Индустрии 4.0 для создания сетевых предприятий // *Программные продукты и системы*. 2022. Т. 35. № 4. С. 557–571. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.140.557-571>
14. Digital Platforms in Manufacturing Industries. Result Paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2021. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/digital-platforms-in-manufacturing-2021.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
15. Тельнов Ю.Ф., Брызгалов А.А., Козырев П.А., Королева Д.С. Выбор типа бизнес-модели для реализации стратегии цифровой трансформации сетевого предприятия // *Бизнес-информатика*. 2022. Т. 16. № 4. С. 50–67. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.50.67>
16. Digital business models for Industrie 4.0. Result paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Industry/digital-business-models-industry-4-0.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
17. Weking J., Stocker M., Kowalkiewicz M., Bohm M., Krcmar H. Archetypes for industry 4.0 business model innovations // *Proceedings of the 24th Americas Conference on Information Systems (AMCIS)*. Association for Information Systems (AIS) (eds. A. Bush, V. Grover, S. Schiller). 2018.
18. Тельнов Ю.Ф., Брызгалов А.А., Королева Д.С. Организация производственных и бизнес-процессов в цепочках создания стоимости на основе прикладных сценариев цифровизации предприятий // *Открытое образование*. 2023. Т. 27. № 3. С. 43–54.
19. Aspects of the research roadmap in application scenarios. Working paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2016. [Электронный ресурс]: <http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/aspects-of-the-research-roadmap.html> (дата обращения: 30.10.2023).
20. Smart service WELT. Digitale Serviceplattformen – Praxiserfahrungen aus der Industrie. Best Practices // *acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften*. 2016. [Электронный ресурс]: [https://innosabi.com/wp-content/uploads/2016/05/BerichtSmartService2016\\_DE\\_barrierefrei.pdf](https://innosabi.com/wp-content/uploads/2016/05/BerichtSmartService2016_DE_barrierefrei.pdf) (дата обращения: 30.10.2023).
21. Lu Y., Xu X., Wang L. Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios // *Journal of Manufacturing Systems*. 2020. Vol. 56. P. 312–325.
22. Proposal for a joint “scenario” of Plattform Industrie 4.0 and IIC. Discussion paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2016. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33286.98881>
23. Тельнов Ю.Ф. Реинжиниринг бизнес-процессов: компонентная методология // *Финансы и статистика*, 2005.
24. Usage view of asset administration shell. Discussion Paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2019. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
25. The Industrial Internet Reference Architecture // *Industry IoT Consortium*. 2022. [Электронный ресурс]: <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/IIRA-v1.10.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
26. Seitz M., Gehlhoff F., Salazar L.A.C., Fay A., Vogel-Heuser B. Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in industry 4.0 // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021. Vol. 32. P. 2023–2041. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01759-2>
27. Savastano M., Amendola C., D’Ascenzo F. How digital transformation is reshaping the manufacturing industry value chain: The new digital manufacturing ecosystem applied to a case study from the food industry // *Network, Smart and Open. Lecture Notes in Information Systems and Organisation*. Vol. 24. P. 127–142. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62636-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62636-9_9)
28. Usage viewpoint of application scenario value-based service. Discussion Paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/hm-2018-usage-viewpoint.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
29. Usage view «Seamless and dynamic engineering of plants». Discussion Paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2020. [Электронный ресурс]: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Industry/usage-view-seamless-and-dynamic-engineering-of-plants.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).

30. Benefits of application scenario value-based service. Working Paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2017. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/benefits-application-scenario.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
31. Exemplification of the Industrie 4.0 application scenario value-based service following IIRA structure. Working Paper // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2017. [Электронный ресурс]: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/exemplification-i40-value-based-service.pdf> (дата обращения: 30.10.2023).
32. Guidance “Use cases and applications” // Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). 2019. [Электронный ресурс]: [https://www.researchgate.net/publication/333719195\\_Guidance\\_Use\\_Cases\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/333719195_Guidance_Use_Cases_and_Applications) (дата обращения: 30.10.2023).
33. Gassmann O., Csik M., Frankenberger K. The business model navigator: 55 Models that will revolutionise your business. Pearson Education Limited, 2014.
34. Боргест Н.М. Онтология проектирования: генезис и развитие // Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2023 (16–20 октября 2023 г.). Труды конференции / Российская ассоциация искусственного интеллекта, 2023. С. 6–13.
35. Брызгалов А.А., Тельнов Ю.Ф. Экономическая модель построения архитектуры сетевого предприятия // Статистика и экономика. 2022. Т. 19. № 6. С. 53–62. <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2022-6-53-62>
36. Osterwalder A., Pigneur Y., Tucci C. Clarifying business models: Origins, present, and future of the concept // Communications of the Association for Information Systems. 2010. Vol 16. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01601>
37. Марголин А.М., Марголина Е.В., Спицына Т.А. Экономическая оценка инвестиционных проектов. М.: Экономика, 2018.
38. Воротникова Д.В. Сравнительный анализ метода реальных опционов и традиционных методов оценки эффективности инвестиционных проектов // Вестник Алтайской академии экономики и права. 2022. № 2–1. С. 24–27. <https://doi.org/10.17513/vaael.2053>
39. Drury C. Management and cost accounting. Cengage, 2007.
40. Yang C.H., Lee K.C., Li S.E. A mixed activity-based costing and resource constraint optimal decision model for IoT-oriented intelligent building management system portfolios // Sustainable Cities and Society. 2020. Vol. 60. Article 102142. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102142>
41. Gholami H., Jiran N.S., Saman M.Z.M. [et al.] Application of activity-based costing in estimating the costs of manufacturing process // Transformations in Business and Economics. 2019. Vol. 18. No. 2. P. 839–860.

## Об авторах

### **Тельнов Юрий Филиппович**

доктор экономических наук, профессор;

заведующий кафедрой прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: [Telnov.YUF@rea.ru](mailto:Telnov.YUF@rea.ru)

ORCID: 0000-0002-2983-8232

### **Казаков Василий Александрович**

кандидат экономических наук;

доцент, кафедра прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: [Kazakov.VA@rea.ru](mailto:Kazakov.VA@rea.ru)

ORCID: 0000-0001-8939-2087

### **Брызгалов Алексей Алексеевич**

ассистент, кафедра прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: [Bryzgalov.AA@rea.ru](mailto:Bryzgalov.AA@rea.ru)

ORCID: 0000-0002-5001-4326

### **Федоров Игорь Григорьевич**

доктор экономических наук;

профессор, кафедра прикладной информатики и информационной безопасности, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36;

E-mail: [Fedorov.IG@rea.ru](mailto:Fedorov.IG@rea.ru)

ORCID: 0000-0003-2335-0452



# Methods and models for substantiating application scenarios for the digitalization of manufacturing and business processes of network enterprises

**Yury F. Telnov**

E-mail: [telnov.yuf@rea.ru](mailto:telnov.yuf@rea.ru)

**Vasiliy A. Kazakov**

E-mail: [kazakov.va@rea.ru](mailto:kazakov.va@rea.ru)

**Aleksey A. Bryzgalov**

E-mail: [bryzgalov.aa@rea.ru](mailto:bryzgalov.aa@rea.ru)

**Igor G. Fiodorov**

E-mail: [fedorov.ig@rea.ru](mailto:fedorov.ig@rea.ru)

Plekhanov Russian University of Economics

Address: 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia

## Abstract

The process of digital transformation of enterprises is associated with the organization of manufacturing and business processes within the framework of selected types of business models and digital platforms, the distribution and economic substantiation of the roles of participants in network interactions, and ensuring the semantic interoperability of their interaction. Currently, certain experience has been accumulated in the implementation of modern business models for the digital transformation of enterprises which is reflected in the concepts of the Industrie 4.0, the Industrial Internet of Things, the creation of cyber-physical production systems, smart enterprises and intelligent manufacturing. At the same time, the issues of conceptual modeling of the architecture of digital enterprises, which determines the construction of manufacturing and business processes, and its economic substantiation depending on various factors of the external environment and internal economic potential have not yet been sufficiently researched and developed. All of the foregoing determines the relevance of the work presented here. The purpose of the study was to develop ontological and economic methods for substantiating application scenarios for the digitalization of manufacturing and business processes depending on the selected types of business models and digital platforms. To solve the problem, methods of classification, ontological engineering, activity-based costing and analysis of cash flows of income and expenses are used. The article presents an analysis of enterprise digitalization scenarios depending on the types of manufacturing and business processes, the types of business models and digital platforms used. An ontological model of enterprise digital transformation has been constructed, providing a choice of application scenarios for the digitalization of manufacturing and business processes for various types of business models and digital platforms. An economic model is proposed to justify options for constructing application scenarios for the digitalization of production and business processes depending on the distribution of roles of participants in network interaction using methods of activity-based costing and cash flow analysis.



**Keywords:** network enterprise, application scenario of digitalization, type of business model, type of digital platform, manufacturing and business processes, ontological model, economic model

**Citation:** Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Bryzgalov A.A., Fiodorov I.G. (2023) Methods and models for substantiating application scenarios for the digitalization of manufacturing and business processes of network enterprises. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 73–93. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.73.93

## References

1. Veselovsky M.Ya., Khoroshavina N.S. (eds.) (2021) *Digital transformation of industrial enterprises in an innovative economy*. Moscow: Mir Nauki. Available at: <https://izd-mn.com/PDF/06MNNPM21.pdf> (accessed 30 October 2023) (in Russian).
2. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L. (2019) Developing digital twins for production enterprises. *Business Informatics*, vol. 13, no. 4, pp. 7–16. <https://doi.org/10.17323/1998-0663.2019.4.7.16>
3. Salazar L.A.C., Ryashentseva D., Lüder A., Vogel-Heuser B. (2019) Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern – comparison of selected approaches mapping four agent patterns. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 4005–4034. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03800-4>
4. Salazar L.A.C., Vogel-Heuser B. (2022) A CPPS-architecture and workflow for bringing agent-based technologies as a form of artificial intelligence into practice. *Automatisierungstechnik*, vol. 70, no. 6, pp. 580–598.
5. Technet (2019) *Digital twins in the high-tech industry*. Available at: [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12\\_december/28/cifrovoy\\_dvoynik.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/cifrovoy_dvoynik.pdf) (accessed 30 October 2023) (in Russian).
6. Minaev V.A., Mazin A.V., Zdiruk K.B., Kulikov L.S. (2019) Digital twins of objects in the solution of control problems. *Radio Industry (Russia)*, vol. 29, no. 3, pp. 68–78 (in Russian). <https://doi.org/10.21778/2413-9599-2019-29-3-68-78>
7. Abramov V.I., Boboev D.S., Gilmanov T.D., Semenov K.Yu. (2022) Theoretical and practical aspects of creating a company's digital twin. *Russian Journal of Innovation Economics*, vol. 12, no. 2, pp. 967–980 (in Russian). <https://doi.org/10.18334/vinec.12.2.114890>
8. Akopov A.S. (2012) Designing of integrated system-dynamics models for an oil company. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 45, no. 4, pp. 220–230. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2012.051122>
9. Akopov A.S. (2014) Parallel genetic algorithm with fading selection. *International Journal of Computer Applications in Technology*, vol. 49, no. 3/4, pp. 325–331. <https://doi.org/10.1504/IJCAT.2014.062368>
10. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2021) Digital plant: methods of discrete-event modeling and optimization of production characteristics. *Business Informatics*, vol. 15, no. 2, pp. 7–20. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.2.7.20>
11. Kovalenko I., Tilbury D., Barton K. (2019) The model-based product agent: A control oriented architecture for intelligent products in multi-agent manufacturing systems. *Control Engineering Practice*, vol. 86, pp. 105–117.
12. Komesker S., Motsch W., Popper J., Sidorenko S., Wagner A., Ruskowski M. (2022) Enabling a multi-agent system for resilient production flow in modular production systems. Proceedings of the 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems, *Procedia CIRP*, vol. 107, pp. 991–998.
13. Telnov Yu.F., Kazakov V.A., Danilov A.V., Denisov A.A. (2022) Requirements for the software implementation of the Industrie 4.0 system for creating network enterprises. *Software and Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 557–571 (in Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.140.557-571>
14. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2021) *Digital platforms in manufacturing industries. Result Paper*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/digital-platforms-in-manufacturing-2021.pdf> (accessed 30 October 2023).
15. Telnov Yu.F., Bryzgalov A.A., Kozyrev P.A., Koroleva D.S. (2022) Choosing the type of business model to implement the digital transformation strategy of a network enterprise. *Business Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 50–67. <https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.4.50.67>
16. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2019) *Digital business models for Industrie 4.0. Result Paper*. Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Industry/digital-business-models-industry-4-0.pdf> (accessed 30 October 2023).
17. Weking J., Stocker M., Kowalkiewicz M., Bohm M., Krcmar H. (2018) Archetypes for Industry 4.0 business model innovations. Proceedings of the 24th Americas Conference on Information Systems (AMCIS). *Association for Information Systems (AIS)* (eds. A. Bush, V. Grover, S. Schiller).
18. Telnov Yu.F., Bryzgalov A.A., Koroleva D.S. (2023) Organization of production and business processes in value chains based on applied scenarios for the digitalization of enterprises. *Open Education*, vol. 27, no. 3, pp. 43–54 (in Russian).
19. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2016) *Aspects of the research roadmap in application scenarios. Working paper*. Available at: <http://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/aspects-of-the-research-roadmap.html> (accessed 30 October 2023).

20. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (2016) *Smart service WELT. Digitale Serviceplattformen – Praxiserfahrungen aus der Industrie. Best Practices*. Available at: [https://innosabi.com/wp-content/uploads/2016/05/BerichtSmartService2016\\_DE\\_barrierefrei.pdf](https://innosabi.com/wp-content/uploads/2016/05/BerichtSmartService2016_DE_barrierefrei.pdf) (accessed 30 October 2023).
21. Lu Y., Xu X., Wang L. (2020) Smart manufacturing process and system automation – A critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 56, pp. 312–325.
22. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2016) *Proposal for a joint “scenario” of Plattform Industrie 4.0 and IIC. Discussion paper*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33286.98881>
23. Telnov Yu.F. (2005) *Reengineering of business-processes. Component-based methodology*. Moscow: Finance and Statistics (in Russian).
24. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2019) *Usage view of asset administration shell. Discussion Paper*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/2019-usage-view-asset-administration-shell.pdf> (accessed 30 October 2023).
25. Industry IoT Consortium (2022) *The industrial internet reference architecture*. Available at: <https://www.iiconsortium.org/wp-content/uploads/sites/2/2022/11/IIRA-v1.10.pdf> (accessed 30 October 2023).
26. Seitz M., Gehlhoff F., Salazar L.A.C., Fay A., Vogel-Heuser B. (2021) Automation platform independent multi-agent system for robust networks of production resources in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 32, pp. 2023–2041. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01759-2>
27. Savastano M., Amendola C., D’Ascenzo F. (2018) How digital transformation is reshaping the manufacturing industry value chain: The new digital manufacturing ecosystem applied to a case study from the food industry. *Network, Smart and Open. Lecture Notes in Information Systems and Organisation*, vol. 24, pp. 127–142. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-62636-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62636-9_9)
28. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2018) *Usage viewpoint of application scenario value-based service. Discussion Paper*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/hm-2018-usage-viewpoint.pdf> (accessed 30 October 2023).
29. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2020) *Usage view “Seamless and dynamic engineering of plants.” Discussion Paper*. Available at: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Industry/usage-view-seamless-and-dynamic-engineering-of-plants.pdf> (accessed 30 October 2023).
30. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2017) *Benefits of application scenario value-based service. Working paper*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/benefits-application-scenario.html> (accessed 30 October 2023).
31. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2017) *Exemplification of the Industrie 4.0 application scenario value-based service following IIRA structure. Working Paper*. Available at: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/exemplification-i40-value-based-service.html> (accessed 30 October 2023).
32. Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) (2019) *Guidance “Use cases and applications.”* Available at: [https://www.researchgate.net/publication/333719195\\_Guidance\\_Use\\_Cases\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/333719195_Guidance_Use_Cases_and_Applications) (accessed 30 October 2023).
33. Gassmann O., Csik M., Frankenberger K. (2014) *The business model navigator: 55 Models that will revolutionise your business*. Pearson Education Limited.
34. Borgest N.M. (2023) Design ontology: Genesis and development. Proceedings of the *Twenty-first National Conference on Artificial Intelligence with international participation KII-2023 (October 16–20, 2023)*, pp. 6–13.
35. Bryzgalov A.A., Telnov Yu.F. (2022) An economic model for creating a network enterprise architecture. *Statistics and Economics*, vol. 19, no. 6, pp. 53–62 (in Russian). <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2022-6-53-62>
36. Osterwalder A., Pigneur Y., Tucci C. (2010) Clarifying business models: Origins, present, and future of the concept. *Communications of the Association for Information Systems*, vol. 16. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01601>
37. Margolin A.M. (2018) *Economic assessment of investment projects*. Moscow: Economics (in Russian).
38. Vorotnikova D.V. (2022) Comparative analysis of the real options method and traditional methods for assessing the effectiveness of investment projects. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*, no. 2–1, pp. 24–27 (in Russian). <https://doi.org/10.17513/vaael.2053>
39. Drury C. (2007) *Management and cost accounting*. Cengage.
40. Yang C.H., Lee K.C., Li S.E. (2020) A mixed activity-based costing and resource constraint optimal decision model for IoT-oriented intelligent building management system portfolios. *Sustainable Cities and Society*, vol. 60, article 102142. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102142>
41. Gholami H., Jiran N.S., Saman M.Z.M., et al. (2019) Application of activity-based costing in estimating the costs of manufacturing process. *Transformations in Business and Economics*, vol. 18, no. 2, pp. 839–860.

### About the authors

**Yury F. Telnov**

Dr. Sci. (Econ.), Professor;

Head of the Department of Applied Informatics and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: [telnov.yuf@rea.ru](mailto:telnov.yuf@rea.ru)

ORCID: 0000-0002-2983-8232

**Vasily A. Kazakov**

Cand. Sci. (Econ.);

Associate Professor, Department of Applied Informatics and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: [kazakov.va@rea.ru](mailto:kazakov.va@rea.ru)

ORCID: 0000-0001-8939-2087

**Aleksey A. Bryzgalov**

Assistant Professor, Department of Applied Informatics and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: [bryzgalov.aa@rea.ru](mailto:bryzgalov.aa@rea.ru)

ORCID: 0000-0002-5001-4326

**Igor G. Fiodorov**

Dr. Sci. (Econ.);

Professor, Department of Applied Informatics and Information Security, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: [fedorov.ig@rea.ru](mailto:fedorov.ig@rea.ru)

ORCID: 0000-0003-2335-0452

DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.94.112

# A bibliometric review of scientific research on the significance of information technology relating to sustainable development reporting practice

**Maneesh Kumar Pandey**<sup>a</sup> 

E-mail: maneeshban@gmail.com

**Amit Kumar Pathak**<sup>b</sup> 

E-mail: Amit.Pathak@utas.edu.com

**Irina G. Sergeeva**<sup>a</sup> 

E-mail: igsergeeva@gmail.com

<sup>a</sup> ITMO University

Address: 9, Lomonosov Street, St. Petersburg 191002, Russia

<sup>b</sup> University of Technology and Applied Sciences – Muscat

Address: PO Box 74, Al-Khuwair, Muscat 133, Sultanate of Oman

## Abstract

Sustainable development, a prominent issue in the twenty-first century, is significantly influenced by the rapid global IT revolution. This study employs bibliometric analysis to explore the role of scientific research in sustainable development reporting, aligning with international standards and utilizing IT tools. It assesses countries' awareness of sustainable development reporting's importance in achieving socio-economic and environmental goals. The study examines article frequency, source countries, authors, co-authorship, citations, key term co-occurrences, and bibliometric coupling. The result concludes that active engagement among research work of academic institutions, government organizations, and industries of emerging countries on the development and role of information technology in sustainable development reporting practices can foster cost-effective ways for sustainable development reporting which may play a vital and crucial role in sustainable development reporting for middle- and low-income countries to ensure a green and sustainable future. This work can benefit middle- and low-income nations in their pursuit of a green and sustainable future. The research highlights the significance of academic institutions in enhancing

sustainable development reporting, especially for Micro, Small, and Medium-Sized Enterprises (MSMEs) in middle and low-income countries, offering valuable insights for future actions, which in turn may help these countries to put more effort into this domain through their academic establishments.

**Keywords:** information technology (IT), sustainable development reporting (SDR), Scopus database, VOS viewer, bibliometric analysis

**Citation:** Pandey M.K., Pathak A.K., Sergeeva I.G. (2023) A bibliometric review of scientific research on the significance of information technology relating to sustainable development reporting practice. *Business Informatics*, vol. 17, no. 4, pp. 94–112. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.94.112

## Introduction

In the era of the 21st century, environmental preservation and sustainable development are no longer just topics of expert discussion or current fashion. The environmental, social and governance (ESG) sustainable development specifications are rapidly evolving, driven by increasing demands from investors, regulators, and other stakeholders. The need for high-quality disclosures and better use of data and key performance indicators (KPIs) is expected to be critical for a company's future. The imperative to build resiliency and sustainability has never been stronger; from the global push to reduce carbon emissions, the real impact of climate change on our lives, to the availability of funds to enable companies to meet their obligations and the technological advances that now support the ability to meet their ESG goals.

According to the UN's [1], sustainable development is one that "satisfies the demands of our time without jeopardizing the chances of coming generations from getting their resource requirements in future." Since then, the discussion of sustainable development and corporate behavior has gained momentum, with demands for innovative performance techniques, environmentally friendly company models and integrated reporting systems [2–4]. The Sustainable Development Goals (SDGs) advocated by the United Nations (UN), which establish the world's goals and aspirations for 2030, are encouraged by responsible corporate behavior, according to the 2030 Agenda.

Corporations play a crucial part in this process and may hold the key to success or the reason why this challenge fails [5]. Therefore, sustainability reporting has gotten a lot of attention from corporate management and national leadership during the last couple of years and numerous theoretical and empirical studies have been focusing on the sustainability reporting area. Companies are moving to go beyond financial performance in order to drive business because of the shifting global environ-

ment. Company executives are becoming more aware of the need to incorporate environmental and social issues into their overall company strategy. Hence, the SDGs are being included into organisations' thinking and reporting using integrated sustainability reporting, which has been described as a promising strategy for disclosing the business journey towards SDG achievement [6]. Therefore, large, multinational corporations and international organizations now routinely report on sustainability. Leading standards in the industry, such as the Global Reporting Initiative (GRI), Science-Based Targets Initiative for Net Zero or TCFD for disclosures, have made companies report progress towards goals with underlying information harvested from various data points across their value chain.

After extensive debate over the nature, constraints and challenges of integrating reporting, it has come to be widely acknowledged as one of the most important management and accounting developments across the corporate sector and other organizations, and it is getting wide acceptance across the globe [7, 8]. The International Integrated Reporting Council (IIRC) introduced integrated reporting in 2011 with the goal of providing a succinct and comprehensive report on how an organization's strategy, governance, performance, and prospects contribute to the creation of sustainable value over the short, medium, and long term.

For the purpose of creating non-financial reports, the Global Reporting Initiative (GRI) Guidelines and the Institute of Social and Ethical Accountability Standard (Accountability 1000, AA1000) have both been formed. Several organizations and businesses are using the widely accepted and implemented Guidelines for Sustainability Reporting standard established by the Global Reporting Initiative for presenting non-financial reports. However, in many low- and middle-income nations in Asia, Africa, and Latin America, there are a handful of firms

or organizations that generate social and environmental reports. These non-financial reports increasingly need to be prepared by even medium- and small-sized firms due to the increased demand for them by national governments and other international bodies for monitoring sustainable development growth of respective countries and the world. Nevertheless, challenges persist in sustainable reporting, such as varying standards, limited resources, required skills, technology for interpreting diverse sustainability metrics and a lack of management support. Furthermore, disclosing environmental efforts might impact an organization's market image, causing some with weak environmental performance to avoid reporting. The ESG framework, with multiple organizations offering guidance and evaluation, lacks a unified structure due to the absence of mandatory standards. Instead, various organizations provide voluntary standards encompassing both quantitative and qualitative disclosures. International guidelines offer overarching frameworks, focusing on areas and governance processes for consideration. Rating agencies use data from self-disclosed and third-party ESG information to calculate ratings, contributing to an organization's score. According to [9], sustainability reporting is a sophisticated information system that reflects the costs associated with the enterprise's and organization's sponsorship and charitable programs, as well as the costs associated regarding environmental and ecological conservation measures that affect the enterprise's and organization's shareholders, clients and regulators. According to [10, 11], in order to allow stakeholders to objectively evaluate the enterprise's or organization's performance during the reporting period, the details provided in the report must be comprehensive to show the impact of their activities on the economy, environment and society. Using information technology to automate accounting operations is the most efficient approach for supplying financial and non-financial data. Information technology is defined as the method utilized to store, process, transmit, secure and display information with the goal of enhancing activity efficiency. It is important to consider the fact that the data is provided by the company's accounting department when setting up an automated sustainability reporting system. As a result, they choose which primary sources will be used to create the reports. According to [9], social activity accounting is a series of activities with the goal of producing a report using data from primary accounting. Automation of accounting operations using information technology is the most efficient method of supplying accounting data [12]. It is crucial that a structured process to govern internal and external communications, including regulatory and mandatory communi-

cations (e.g., SEC filings, CRA reports, 10-K forms) is in place to enable automated sustainability reporting system. As a result, they select the primary sources that will be combined to create the reports [13]. AI finds widespread use in sustainability, especially in operational aspects and diversity, equity, and inclusion (DEI) efforts. Additionally, AI assists biodiversity start-ups in safeguarding and restoring forests.

The primary aim of this research is to look into scholarly work done within the academic realm around the role of information technology in sustainable development reporting and understanding the trajectory of development. This investigation also delves into the extent of this trend in middle- and lower-income countries. Given that the subject of "information technology's impact on sustainable development reporting" is still relatively new, this study seeks to explore and analyze key inquiries outlined in *Table 1* of the methodology section. This study has employed the Scopus Database as the primary resource for gathering information. The database was utilized to collect data encompassing research articles, conference proceedings, reviews, book chapters and books related to the keywords "information technology" and "sustainable development reporting." The data collected spanned the years from 1989 to 2023. Additionally, a bibliometric investigation was conducted, encompassing both descriptive and network visualization analyses, using the data extracted from the Scopus database.

## 1. Literature review

As sustainability is being embedded into corporate strategy, ESG reporting is no longer a voluntary activity; it is becoming a strategic opportunity to transform their value chain to create competitive advantage.

The implications of this decision extend well beyond publishing an annual report or complying with mandatory regulatory requirements, such as the SEC's forthcoming climate disclosure rule or the European Union's Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD). Companies can use this technology to gain insights into their supply chains, to spot methods for reducing a product's carbon footprint or to track progress on net zero targets. Over time, these efforts can potentially have a positive impact on financial performance. One important step toward sustainability reporting in the EU is the Non-Financial Reporting Directive (2014/95/EU) [14] passed in 2014 and applied for the first time in 2017. In 2021, approximately 11,700 large European public-interest companies were required to publish a sustainability report, formally labelled a "non-financial statement"



[14]. However, a majority of lower-middle income and lower income countries either do not have a similar kind of regulatory framework or if they have something like this, it is poorly implemented and practiced.

Regulatory bodies are recommending new climate-related disclosures that will steer major transformations and conformity for uplifting the standard of disclosures that registrants make about climate-related risks, their climate-related targets and goals, their greenhouse gas (GHG) emissions and how the board of directors and management handle climate-related risks. The proposal would also require registrants to quantify the effects of certain climate-related events and transition activities in their audited financial statements. They are having major implications for businesses. There has been an increased rigor for process and controls related to GHG measurement and reporting: to include risk assessment that looks into future impacts on strategy and outlook. Enhanced transparency about how the business plans to achieve climate-related goals and details about the specific governance model to drive towards those goals are increasingly being embedded in the corporate vision. The auditing requirement of the financial statements has been expanded to include climate-related impact on Third-party assurance of Scope 1 and Scope 2 emissions required.

Generally, there has been a lack of research on sustainability reporting and this can be attributed to difficulty in parsing unstructured data and the lack of standards for the disclosure. In 2021, the International Sustainability Standards Board (ISSB) was established to create a global baseline of sustainability-related disclosure standards. Along with that, regulatory authorities in countries are also introducing mandatory ESG requirements for certain types of companies. One of the explicit objectives of the ISSB is “to facilitate the addition of requirements that are jurisdiction-specific or aimed at a broader group of stakeholders” [15]. Despite making headway, ESG reporting remains a challenging subject. While mandatory disclosure might seem beneficial from an investor’s point of view, there are costs associated with that. The key costs are the preparedness cost to gather the essential data, the proprietary cost of disclosing private information and the costs associated with litigation. On the other hand, voluntary disclosure gives firms the option to be selective with the information that is revealed, often painting an incomplete picture. ESG data providers play an important role for the time being but face the same challenges.

There is a wide range of governance structures and ESG owners vary from one company to another. They can include the general counsel office, chief sustainabil-

ity officer, investor relations, communications, etc. The data that goes into ESG reports comes from systems that are not SOX controlled, and this data is often disorganized. To meet reporting requirements, the quality of the information will need to be increasingly higher, where the entire value chain is involved to find data, process data, compile data, and control data, even if they are not subject matter experts in ESG.

Given rapid regulatory changes, many companies are digitizing their sustainability data to better understand the current state across ESG metrics, risks and develop a robust reporting framework. It is critical to understand metrics reported today and anticipated future reporting needs (e.g., Scope 1,2,3 emissions, energy usage, water usage, waste, living wages, lost time incident rate, human rights violations, etc.) to define in-scope communication channels (e.g., ESG report, proxy and annual report, publicly disclosed investor presentation, etc.). It helps them understand expected insights to enable management to monitor the metric by validating data sources and collection processes (e.g., external vendor, internal, or a mix) for assessing performance. This approach ensures remediation planning and a roadmap for ESG processes while controlling deficiencies and enhancements based on industry leading practices. Companies that look holistically at their external disclosures and align them to their corporate strategy, data and communications will achieve a competitive advantage. Hence, it is quite clear that due to evolution in the regulatory framework imposed by international agencies and countries, it has been imperative for both corporations and organizations, as well as technology providers to combine, connect and link financial and non-financial view metrics into one holistic reporting. While going through different reports published by the concerned parties, it can be observed that many multinational companies operating in developed markets and technology consulting companies are working on sustainability reporting in a systemic manner as opposed to what is observed in a majority of local companies of middle income, lower middle income and low-income countries.

In the academic domain, research work on the role of information technology in sustainable development reporting is rather descriptive. Less than 300 serious pieces of literature have been indexed in the SCOPUS database from 1989 to 2023. However, since the last decade, research work in this domain has been showing a good increment, as companies all around the world are adopting sustainability reporting obligations as part of their operations to address stakeholder demands. Researchers and authors such as [16–22], underscored the role of corpo-

rate sustainable development reporting in companies and published their work concerned with this domain. It is similar in the area of socially and environmentally sustainable development reporting which encompasses the non-financial reporting practice for both corporate and government organizations. A few researchers and academicians such as [23–26], focused on this area and published serious literature. There are many other articles which have been published in the last decade, however, as per the urgency of the curbing climatic degradation for improving the condition of the economy, society and the environment, it is imperative to boost and strengthen research in information technology for developing viable and cost-effective tools for sustainable development monitoring and reporting for companies, academic institutions and government bodies in the low and emerging economies. The present day challenge is to understand how to go from commitment to action and master the complexity of your sustainable transformation. Various business sustainability programs at leading institutions are helping organizations at every step of the way, from “Risk Identification & Assessment,” to “Policies, Framework, & Governance,” “Risk Reporting,” “Data & Technology Strategy and Planning of Execution and Management of Sustainable Reporting”. In a variety of company areas, look for prospects for sustainable business models. Discover best practices from renowned, international sustainability firms. Utilize the most up-to-date resources, frameworks, and technologies to place sustainability at the core of your company. With the assistance of instructors, coaches, and peers, create your individual sustainable transformation strategy.

## 2. Methodology

The Analytical Framework in the Methodology part serves as an analysis manual, making it easier for students to comprehend the entire research process. Each step that must be taken for this investigation is described in this section. This research aims to conduct descriptive and bibliometric analysis in the area of research work on the development and the role of information technology on sustainable development reporting. The research questions are listed in *Table 1* alongside the justifications and analysis methods. In order to give scholars a better understanding of the development in connected subjects, the descriptive analysis gives general information on the annual production, annual citations, and performance of countries, journals, authors and keywords. Apart from descriptive analysis, Bibliometric analysis has also been employed. This is a quantitative method

for assessing the bibliographic data in articles and journals. The method is frequently employed to look-into the references to scientific papers that are cited in a journal, to map the journal’s scientific field and to categorize research articles by research area. It uses a scientific computer-assisted review process to examine all the publications on a particular subject or area in order to find key authors or pieces of research, as well as their connections [27]. Bibliometric analysis is applicable to various research domains across multiple subject matter by deploying various search approaches and data analysis algorithms. The bibliometric analysis’s findings are then provided, including the co-author, co-word and bibliographic coupling analyses, as well as general patterns in publication.

The bibliometric analysis method can alternatively be described as one that follows suggestions [28]. The procedure is used purposefully and adheres to predetermined stages, making it possible for other researchers to replicate it. Bibliographic analysis focuses on quantitative methods to analyse books, journal articles and other written materials. It is frequently used across a wide range of fields [29]. The bibliometric approach includes the application of quantitative techniques on bibliometric data and gathers the bibliometric and intellectual structure of a topic by examining the relationships between several research components [30]. With the use of such data, it is possible to highlight the contributions of a particular field of study, spot links and information silos, as well as trends and prospective gaps [31].

Below is a thorough explanation of each subsection of bibliometric analysis:

1. **Publication analysis.** Estimating the authors’ contributions in related disciplines using the complete counting methodology, which correlates full recognition for related contributions [32].
2. **Citation analysis.** Determines an article’s popularity by counting how often it is mentioned [33].
3. **Co-authorship analysis.** Analyzes the frequency of joint publications to track national cooperation efforts [34].
4. **Co-word / co-occurrence analysis.** Discover research hotspots via the degrees of keywords co-occurrence [35].
5. **Bibliographic coupling.** Find the bibliographic connections between two publications [36].

In this study, a procedure was established for choosing the search words, database to use, selection criteria for the search, software to use for analysis and results analysis. *Figure 1* below illustrates these steps, and the following paragraphs go into greater depth about them.

Table 1.

Overview of the research development in this study

Descriptive / Bibliometric analysis			Research methodology
No.	Research question(s)	Research objective(s) and aims	
1	What is the publication trend of literature on the role of IT on SDR?	To understand how the development and role of IT in the area of SDR study has evolved over the years. This objective is essential to assist researchers in visualizing the potential of IT in the evaluation of SDR.	Descriptive analysis (publication analysis; citation analysis).
2	Which countries contributed to the development and the role of IT on SDR?	To identify the countries that contributed the most and received the most citations for their work. To promote international research collaboration, it is essential to achieve this goal.	Descriptive analysis (publication analysis; citation analysis).
3	Which journals led in the field of the development and the role of IT on SDR research?	To identify the journals that published the most articles on the relationship between IT and SDR. This goal is crucial in assisting researchers in selecting platforms for releasing and communicating their findings.	Descriptive analysis (publication analysis; citation analysis).
4	Which are the influential authors on the development and the role of IT on SDR research?	Find out which papers in the linked field are the most read. This goal is important since it might help researchers identify the research gaps in the associated papers.	Descriptive analysis (citation analysis).
5	How is the countries' collaboration structure in the area of the development and the role of IT on SDR research?	To assess the countries' collaboration trend in the development and role of IT in the area of SDR. This objective aims to help researchers decide which country is suitable for collaborating in publishing in this research area.	Co-authorship analysis.
6	What is the conceptual structure of keywords in the area of the development and the role of IT on SDR research?	To identify the research hotspots that evolved in the field. This objective helps researchers to understand the new research topics.	Conceptual structure analysis (co-occurrence analysis of words).
7	What is the countries' coupling structure in the area of the development and the role of IT on SDR research?	Presenting information on commonalities between two countries. This goal helps to assess the degree to which these countries' ideas and literary works are alike.	Intellectual structure analysis (bibliographic coupling).
8	Which are the research fronts of the development and the role of IT on SDR research study?	To identify papers in the field that have a similar theme. This goal gives scholars a sense of the topics covered in the papers, which helps them when they are creating new research projects.	Intellectual structure analysis (bibliographic coupling).

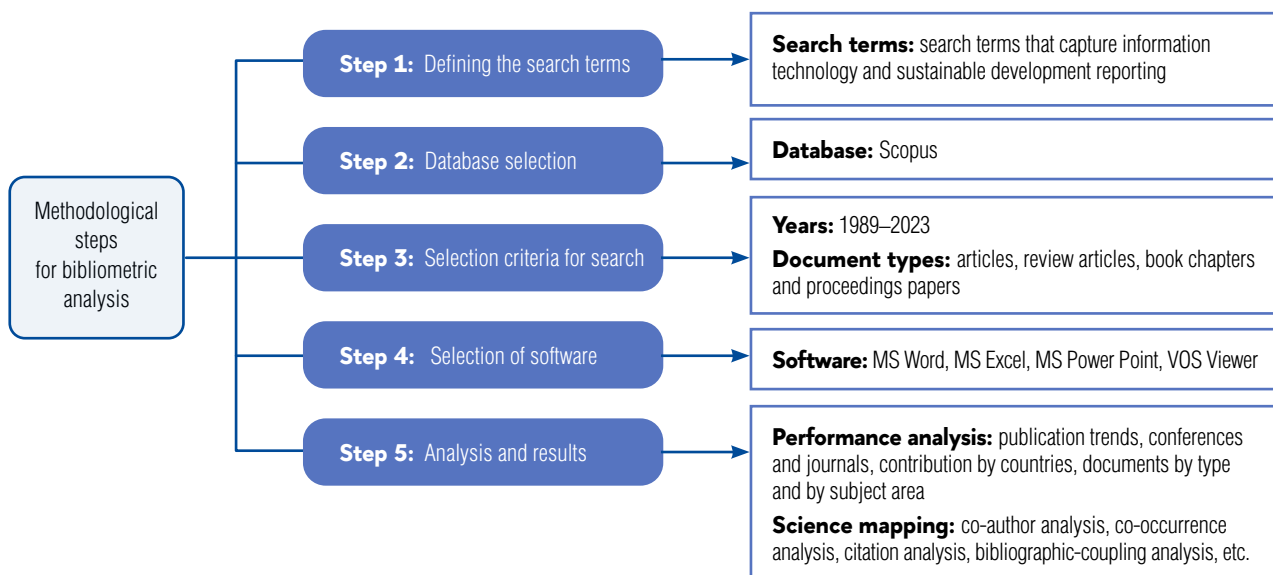


Fig. 1. Methodological scheme for the bibliometric analysis.

**Definition of search terms.** The purpose of the current article, as stated in the introduction, is to (I) identify and analyze the nature and evolution of literature related to information technology and cohesion with sustainable development reporting, and (II) provide a comprehensive systematic review on the development of the research work related to information technology and cohesion with sustainable development reporting and their connection to specific disciplines.

**Selection of database and data collection strategy.** The subsequent keywords were searched under the criteria of Title, Keywords and Abstract of the publications by using the search strings connected to information technology and sustainable development reporting: TITLE-ABS-KEY (“information technology”) and TITLE-ABS-KEY (“sustainable development reporting”) to collect articles’ data in an electronic database. The search process was conducted based on the above-mentioned keywords. Since the Scopus database is one of the largest and most widely accepted scientific databases and has an extensive number of literary materials including peer reviewed articles, conference proceedings, reviews, book chapters, books, etc., it became the primary choice for the current course of investigation. Searching for “information technology” and “sustainable development reporting” in the Scopus database showed up total of 259 documents. Since only popular types of documents were included in this study such as articles from journals, review articles, conferences proceedings, book chapters, and conference reviews, subsequent filtering of the search results was needed. After filtering out short surveys (one document), Note (one document), and Erratum (one document), only 256 documents were retrieved. The first document related to the chosen search string appeared in 1989 and was included in the Scopus database. Hence, the time frame criterion from year 1989 to 2023 was selected for the data collection. While using the Scopus database, the aforementioned measures were followed, and bibliographic data was exported in CSV format without further data cleansing.

**Software selection and data analysis.** This article’s preparation involved the use of numerous Microsoft Office programs. Nevertheless, the management and analysis of the collected data was primarily supported by the using two software programs, namely Microsoft Excel 2020, a popular spreadsheet, and VOS Viewer, a freeware data-visualization program. The search information was examined and categorized based on the annual number of publications, publication journals, contributing authors and productive nations. The next step was visualizing the data on “information technology” and “sustainable

development reporting” in terms of documents by year, documents by country, documents per year by source, documents by authors, co-authorship-related countries, co-occurrence-related author keywords, and bibliographic coupling in terms of country and publication.

### 3. Results

The bibliometric analysis utilizes a tremendous amount of studies to identify popular trends in the development and role of information technology in the domain of sustainable development reporting. Therefore, this section emphasizes the results generated via bibliometric analytic tools.

#### 3.1. Descriptive analysis

In order to analyze current trends in the research of the development and role of information technology on sustainable development reporting, this subsection offers a thorough overview of publication trends and citation performance on this study, followed by the most productive nations and the most important journals and articles. The number of papers on “information technology” and “sustainable development reporting” that were published in Scopus was the first finding based on data extracted from the Scopus database. The total number of documents retrieved was 256.

##### 3.1.1. Documents per year

The following figure (*Fig. 2*) shows the number of documents published annually. The first document related with “information technology” and “sustainable development reporting” was published in 1989. From year 1990 to 2000, the average number of articles published annually was less than five. However, from 2001 to 2010, there was a growth in published research work and this can be observed with one deflection that occurred in 2010. From 2011 onwards, the number of published documents has increased by three times as compare to 2010. However, some downturn can be seen in year 2014, 2015 and 2016.

##### 3.1.2. Document by country

As per the following *Table 2*, there are variations in research output and impact among different countries, with factors such as the number of publications, total citations, and average citation indicating the prominence of their research in the given field. It is quite clear that developed countries such as the USA, UK, Canada, Australia lead in both the number of publications and

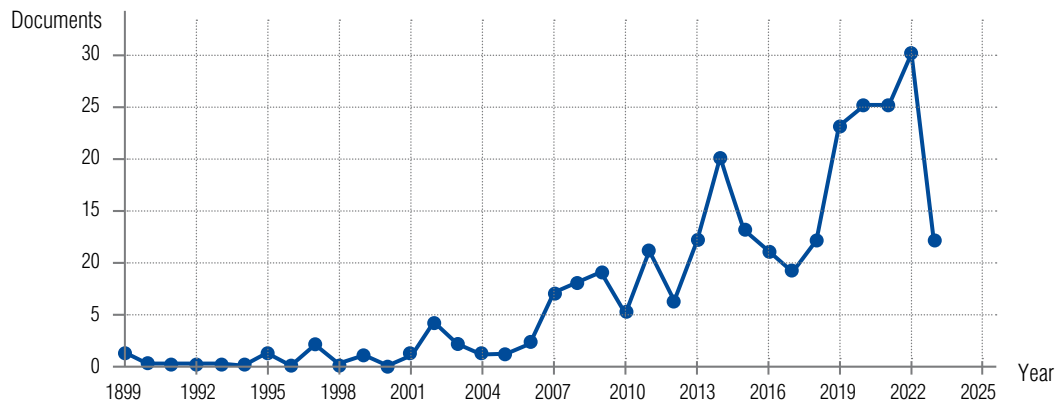


Fig. 2. Documents published annually.

total citations, indicating a strong research output and impact in the field. The high average citation rate suggests that their research is frequently cited by others. On the other hand, despite a lower number of publications, China, amongst the developing countries, has a high total citation count and an exceptionally high average citation, suggesting a significant impact of their research.

Table 2.

**The top 10 most productive countries**

No.	Country	TP	TC	AC
1	United States of America	39	2461	63.1
2	United Kingdom	31	1889	60.9
3	Canada	20	1574	78.7
4	Australia	20	572	28.6
5	Germany	17	429	25.2
6	India	17	165	9.7
7	Russia	14	50	3.5
8	Italy	13	193	14.8
9	China	12	1696	141.3
10	Spain	12	96	8

Note:

TP indicates the complete publication of articles according to countries; TC is the total citation, while AC is the ratio of total citation per total publication.

**3.1.3. Documents per year by source**

Table 3 and Fig. 3 shows the top ten peer-reviewed journals with the most publications in the field of information technology and sustainable development reporting. This analysis indicates variations in publication and citation statistics, average citation and scientific journal rankings among these sources. The SJR values give an idea of how these sources are ranked in terms of their scientific impact within their respective fields.

The journal with the most such publication numbers is Sustainability from Switzerland. This source has a moderate number of publications and citations, along with a reasonable average citation. The SJR indicates a moderate journal ranking. This journal Sustainability was published by MDPI AG, then followed by Environmental Science and Engineering Subseries Environmental science and Journal of cleaner production, then followed by Technological forecasting and social change.

Table 3.

**The top 10 most influential journals based on number of publications**

No.	Source	TP	TC	AC	SJR
1	Sustainability (Switzerland) MDPI AG	12	190	15.8	0.664
2	Journal of Cleaner Production	5	355	71	1.981
3	Environmental Science and Engineering (Subseries: Environmental Science)	5	34	6.8	0.125
4	Lecture Notes in Networks and Systems	3	0	0	0.151
5	Technological Forecasting and Social Change	2	18	9	2.644
6	Science of the Total Environment	2	39	19.5	1.946
7	Frontiers In Public Health	2	23	11.5	1.125
8	Sage Open	2	41	20.5	0.462
9	Procedia Engineering	2	22	11	0.185
10	Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis	2	59	29.5	0.169

Note:

TP indicates the complete publication of articles according to countries, TC is the total citation, while AC is the ratio of total citation per total publication, SJR is Scientific Journal Rankings



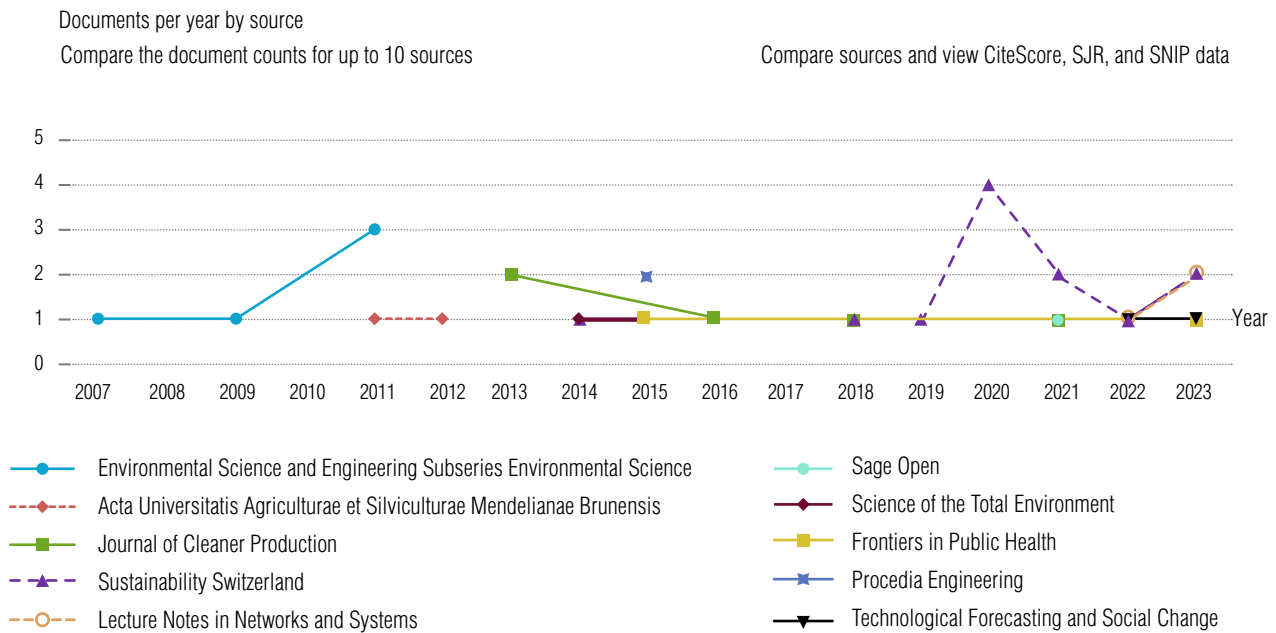


Fig. 3. The top 10 most influential journals based on number of publications.

### 3.1.4. Documents by authors

Table 4, indicates the top ten contributing authors with published articles in peer-reviewed journals in information technology and sustainable development reporting fields. The top four authors produced three articles each, whereas the bottom six authors produced two articles on this field individually. However, it can be seen that these authors have worked together on the same articles; therefore, the number of articles or proceedings are not increasing significantly.

## 3.2. Network visualization

Network visualization reflects the co-authorship of countries, co-words, and bibliographic coupling. Network analysis provides researchers with a better graphical visualization on collaboration, co-occurrences, and bibliographic coupling, where the relations between selected items is illustrated using nodes size, nodes color, and the thicknesses of connecting lines [37].

### 3.2.1. The co-authorship network of documents

Table 5 and Fig. 4 display the co-authorship map in the “information technology” and “sustainable development reporting” articles. There were 91 countries according to VOS viewer. However, when a filter

was applied to sources having at least one document per country with a minimum of one citation, then 72 documents met the threshold. The USA, along with the UK, Canada and Australia have a high publication count and a substantial number of links, indicating strong research collaboration with a significant link strength. On the other end, Russia has a lower publication count and zero links and link strength, with no collaboration in this dataset. The other countries in the scope, showed a moderate publication count and link strength, suggesting active research participations. Overall, the analysis indicates variations in publication count, research collaboration through links, and link strength among different countries. Countries with higher publication counts and stronger link strengths are likely more active in research collaboration within the dataset. The absence of links and link strength for Russia suggests limited representation in this specific dataset’s collaborative network. The network visualization result also shows a number of nodes and clusters. The distance between the nodes and the link thickness reveals the degree of cooperation between countries, while the links between the nodes represent the relationships between the countries, for example, a red cluster showing strong connection among Canada, China, Indonesia, etc. Similarly, a green cluster shows strong connection among Greece, Turkey, Romania, etc.



Table 4.

The top 10 most influential authors

No.	Author	Article Name / Conference Proceedings; Year; Total Citation
1		“Sustainable online reporting model – A web-based sustainability reporting software”; 2011; 1 “Concept and implementation of a flexible and differentiated shopping cart functionality for creating personalized sustainability reports”; 2008; 3 “Conception of system supported generation of sustainability reports in a large-scale enterprise”; 2007;1
2	Süpke, D.	“ProPlaNET – Collaborative sustainable project planning – A comparison with existing approaches”; 2011; 0 “Sustainable online reporting model – A web-based sustainability reporting software”; 2011; 1 “Concept and implementation of a flexible and differentiated shopping cart functionality for creating personalized sustainability reports”; 2008; 3
3	Trenz, O.	“Corporate performance indicators for agriculture and food processing sector”; 2012; 20 “Corporate performance evaluation and reporting”; 2011; 3 “Integration of economic, environmental, social and corporate governance performance and reporting in enterprises”; 2011; 39
4	Štencl, M.	“Corporate performance indicators for agriculture and food processing sector”; 2012; 20 “Corporate performance evaluation and reporting”; 2011; 3 “Integration of economic, environmental, social and corporate governance performance and reporting in enterprises”; 2011; 39
5	Arsenault, A.	“Integrated modelling software platform development for effective use of ecosystem models”; 2015; 3 “Integrated modelling software platform development for effective use of ecosystem models”; 2014; 8
6	Bhatti, J.	“Integrated modelling software platform development for effective use of ecosystem models”; 2015; 3 “Integrated modelling software platform development for effective use of ecosystem models”; 2014; 8
7	Braun, P.	“Intelligent mortality reporting with FHIR”; 2018; 8 “Intelligent mortality reporting with FHIR”; 2017; 5
8	Chokkavarapu, N.	“Role of drone technology in sustainable rural development: Opportunities and challenges”; 2023; 0 “Role of drone technology in sustainable rural development: Opportunities and challenges”; 2022; 0
9	Glebkova, I.Y.	“Technology application of the concept of market-oriented reporting in accounting and statistics”; 2019; 0 “Technology for determining the effectiveness of representative offices of the companies abroad”; 2019; 1
10	Hartcher, M.G.	“A governance framework for data audit trail creation in large multi-disciplinary projects”; 2013; 1 “Driving data management cultural change via automated provenance management systems”; 2013; 1

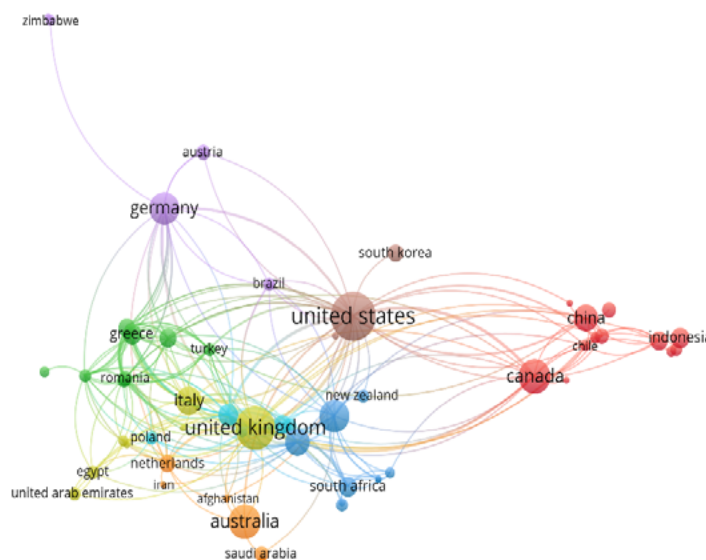


Fig. 4. The co-authorship network of articles on “information technology” and “sustainable development reporting” in terms of countries.

Table 5.

**The top 10 most influential countries  
in terms of co-authorship network  
of articles on “information technology”  
and “sustainable development reporting”**

No.	Country	TP	Link	TLS
1	United States of America	39	34	52
2	United Kingdom	31	35	55
3	Canada	20	16	21
4	Australia	20	6	7
5	Germany	17	20	25
6	India	17	19	24
7	Russia	14	0	0
8	Italy	13	23	33
9	China	12	11	13
10	Spain	12	22	28

Note:

TP indicates the complete publication of articles according to countries, TLS indicates Total Link Strength

### 3.2.2. The co-occurrence network of keywords in documents

Keywords co-occurrence analysis is a popular platform used in bibliometric analysis, since it helps reveal the core research topic. To do so, a VOS viewer was employed and the analysis result displayed the keyword distribution map in the “information technology” and “sustainable development reporting” articles based on the author keywords. Once 852 keywords were filtered using a minimum appearance criterion of three times, the output returned 35 keywords. Keywords that are unconnected to each other were not included in the analysis. Table 6 highlights the top 10 authors’ keywords arranged according to the occurrence and total link strength. “Sustainable development” recorded the highest occurrence (18) and total link strength (19), followed by “sustainability” (17) and (11). After that, “sustainability reporting” appeared (14) times with total link strength of (24), followed by “information technology” (11) and (6), and finally keyword “reporting” with (9) appearances and having (14) total link strength. These keywords also ranked as the top five most popular authors’ keywords as seen in the descriptive analysis. Overall, the analysis reveals variations in the occurrence of keywords, their linkages and link strength. Some terms have stronger linkages and connections, while others occurred on account of their

stronger mutual associations within the dataset. The significance of these observations depends on the context in which the keywords are being analyzed.

Table 6.

**The co-occurrence network  
of keywords in articles  
on “information technology”  
and “sustainable development reporting”**

No.	Keywords	Occurrence	Link	TLS
1	Sustainable development	18	11	19
2	Sustainability	17	10	11
3	Sustainability reporting	14	10	24
4	Information technology	11	5	6
5	Reporting	9	10	14
6	GIS	5	1	1
7	GRI	4	7	19
8	Digitalization	4	5	7
9	Information systems	4	5	5
10	Climate change	4	3	3

Note:

TLS indicates Total Link Strength

Concurrently, the co-occurrence of authors’ keywords can be visualized via network mapping, as shown in Fig. 5. The size and color of nodes play different roles in the co-occurrence analysis, where the sizes reflect the frequency of the authors’ keywords on the role of information technology in sustainable development reporting. It can be seen in Fig. 5, that keyword “sustainable development”; belongs to biggest node followed by “sustainability,” “sustainability reporting,” “information technology,” “reporting,” etc. A link connecting two terms shows that they appeared together, and the thickness of the link shows how frequently they occurred together. Additionally, the distance between nodes indicates the degree of their interaction between keywords.

### 3.2.3. Bibliographic coupling

According to [38], bibliographic coupling was initially used by [39] to identify the connections between two articles. Bibliographic coupling plays a prominent role in determining the relatedness of selected items such as countries and publications. In this work, the bibliographic coupling of geographic regions and publications was carried out.

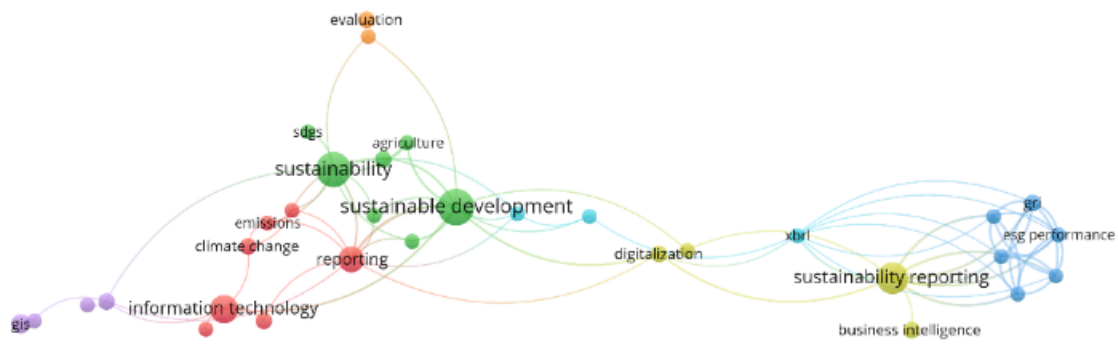


Fig. 5. The co-occurrence network of keywords in articles on "information technology" and "sustainable development reporting".

### 3.2.3.1. Bibliographic coupling of countries

Bibliographic coupling of countries occurs when an article from two countries cites another document in its reference list [40]. Bibliographic coupling illustrates the frequency with which these countries have common references in their bibliographies, enabling us to gauge the resemblance between these publications. The graphical representation of bibliographic coupling can be displayed using different combinations of colors and sizes of nodes. The colors signify the quantity of clusters identified in this analysis, while the size of nodes depict the contributions of each country – larger nodes denote more noteworthy contributions from the respective country. The investigation of bibliographic coupling was the most recent meta-analysis. 47 of the 91 countries met the requirement of having at least two documents and one citation per country.

Similar to the results in *Table 2*, the coupling analysis showed that the United States of America, United Kingdom, Canada, Australia and Germany are the

top five countries in studies involving the research on the development and role of information technology on sustainable development reporting. The bibliographic coupling of countries involved seven clusters with distinct colors as seen in *Fig. 6*. The Italy leads the densest cluster (red cluster) and is closely coupled with Switzerland, France, Greece, Slovenia, etc. United Kingdom leads the second-dense cluster (blue cluster) and is strongly coupled with India, Spain, Russia and South Africa. The United States of America (purple cluster), China (yellow cluster) and Canada (green cluster) also act as the leading countries in terms of cluster size. However, if in terms of overall analysis of coupling networks, it can be inferred that United States of America, United Kingdom, and Canada play the vital role in the research on the development and role of information technology in the sustainable development reporting, as many countries are coupled with these countries. However, despite a lower number of publications, China, too, is seen emerging as an active country in this area of research.

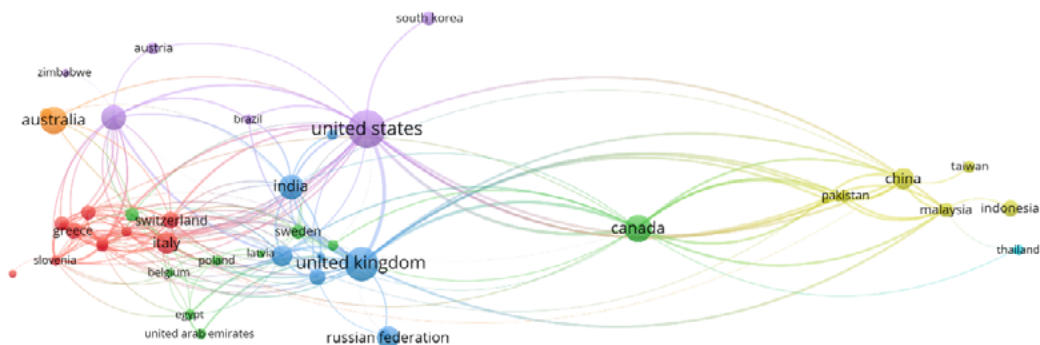


Fig. 6. The bibliographic coupling network of countries on "information technology" and "sustainable development reporting".

### 3.2.3.2. Articles

Bibliographic coupling occurs when two publications share a common reference article. This implies that articles with similar research focuses can be identified by examining the bibliographic coupling of their respective publications. The exploration of bibliographic coupling was carried out in the most recent meta-analysis. Out of 256 documents, 153 fulfilled the criterion of having at least two citations per document. In this analysis, the relationship between the information technology and developments in areas of sustainable development reporting is represented by colors and node sizes. The node colors indicate that clusters existed on this topic, while node sizes represent the total citations gained by a paper. As per the Fig. 7, the role of information technology in sustainable development reporting publications were grouped into two clusters by red and green node colors. The red cluster comprises five publications and a total of 76 citations, with an average of 15 citations per article whereas the green cluster has 4 publications and a total of 72 citations, with an average of 18 citations per article. The most cited publication in this (red) cluster focuses on “Internet-supported sustainability reporting: Developments in Germany” [40] (51 citations), followed by “Corporate sustainability reporting and disclosure on the web: An exploratory study” [20] (7 citations). The most cited publication in the green cluster focuses on the “Integration of economic, environmental, social and corporate governance performance and reporting in enterprises” [19] (39 citations), followed by “Corporate performance indicators for agriculture and food processing sector” [41] (20 citations).

Although the publications covered diverse topics, these clusters generally have comparable research areas. Therefore, it can be said that the “Development and role of information technology in sustainable development reporting” publications are ideal for use in sustainable socio-economic and environmental development.

### 4. Discussion

The above findings offer a detailed analysis of bibliographic traits in globally recognized Scopus-indexed journals. These articles center around “information technology” and “sustainable development reporting,” alongside related fields such as “machine learning” and “sustainable development reporting” and “big data” and “sustainable development reporting.” These areas have attained significant and at times unprecedented traction, especially in the private sector, though academic exploration is rather limited, which is evident by scarce articles and conference presentations. The journals and conferences selected underscore the global scientific community’s limited interest in these subjects and this trend can be seen in the descriptive and network visualization results obtained in the current course of research work. Co-authorship relationships analysis scope involved researchers from 90+ countries, with intense collaborations. However, the major collaborators belong to developed countries such as the United States of America, the United Kingdom, Australia, Canada, Germany, etc. Keyword co-occurrence patterns reveal associations, pivotal in guiding new research trends. Recent research topics are shown to emphasize “sustainable development,” followed by “sustainability,” “information technology” and “reporting” for future work. This signifies a close relationship between role of IT in sustainable development and the growing importance of transparent ESG reporting addressing interests of investors and regulators. Despite the number of publications, there is no direct correlation between them and citations. Notably, Sustainability (Switzerland), The Journal of Cleaner Production, and Environmental Science hold citation prominence. A few authors have been found to show high co-citation frequency, indicating widespread sources of information. However, limitations exist – this study focuses on specific units and high-level ESG terms, which might have potentially excluded other relevant articles.



Fig. 7. The bibliographic coupling network of publications on “information technology” and “sustainable development reporting”.

Future studies could diversify units, incorporate specific keywords and expand searches across broader databases for a wider research scope.

### Conclusion

The study's statistical findings reveal a notable increase in the number of articles focused on sustainability reporting published in Scopus-indexed journals, especially in the last decade. The research emphasizes growing opportunities for collaboration among authors from different countries. Additionally, the study points out the abundance of easily accessible sources related to Environmental, Social, and Governance (ESG) reporting, indicating a potential for future research. As climate change impact become more tangible globally, all topics impacting sustainability will become crucial for both corporations and society. The analysis indicates that research on the role of information technology in sustainable development reporting is concentrated in countries with higher income levels, while middle and lower-middle-income countries

have contributed less. The study underscores the need for comprehensive ESG reporting that creates a coherent narrative for various stakeholders. Future research frameworks should focus on sustainability goals, standardizing reporting content according to guidelines, and exploring links between ESG practices and United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). To achieve a sustainable future, active IT consulting firms, companies, organizations, and governments must provide expertise and affordable solutions for sustainable development reporting. Encouraging middle and lower-middle-income countries to adopt such approaches can contribute to sustainable development. Increased research in this field can enhance the understanding and impact of sustainable business practices, influencing positive environmental, social, and governance outcomes, and creating long-term stakeholder value. This assistance will facilitate the participation of these countries, encouraging them to invest in technological infrastructure and non-financial accounting frameworks for effective and standardized sustainable development reporting practices. ■

### References

1. Brundtland G. (1987) *Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future*. United Nations General Assembly document A/42/427.
2. Boons F., Lüdeke-Freund F. (2013) Business models for sustainable innovation: State-of-the-art and steps towards a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, vol. 45, pp. 9–19.
3. Bocken N., Short S., Rana P., Evans S. (2014) A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production*, vol. 65, pp. 42–56.
4. Sachs J.D. (2012) From millennium development goals to sustainable development goals. *Lancet*, vol. 379, pp. 2206–2211.
5. Agarwal N., Gneiting U., Mhlanga R. (2017) *Raising the bar: Rethinking the role of business in the sustainable development goals*. Oxford: Oxfam, 2017.
6. Busco C., Frigo M.L., Quattrone P., Riccaboni A. (2013) *Towards integrated reporting: Concepts, elements and principles*. London: Springer, 2013.
7. Dumay J., Bernardi C., Guthrie J., DeMartini P. (2016) Integrated reporting: A structured literature review. *Accounting Forum*, vol. 40(3), pp. 166–185. <https://doi.org/10.1016/j.accfor.2016.06.001>
8. Simnett R., Huggins A. (2015) Integrated reporting and assurance: Where can research add value? *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, vol. 6(1), pp. 29–53. <https://doi.org/10.1108/SAMPJ-09-2014-0053>
9. Fakhretidinova E.N., Klychova G.S., Klychova A.S., Antonova N.V. (2015) Development of accounting and financial reporting for small and medium-sized businesses in accordance with international financial reporting standards. *Asian Social Science*, vol. 11(11), pp. 318–322.
10. González M., del Mar Alonso-Almeida M., Avila C., Dominguez D. (2015) Modeling sustainability report scoring sequences using an attractor network. *Neurocomputing*, vol. 168, pp. 1181–1187.
11. Alonso-Almeida M., Llach J., Marimon F. (2014) A closer look at the 'Global Reporting Initiative' sustainability reporting as a tool to implement environmental and social policies: A worldwide sector analysis. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, vol. 21(6), pp. 318–335.
12. Klychova G.S., Ziganshin B.G., Zakirova A.R., Valieva G.R., Klychova A.S. (2017) Benchmarking as an efficient tool of social audit development. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, pp. 4958–4965.
13. Klychova G.S., Zakirova A.R., Zakirov Z.R., Iskhakov A.T. (2014) Development of primary accounting of crop farming products arrival. *Bulletin of Kazan State Agrarian University*, vol. 34(4), pp. 23–28.
14. IFRS Foundation (2021) *IFRS Foundation announces International Sustainability Standards Board, consolidation with CDSB and VRF, and publication of prototype disclosure requirements*. Available at: <https://www.ifrs.org/news-and-events/news/2021/11/ifrs-foundation-announces-issb-consolidation-with-cdsb-vrf-publication-of-prototypes/> (accessed 1 November 2023).



15. European Commission (2021) *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2013/34/EU, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Regulation (EU) No 537/2014, as regards corporate sustainability reporting*. COM/2021/189 final, 2021/0104(COD), Brussels, 21.4.2021. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0189> (accessed 1 November 2023).
16. Chvatalová Z., Kocmanová A., Dočekalová M. (2011) Corporate sustainability reporting and measuring corporate performance. *Environmental Software Systems. Frameworks of eEnvironment. ISESS 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology* (eds. J. Hřebíček, G. Schimak, R. Denzer), vol. 359, pp. 245–254. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22285-6\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22285-6_27)
17. Medel F., García L., Enriquez S., Anido M. (2011) Reporting models for corporate sustainability in SMEs. *Information Technologies in Environmental Engineering. Environmental Science and Engineering* (eds. P. Golinska, M. Fertsch, J. Marx-Gómez), vol. 3. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19536-5\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19536-5_32)
18. Hřebíček J., Štencel M., Trenz O., Soukopová J. (2011) Corporate performance evaluation and reporting. Proceedings of the 11th WSEAS international conference on Applied informatics and communications, and Proceedings of the 4th WSEAS International conference on Biomedical electronics and biomedical informatics, and Proceedings of the International conference on Computational engineering in systems applications, pp. 338–343.
19. Hřebíček J., Soukopová J., Štencel M., Trenz O. (2011) Integration of economic, environmental, social and corporate governance performance and reporting in enterprises. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, vol. 59(7), pp. 157–166.
20. Raghupathi V., Raghupathi W. (2019) Corporate sustainability reporting and disclosure on the web: An exploratory study. *Information Resources Management Journal*, vol. 32(1), pp. 1–27.
21. Skouloudis A., Malesios C., Dimitrakopoulos P.G. (2019) Corporate biodiversity accounting and reporting in mega-diverse countries: An examination of indicators disclosed in sustainability reports. *Ecological Indicators*, vol. 98, pp. 888–901. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.060>
22. Bruant R., Bennett K., Fox S., Willard S., Michel A. (2021) ESG reporting in the oil and gas industry – A permian basin water management perspective. Proceedings of the 9th Unconventional Resources Technology Conference. URTEC: 5325. <https://doi.org/10.15530/urtec-2021-5325>
23. Erin O.A., Bamigboye O.A., Oyewo B. (2022) Sustainable development goals (SDG) reporting: An analysis of disclosure. *Journal of Accounting in Emerging Economies*, vol. 12(5), pp. 761–789. <https://doi.org/10.1108/JAEE-02-2020-0037>
24. Mulyani S., Kasim E., Sudrajat (2017) Financial reporting quality and public accountability in regional government: Analysis for the impact of competence, internal control and information technology, Indonesia evidence. Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2017, Madrid, Spain.
25. Ibatova A.Z., Sitdikov F.F., Klychova G.S. (2018) Reporting in the area of sustainable development with information technology application. *Management Science Letters*, vol. 8(7), pp. 785–794.
26. van Dijk A., Mount R., Gibbons P., Vardon M., Canadell P. (2014) Environmental reporting and accounting in Australia: Progress, prospects and research priorities. *Science of The Total Environment*, vols. 473–474, pp. 338–349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.053>
27. de Bellis N. (2009) *Bibliometrics and citation analysis: From the science citation index to cybermetrics*. Scarecrow Press.
28. Block J.H., Fisch C. (2020) Eight tips and questions for your bibliographic study in business and management research. *Management Review Quarterly*, vol. 70, pp. 307–312.
29. Garza-Reyes J.A. (2015) Lean and green—a systematic review of the state-of-the art literature. *Journal of Cleaner Production*, vol. 102, pp. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.064>
30. Heersmink R., van den Hoven J., van Eck N.J., van den Berg J. (2011) Bibliometric mapping of computer and information ethics. *Ethics and Information Technology*, vol. 13(3), pp. 241–249. <https://doi.org/10.1007/s10676-011-9273-7>
31. Donthu N., Kumar S., Mukherjee D., Pandey N., Lim W.M. (2021) How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, vol. 133, pp. 285–296.
32. Waltman L., van Eck N.J. (2015) Field-normalized citation impact indicators and the choice of an appropriate counting method. *Journal of Informetrics*, vol. 9, pp. 872–894.
33. Ding Y., Cronin B. (2011) Popular and/or prestigious? Measures of scholarly esteem. *Information Processing & Management*, vol. 47, pp. 80–96.
34. Caviggioli F., Ughetto E. (2019) A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society. *International Journal of Production Economics*, vol. 208, pp. 254–268.
35. Bui T.D., Ali M.H., Tsai F.M., Iranmanesh M., Tseng M.L., Lim M.K. (2020) Challenges and trends in sustainable corporate finance: A bibliometric systematic review. *Journal of Risk and Financial Management*, vol. 13, 264.
36. Abdullah S., Naved Khan M. (2021) Determining mobile payment adoption: A systematic literature search and bibliometric analysis. *Cogent Business & Management*, vol. 8, 1893245.
37. Zhang G., Kang L., Gu D., Wang X., Yang X., Zhu K., Liang G. (2019) Visualizing knowledge evolution and hotspots of rural environment and health: A systematic review and research direction. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 72538–72550.
38. Freire R.R., Veríssimo J.M.C. (2020) Mapping co-creation and co-destruction in tourism: A bibliographic coupling analysis. *Anatolia*, vol. 32(2), pp. 207–217.



39. Kessler M.M. (1963) Bibliographic coupling between scientific papers. *American Documentation*, vol. 14, pp. 10–25.
40. Gu Z., Meng F., Farrukh M. (2021) Mapping the research on knowledge transfer: A Scientometrics approach. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 34647–34659.
41. Herzig C., Godemann J. (2010) Internet-supported sustainability reporting: developments in Germany. *Management Research Review*, vol. 33(11), pp. 1064–1082. <https://doi.org/10.1108/01409171011085903>
42. Hřebíček J., Popelka O., Štencel M., Trenz O. (2012) Corporate performance indicators for agriculture and food processing sector. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, vol. 60(4), pp. 121–132. <https://doi.org/10.11118/actaun201260040121>

### About the authors

#### Maneesh Kumar Pandey

Doctoral Student, Faculty of Technological Management and Innovations, ITMO University, 9, Lomonosov str., St. Petersburg 191002, Russia;

E-mail: maneeshban@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7789-4247

#### Amit Kumar Pathak

Ph.D.;

Assistant Professor, University of Technology and Applied Sciences – Muscat, PO Box 74, Al-Khuwair, Muscat 133, Sultanate of Oman;

E-mail: Amit.Pathak@utas.edu.com

ORCID: 0000-0003-4777-5180

#### Irina G. Sergeeva

Dr. Sci. (Econ.);

Professor, Faculty of Technological Management and Innovations, ITMO University, 9, Lomonosov str., St. Petersburg 191002, Russia;

E-mail: igsergeeva@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7314-7765

# Библиометрический обзор научных исследований роли информационных технологий в формировании отчетности в области устойчивого развития

#### Панди М.К. <sup>a</sup>

E-mail: maneeshban@gmail.com

#### Патак А.К. <sup>b</sup>

E-mail: Amit.Pathak@utas.edu.com

#### Сергеева И.Г. <sup>a</sup>

E-mail: igsergeeva@gmail.com

<sup>a</sup> Университет ИТМО

Адрес: Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9

<sup>b</sup> Университет технологий и прикладных наук – Маскат

Адрес: Султанат Оман, Маскат 133, п/я 74

## Аннотация

Стремительная глобальная революция в области информационных технологий оказывает значительное влияние на устойчивое развитие, являющееся важной проблемой XXI века. В данном исследовании библиометрический анализ используется для изучения роли научных исследований отчетности в области устойчивого развития в соответствии с международными стандартами, а также использования информационно-технологических инструментов. В работе оценивается осведомленность стран о важности отчетности в области устойчивого развития для достижения социально-экономических и экологических целей. Также рассматривается частота появления статей, страны-источники, авторы, соавторство, цитаты, совпадение ключевых терминов и библиометрические взаимосвязи. В результате сделан вывод о том, что активное вовлечение в исследовательскую работу академических институтов, правительственных организаций и отраслей промышленности развивающихся стран по вопросам развития и роли информационных технологий в практике отчетности в области устойчивого развития может способствовать разработке экономически эффективных способов отчетности, которые могут сыграть жизненно важную роль в такой отчетности для стран со средним и низким уровнем доходов, для обеспечения их «зеленого» и устойчивого развития. Результаты работы могут быть полезными для стран со средним и низким уровнем доходов, стремящихся к «зеленому» и устойчивому будущему. Исследование подчеркивает важность академических институтов в улучшении отчетности в области устойчивого развития, особенно для микро-, малых и средних предприятий (ММСП) в странах со средним и низким уровнем доходов, предлагая ценную информацию для будущих действий, которая, в свою очередь, может помочь этим странам приложить больше усилий в данной области с привлечением своих академических учреждений.

**Ключевые слова:** информационные технологии, отчетность в области устойчивого развития, база данных Scopus, VOS viewer, библиометрический анализ

**Цитирование:** Pandey M.K., Pathak A.K., Sergeeva I.G. A bibliometric review of scientific research on the significance of information technology relating to sustainable development reporting practice // *Business Informatics*. 2023. Vol. 17. No. 4. P. 94–112. DOI: 10.17323/2587-814X.2023.4.94.112

## Литература

1. Brundtland G. Report of the World Commission on Environment and Development: Our common future // United Nations General Assembly document A/42/427. 1987.
2. Boons F., Lüdeke-Freund F. Business models for sustainable innovation: State-of-the-art and steps towards a research agenda // *Journal of Cleaner Production*. 2013. Vol. 45. P. 9–19.
3. Bocken N., Short S., Rana P., Evans S. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes // *Journal of Cleaner Production*. 2014. Vol. 65. P. 42–56.
4. Sachs J.D. From millennium development goals to sustainable development goals // *Lancet*. 2012. Vol. 379. P. 2206–2211.
5. Agarwal N., Gneiting U., Mhlanga R. Raising the bar: Rethinking the role of business in the sustainable development goals. Oxford: Oxfam, 2017.
6. Busco C., Frigo M.L., Quattrone P., Riccaboni A. Towards integrated reporting: Concepts, elements and principles. London: Springer, 2013.
7. Dumay J., Bernardi C., Guthrie J., DeMartini P. Integrated reporting: A structured literature review // *Accounting Forum*. 2016. Vol. 40(3). P. 166–185. <https://doi.org/10.1016/j.accfor.2016.06.001>
8. Simnett R., Huggins A. Integrated reporting and assurance: Where can research add value? // *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*. 2015. Vol. 6(1). P. 29–53. <https://doi.org/10.1108/SAMPJ-09-2014-0053>

9. Fakhretdinova E.N., Klychova G.S., Klychova A.S., Antonova N.V. Development of accounting and financial reporting for small and medium-sized businesses in accordance with international financial reporting standards // *Asian Social Science*. 2015. Vol. 11(11). P. 318–322.
10. González M., del Mar Alonso-Almeida M., Avila C., Dominguez D. Modeling sustainability report scoring sequences using an attractor network // *Neurocomputing*. 2015. Vol. 168. P. 1181–1187.
11. Alonso-Almeida M., Llach J., Marimon F. A closer look at the 'Global Reporting Initiative' sustainability reporting as a tool to implement environmental and social policies: A worldwide sector analysis // *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2014. Vol. 21(6). P. 318–335.
12. Klychova G.S., Ziganshin B.G., Zakirova A.R., Valieva G.R., Klychova A.S. Benchmarking as an efficient tool of social audit development // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. Vol. 12. P. 4958–4965.
13. Klychova G.S., Zakirova A.R., Zakirov Z.R., Iskhakov A.T. Development of primary accounting of crop farming products arrival // *Bulletin of Kazan State Agrarian University*. 2014. Vol. 34(4). P. 23–28.
14. IFRS Foundation announces International Sustainability Standards Board, consolidation with CDSB and VRF, and publication of prototype disclosure requirements / IFRS Foundation. 2021. [Электронный ресурс]: <https://www.ifrs.org/news-and-events/news/2021/11/ifrs-foundation-announces-issb-consolidation-with-cdsb-vrf-publication-of-prototypes/> (дата обращения 01.11. 2023).
15. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2013/34/EU, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Regulation (EU) No 537/2014, as regards corporate sustainability reporting / European Commission. COM/2021/189 final, 2021/0104(COD), Brussels, 21.4.2021. [Электронный ресурс]: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0189> (дата обращения 01.11. 2023).
16. Chvatalová Z., Kocmanová A., Dočekalová M. Corporate sustainability reporting and measuring corporate performance // *Environmental Software Systems. Frameworks of eEnvironment. ISESS 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology* (eds. J. Hřebíček, G. Schimak, R. Denzer). 2011. Vol. 359. P. 245–254. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-22285-6\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-642-22285-6_27)
17. Medel F., García L., Enriquez S., Anido M. Reporting models for corporate sustainability in SMEs // *Information Technologies in Environmental Engineering. Environmental Science and Engineering* (eds. P. Golinska, M. Fertsch, J. Marx-Gómez). 2011. Vol. 3. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-19536-5\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-642-19536-5_32)
18. Hřebíček J., Štencl M., Trenz O., Soukopová J. Corporate performance evaluation and reporting // *Proceedings of the 11th WSEAS international conference on Applied informatics and communications, and Proceedings of the 4th WSEAS International conference on Biomedical electronics and biomedical informatics, and Proceedings of the International conference on Computational engineering in systems applications*. 2011. P. 338–343.
19. Hřebíček J., Soukopová J., Štencl M., Trenz O. Integration of economic, environmental, social and corporate governance performance and reporting in enterprises // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2011. Vol. 59(7). P. 157–166.
20. Raghupathi V., Raghupathi W. Corporate sustainability reporting and disclosure on the web: An exploratory study // *Information Resources Management Journal*. 2019. Vol. 32(1). P. 1–27.
21. Skouloudis A., Malesios C., Dimitrakopoulos P.G. Corporate biodiversity accounting and reporting in mega-diverse countries: An examination of indicators disclosed in sustainability reports // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 98. P. 888–901. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.060>
22. Bruant R., Bennett K., Fox S., Willard S., Michel A. ESG reporting in the oil and gas industry – A Permian basin water management perspective // *Proceedings of the 9th Unconventional Resources Technology Conference*. 2021. URTeC: 5325. <https://doi.org/10.15530/urtec-2021-5325>
23. Erin O.A., Bamigboye O.A., Oyewo B. Sustainable development goals (SDG) reporting: An analysis of disclosure // *Journal of Accounting in Emerging Economies*. 2022. Vol. 12(5). P. 761–789. <https://doi.org/10.1108/JAEE-02-2020-0037>
24. Mulyani S., Kasim E., Sudrajat. Financial reporting quality and public accountability in regional government: Analysis for the impact of competence, internal control and information technology, Indonesia evidence // *Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference, IBIMA 2017, Madrid, Spain*. 2017.
25. Ibatova A.Z., Sitdikov F.F., Klychova G.S. Reporting in the area of sustainable development with information technology application // *Management Science Letters*. 2018. Vol. 8(7). P. 785–794.
26. van Dijk A., Mount R., Gibbons P., Vardon M., Canadell P. Environmental reporting and accounting in Australia: Progress, prospects and research priorities // *Science of The Total Environment*. 2014. Vols. 473–474. P. 338–349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.12.053>
27. de Bellis N. *Bibliometrics and citation analysis: From the science citation index to cybermetrics*. Scarecrow Press, 2009.
28. Block J.H., Fisch C. Eight tips and questions for your bibliographic study in business and management research // *Management Review Quarterly*. 2020. Vol. 70. P. 307–312.
29. Garza-Reyes J.A. Lean and green—a systematic review of the state-of-the art literature // *Journal of Cleaner Production*. 2015. Vol. 102. P. 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.064>
30. Heersmink R., van den Hoven J., van Eck N. J., van den Berg J. Bibliometric mapping of computer and information ethics // *Ethics and Information Technology*. 2011. Vol. 13(3). P. 241–249. <https://doi.org/10.1007/s10676-011-9273-7>
31. Donthu N., Kumar S., Mukherjee D., Pandey N., Lim W.M. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines // *Journal of Business Research*. 2021. Vol. 133. P. 285–296.

32. Waltman L., van Eck N.J. Field-normalized citation impact indicators and the choice of an appropriate counting method // *Journal of Informetrics*. 2015. Vol. 9. P. 872–894.
33. Ding Y., Cronin B. Popular and/or prestigious? Measures of scholarly esteem // *Information Processing & Management*. 2011. Vol. 47. P. 80–96.
34. Caviggioli F., Ughetto E. A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society // *International Journal of Production Economics*. 2019. Vol. 208. P. 254–268.
35. Bui T.D., Ali M.H., Tsai F.M., Iranmanesh M., Tseng M.L., Lim M.K. Challenges and trends in sustainable corporate finance: A bibliometric systematic review // *Journal of Risk and Financial Management*. 2020. Vol. 13. P. 264.
36. Abdullah S., Naved Khan M. Determining mobile payment adoption: A systematic literature search and bibliometric analysis // *Cogent Business & Management*. 2021. Vol. 8. P. 1893245.
37. Zhang G., Kang L., Gu D., Wang X., Yang X., Zhu K., Liang G. Visualizing knowledge evolution and hotspots of rural environment and health: A systematic review and research direction // *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 72538–72550.
38. Freire R.R., Verissimo J.M.C. Mapping co-creation and co-destruction in tourism: A bibliographic coupling analysis // *Anatolia*. 2020. Vol. 32(2). P. 207–217.
39. Kessler M.M. Bibliographic coupling between scientific papers // *American Documentation*. 1963. Vol. 14. P. 10–25.
40. Gu Z., Meng F., Farrukh M. Mapping the research on knowledge transfer: A Scientometrics approach // *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 34647–34659.
41. Herzig C., Godemann J. Internet-supported sustainability reporting: developments in Germany // *Management Research Review*. 2010. Vol. 33(11). P. 1064–1082. <https://doi.org/10.1108/01409171011085903>
42. Hřebíček J., Popelka O., Štencel M., Trenz O. Corporate performance indicators for agriculture and food processing sector // *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2012. Vol. 60(4). P. 121–132. <https://doi.org/10.11118/actaun201260040121>

### Об авторах

#### **Панди Маниш Кумар**

аспирант, факультет технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО, Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9;

E-mail: maneeshban@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7789-4247

#### **Патак Амит Кумар**

Ph.D.;

доцент, Университет технологий и прикладных наук – Маскат, Султанат Оман, Маскат 133, п/я 74;

E-mail: Amit.Pathak@utas.edu.com

ORCID: 0000-0003-4777-5180

#### **Сергеева Ирина Григорьевна**

доктор экономических наук, профессор;

профессор, факультет технологического менеджмента и инноваций, Университет ИТМО, Россия, 191002, г. Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, д. 9;

E-mail: igsergeeva@gmail.com

ORCID: 0000-0001-7314-7765