

БИЗНЕС- ИНФОРМАТИКА

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ НИУ ВШЭ

СОДЕРЖАНИЕ

А.В. Демидовский, Э.А. Бабкин

Интегрированные нейросимволические
системы поддержки принятия решений:
проблемы и перспективы.....7

Д.А. Петрова, П.В. Трунин

Анализ влияния пресс-релизов ЦБ РФ
на показатели денежного рынка.....24

В.Н. Кузьмин, А.Б. Менисов

Методический подход к выявлению угрозы
извлечения конфиденциальных данных
из автоматизированных систем управления
на базе интернет-технологий.....35

А.Ю. Влдова, Е.Д. Шек

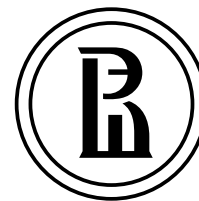
Подготовка данных для машинного анализа
ключевых показателей эффективности
территориальных менеджеров48

Р.С. Рогулин

Математическая модель формирования
ценовой политики и плана производственно-
транспортной системы лесопромышленного
предприятия60

M. Shoja, F.H. Lotfi, A.G. Abri, A.R. Komijan

Efficiency of Green Supply Chain in the presence
of non-discretionary and undesirable factors,
using Data Envelopment Analysis78



Издатель:

Национальный
исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Подписной индекс
Объединенного каталога
«Пресса России» – Е79128

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.А. Кучерявый

Заместитель главного редактора
Е.П. Зараменских

Компьютерная верстка
О.А. Богданович

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

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 – 150 экз.,
англоязычная версия – 150 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»

«**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.

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.

В соответствии с решением президиума Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации 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. 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) по следующим научным специальностям и соответствующим отраслям науки: 05.13.10 — Управление в социальных и экономических системах (технические науки); 05.13.11 — Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (технические науки); 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки); 05.25.05 — Информационные системы и процессы (технические науки); 08.00.05 — Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки); 08.00.13 — Математические и инструментальные методы экономики (экономические науки).

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор), свидетельство ПИ № ФС77-66609 от 08 августа 2016 г.

Международный стандартный серийный номер (ISSN): 1998-0663 (на русском), 2587-814X (на английском).

Главный редактор: Кучерявый Евгений Андреевич.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Кучерявый Евгений Андреевич
Университет Тампере, Тампере, Финляндия

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Зараменских Евгений Петрович
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

Абдульраб Абиб
Национальный институт прикладных наук, Руан, Франция

Авдошин Сергей Михайлович
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

Акопов Андриак Сумбатович
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

Алескерев 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

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

Баландин Сергей Игоревич
Ассоциация FRUCT, Хельсинки, Финляндия

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

Белов Владимир Викторович
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Рязань, Россия

Вестнер Маркус
Регенбургский университет прикладных наук,
Регенбург, Германия

Гаврилова Татьяна Альбертовна
Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

Глотен Эрве
Тулонский университет, Ла-Гард, Франция

Голосов Алексей Олегович
Компания «ФОРС — Центр разработки», Москва, Россия

Грибов Андрей Юрьевич
Компания «КиберПлат», Москва, Россия

Громов Александр Игоревич
Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», Москва, Россия

Гурвич Владимир Александрович
Раттерский университет (Университет Нью-Джерси),
Раттерс, США

Демидова Лилия Анатольевна
Рязанский государственный радиотехнический университет,
Рязань, Россия

Джейкобс Лоренц
Университет Цюриха, Цюрих, Швейцария

Дискин Иосиф Евгеньевич
Всероссийский центр изучения общественного мнения,
Москва, Россия

Ефимушкин Владимир Александрович
Центральный научно-исследовательский институт связи,
Москва, Россия

Зандкуль Курт
Университет Росток, Росток, Германия

Иванников Александр Дмитриевич
Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН,
Москва, Россия

Ильин Николай Иванович
Федеральная служба охраны Российской Федерации, 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 Нагоя, 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

Моттль Вадим Вячеславович
Тульский государственный университет, Тула, 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 Йохим
Университет Пассау, Пассау, Германия

Самуйлов Константин Евгеньевич
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Сюняев Али Рашидович
Технологический институт Карлсруэ, Карлсруэ, Германия

Таратухин Виктор Владимирович
Университет Мюнстера, Мюнстер, Германия

Триболе Жозе
Университет Лиссабона, Лиссабон, Португалия

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

Ускенбаева Раиса Кабиевна
Международный университет информационных технологий,
Алматы, Казахстан

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

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

Шмидт Юрий Давыдович
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

Штраус Кристина
Университет Вены, Вена, Австрия

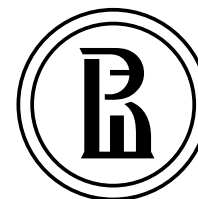
ISSN 1998-0663 (print), ISSN 2587-8166 (online)

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

Vol. 15 No 3 – 2021

BUSINESS INFORMATICS

HSE SCIENTIFIC JOURNAL



Publisher:

National Research University
Higher School of Economics

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:

Y. Koucheryavy

Deputy Editor-in-Chief

E. Zaramenskikh

Computer Making-up:

O. Bogdanovich

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

Circulation:

English version – 150 copies,
Russian version – 150 copies,
online versions in English and Russian –
open access

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

© National Research University
Higher School of Economics

CONTENTS

A.V. Demidovskij, E.A. Babkin

Integrated neurosymbolic decision support
systems: problems and opportunities7

D.A. Petrova, P.V. Trunin

Analysis of the impact of central bank
communications on money market indicators24

V.N. Kuzmin, A.B. Menisov

An approach to identifying threats of extracting
confidential data from automated control systems
based on internet technologies35

A.Yu. Vladova, E.D. Shek

Data preprocessing for machine analysis of sales
representatives' key performance indicators48

R.S. Rogulin

A mathematical model for the formation
of the pricing policy and the plan
of the production and transport system
in a timber-processing enterprise.....60

M. Shoja, F.H. Lotfi, A.G. Abri, A.R. Komijan

Efficiency of Green Supply Chain in the presence
of non-discretionary and undesirable factors,
using Data Envelopment Analysis78

ABOUT THE JOURNAL

Business Informatics is a peer reviewed interdisciplinary academic journal published since 2007 by National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow, Russian Federation. The journal is administered by HSE Graduate School of Business. The journal is published quarterly.

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 areas of, but not limited to: 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 Web of Science Emerging Sources Citation Index (WoS ESCI), Russian Science Citation Index on the Web of Science platform (RSCI), EBSCO.

International Standard Serial Number (ISSN): 2587-814X (in English), 1998-0663 (in Russian).

Editor-in-Chief: Dr. Yevgeni A. Koucheryavy.

EDITORIAL BOARD

EDITOR-IN-CHIEF

Yevgeni A. Koucheryav
Tampere University, Finland

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Evgeny P. Zaramenskikh
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

EDITORIAL BOARD

Habib Abdulrab
National Institute of Applied Sciences, Rouen, France

Sergey M. Avdoshin
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Andranik S. Akopov
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Fuad T. Aleskerov
National Research University Higher School of Economics,
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

Eduard A. Babkin
National Research University Higher School of Economics,
Nizhny Novgorod, Russia

Sergey I. Balandin
Finnish-Russian University Cooperation in Telecommunications
(FRUCT), Helsinki, Finland

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

Vladimir V. Belov
Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

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

Vladimir A. Efimushkin
Central Research Institute of Communications, Moscow, Russia

Tatiana A. Gavrilova
Saint-Petersburg University, St. Petersburg, Russia

Hervé Glotin
University of Toulon, La Garde, France

Alexey O. Golosov
FORS Development Center, Moscow, Russia

Andrey Yu. Gribov
CyberPlat Company, Moscow, Russia

Alexander I. Gromoff
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Vladimir A. Gurvich
Rutgers, The State University of New Jersey, Rutgers, USA

Laurence Jacobs
University of Zurich, Zurich, Switzerland

Liliya A. Demidova
Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russia

Iosif E. Diskin
Russian Public Opinion Research Center, Moscow, Russia

Nikolay I. Ilyin
Federal Security Guard of the Russian Federation,
Moscow, Russia

Dmitry V. Isaev
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Alexander D. Ivannikov
Institute for Design Problems in Microelectronics, Russian Academy
of Sciences, Moscow, Russia

Valery A. Kalyagin
National Research University Higher School of Economics,
Nizhny Novgorod, Russia

Tatiana K. Kravchenko
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Sergei O. Kuznetsov
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Kwei-Jay Lin
Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan

Mikhail I. Lugachev
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Svetlana V. Maltseva
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

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

Boris G. Mirkin
National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia

Vadim V. Mottl
Tula State University, Tula, 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

Yuriy D. Shmidt
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Christine Strauss
University of Vienna, Vienna, Austria

Ali R. Sunyaev
Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany

Victor V. Taratukhin
University of Munster, Munster, Germany

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

Raissa K. Uskenbayeva
International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

Markus Westner
Regensburg University of Applied Sciences, Regensburg, Germany

Интегрированные нейросимволические системы поддержки принятия решений: проблемы и перспективы

А.В. Демидовский 

E-mail: ademidovskij@hse.ru

Э.А. Бабкин 

E-mail: eababkin@hse.ru

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Адрес: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/20

Аннотация

В работе рассматривается актуальный вопрос развития новых видов систем поддержки принятия решений для различных категорий управленческого персонала. Существенной характеристикой таких систем является их распределенная структура, которая позволяет строить информационные системы нового поколения в виде многоагентных систем, систем интернета вещей или туманной вычислительной архитектуры. В таких условиях структурным элементам и алгоритмам коммуникации, используемым в параллельных моделях динамики искусственных нейронных сетей, могут быть поставлены в прямое соответствие определенные элементы вычислительных инфраструктур (например, нейроны – агенты). Модели динамики искусственных нейронных сетей обладают огромным потенциалом при решении самых разных задач. Поэтому в рамках данной работы ставится задача критического анализа проблемы интеграции искусственных нейронных сетей и систем поддержки принятия решений на основе актуальной научной литературы. Для решения этой задачи была выбрана методология исследований Design Science Research Methodology (DSRM), которая определяет основные требования к стратегии систематического сбора и анализа актуальной научной литературы, а также к формам получаемых результатов. В соответствии с этой методологией была определена стратегия поиска литературы, проведен сбор и анализ научных публикаций, выделены критерии сравнения различных решений. По итогам анализа были определены наиболее значимые результаты, открытые проблемы и перспективные направления фундаментальных и прикладных исследований. Была выявлена устойчивая тенденция к построению систем поддержки принятия решений на основе интегрированных нейросетевых подходов, что является практически возможным и экономически целесообразным, поскольку позволяет получать распределенные и обучаемые системы поддержки принятия решений, устойчивые во времени и умеющие адаптироваться к изменчивому корпоративному ИТ-ландшафту.

Ключевые слова: лингвистическое принятие решений; многокритериальный выбор; системы поддержки принятия решений; нейросимволические системы; искусственный интеллект.

Цитирование: Демидовский А.В., Бабкин Э.А. Интегрированные нейросимволические системы поддержки принятия решений: проблемы и перспективы // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 3. С. 7–23.

DOI: [10.17323/2587-814X.2021.3.7.23](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.7.23)

Введение

Радикально новые условия обработки информации, планирования и стратегического управления в цифровых организациях, основанные на принципах самоорганизации, приводят к необходимости реализации таких гибких организационных форм, как виртуальные организации [1], гибкие организации [2] и распределенные организации [3]. В подобных организациях существенно ускоряется скорость производственных процессов и частота изменений самих процессов. Поэтому на этапе массовой цифровизации повышается актуальность развития новых видов систем поддержки принятия решений (СППР), предназначенных для различных категорий управленческого персонала. При этом существенной характеристикой новых видов СППР становится распределенная структура таких систем. Это обусловлено несколькими причинами.

Одной из таких существенных причин является активное развитие различных массивно-параллельных и распределенных вычислительных технологий и коммуникационных решений в контексте корпоративного ИТ-ландшафта. Это приводит к практической возможности и экономической целесообразности построения новых поколений информационных систем на принципах многоагентных систем (МАС), сетей интернета вещей и так называемой «туманной» вычислительной архитектуры [4]. Перечисленные типы распределенных вычислительных инфраструктур могут содержать миллионы автономных элементов, взаимодействующих друг с другом децентрализованным образом в условиях динамически и программно определяемой сетевой коммуникации.

В таких условиях структурным элементам и алгоритмам коммуникации, используемым в параллельных моделях динамики искусственных нейронных сетей (ИНС), могут быть поставлены в прямое соответствие определенные элементы вычислительных инфраструктур (например, нейроны – агенты) [5–12]. Действительно, различные исследователи [13–16] сходятся в том, что отдельное устройство (в сетях интернета вещей, в туманной вычислительной инфраструктуре) или отдельный интеллектуальный агент (в МАС) играет роль отдельного нейрона или реализует определенный фрагмент глобальной многоуровневой нейронной сети. В таком случае динамика ИНС может быть эффективно реализована с помощью механизмов общей памяти или передачи сообщений.

Поэтому можно считать, что магистральным направлением в проектировании и реализации распределенных СППР является нейросетевой подход. Интеграция ИНС в СППР важна и перспективна, поскольку в этом случае появляется практическая возможность совместного использования символических и суб-символических вычислений. Вообще, направление интеграции ИНС в различные системы уже давно существует и называется нейросимволизмом [17].

В рамках настоящей работы ставится задача критического анализа проблемы интеграции ИНС и СППР на основе актуальной научной литературы. Для решения этой задачи была выбрана хорошо известная методология исследований Design Science Research Methodology (DSRM), которая определяет основные требования к стратегии систематического сбора и анализа актуальной научной литературы, а также к формам получаемых результатов [18]. В соответствии с этой методологией была определена стратегия литературного поиска, проведен сбор и анализ научной литературы, выделены основные критерии сравнения различных решений. По итогам анализа стало возможным определить наиболее значимые результаты, открытые проблемы и перспективные направления фундаментальных и прикладных исследований.

Статья состоит из четырех разделов. В первом разделе («Основы») излагаются основные сведения о различиях символического и коннективистского подходов к обработке информации, особенностях СППР и нейронных сетей. Во втором разделе («Методология») рассматриваются ключевые принципы организации исследований по методологии DSRM, кратко описываются процесс и результаты систематического сбора и анализа литературы. Третий раздел («Результаты анализа») содержит выводы в отношении роли и места нейросетевых СППР в процессах поддержки принятия решений, а также определяет наиболее значимые направления дальнейших исследований. В заключительном разделе подводятся итоги исследования.

1. Основы

1.1. Системы поддержки принятия решений

Актуальность создания систем поддержки принятия решений (СППР) определяется возросшей сложностью принятия решений в условиях изменяющейся среды, растущих объемов данных, а также количества взаимосвязанных элементов, влияю-

щих на деятельность лица, принимающего решение (ЛПР). СППР представляет собой интерактивную информационную систему, которая использует данные и модели выбора решений, обеспечивает пользователям удобный и эффективный доступ к информационным ресурсам и предоставляет им разнообразные возможности в части обработки информации и принятия решений [19–20].

Существует множество различных классификаций СППР. В рамках данного исследования наиболее целесообразным критерием классификации является тип доминирующего технологического компонента или драйвера СППР [21]. Согласно этой классификации, выделяют следующие типы СППР:

1. Управляемые данными СППР (data-driven). Центральным элементом таких СППР является анализ больших объемов структурированных данных. Примером таких систем являются разнообразные хранилища данных. Часто подобные СППР используются в сочетании с OLAP-системами [19, 22].
2. Управляемые моделями СППР (model-driven). Ключевую роль в подобных СППР играют вычислительные модели, параметры которых задает ЛПР. Примером таких систем являются СППР, прогнозирующие спрос и цены на продукцию.
3. Управляемые знаниями СППР (knowledge-driven). Такие СППР используют бизнес-правила и базы знаний для помощи ЛПР. Примером таких систем являются экспертные системы.
4. Управляемые документами СППР (document-driven). Основным строительным блоком подобных систем является массив неструктурированных данных, а основной задачей — помощь ЛПР в поиске необходимых материалов. Примером таких систем являются поисковые машины.
5. СППР на основе коммуникаций (communications-driven, group). Данные СППР предназначены для поддержки принятия решений группой ЛПР. Примерами таких систем являются интегрированные решения для совместной работы: системы редактирования документов, видео-конференции, чаты и т.д.

Отметим, что значительная часть современных СППР является гибридной, имея в своем ядре сразу несколько ключевых технологических компонентов, таких как данные, модели и знания. В таком случае недостаток данных на этапе создания СППР может компенсироваться бизнес-правилами и заранее заданными сценариями, в то время как по-

степенное накопление данных позволит применять технологии OLAP для анализа данных и новые математические модели для формирования более эффективных рекомендаций для ЛПР.

Как будет показано ниже, наблюдается тенденция внедрения в СППР методов искусственного интеллекта (ИИ), таких как искусственные нейронные сети (ИНС) и рассуждения на базе прецедентов (case-based reasoning, CBR), так как эти методы позволяют повысить прогностический потенциал СППР и выявить скрытые закономерности в имеющихся данных [23]. СППР с элементами ИИ в последнее время называют интеллектуализированными СППР (ИСППР). Анализ научной литературы показывает, что задаче многокритериального выбора (multi-criteria decision making, MCDM) посвящено большое количество исследований в области СППР. Например, по набору ключевых слов «multi-criteria AND decision AND decision support systems» в базе научного цитирования Scopus на момент начала данного исследования (январь 2021 г.) имелось 3516 статей. При построении ИСППР для MCDM необходимо учитывать наличие неопределенности информации и знаний о проблемной ситуации, а также применять различные способы снижения неопределенности, например, за счет внедрения свертки или ранжирования противоречивых критериев и экспертных оценок [24]. Кроме того, процесс принятия решений может быть итеративным.

Таким образом, помимо традиционных требований к СППР, таким как высокая скорость разработки с использованием стандартных строительных программных блоков, высокая скорость разворачивания СППР, а также надежность и корректность рекомендаций, необходимо сформулировать ряд новых требований. В первую очередь, необходимо обеспечить высокое быстродействие СППР для обеспечения ЛПР необходимой помощью в режиме реального времени. Во-вторых, СППР должна обладать способностью обучаться. В идеале СППР также должна уметь обучаться в режиме реального времени на данных, появляющихся в системе. В-третьих, СППР должна уметь работать с априорной неопределенностью контекста, знаний и логики. Это особенно актуально в условиях слабоструктурированных проблемных ситуаций, а также при интеграции интеллектуальных систем автоматизированного проектирования [25]. В-четвертых, любая СППР должна быть интерпретируема и понятна как ЛПР, так и другим стейкхолдерам. Данный вопрос остро возникает для СППР, использующих

ИНС, работу и решения которых трудно интерпретировать.

Проектирование СППР с учетом вышеуказанных требований должно осуществляться согласно иерархическому подходу [25], когда каждому уровню соответствуют свои модели, а модель принятия решения состоит из циклически повторяющихся этапов:

- ◆ сбор всех видов информации (четкой и нечеткой);
- ◆ анализ данных;
- ◆ преобразование данных;
- ◆ разработка критериев оценки решений;
- ◆ получение вариантов решений (альтернатив);
- ◆ исследование альтернатив и выбор подмножества вариантов (или одного из них) на основе заданных критериев.

Отдельно отметим требование к интерпретируемости результатов, предоставляемых современными системами с элементами ИИ. Данное требование формируется на государственном уровне и уровне мировых организаций. Так, например, цель Директивы об автоматизированном принятии решений Канады заключается в «обеспечении развертывания автоматизированных СППР таким образом, чтобы <результат работы СППР> приводил к <...> интерпретируемым решениям <...> с предоставлением объяснений после принятия решений» [26]. Согласно принципам Организации Экономического Сотрудничества и Развития, в которую входит 38 стран, «в отношении систем ИИ должна быть прозрачность и ответственное раскрытие информации, чтобы люди понимали результаты, основанные на ИИ, и могли оспаривать их» [27]. Таким образом, современные СППР, которые на этапе проектирования насыщаются элементами ИИ, также находятся в зоне регулирования этих и многих других нормативно-правовых документов. В свою очередь, это ставит вопрос о подходах к проектированию ИСППР, поиску баланса между использованием элементов ИИ, внедряемых для повышения устойчивости и улучшения предиктивных способностей СППР, и сохранением высокого уровня интерпретируемости получаемых результатов.

1.2. Символический и коннективистский подходы

Одним из ключевых вопросов построения СППР является представление и моделирование знаний, умение анализировать информацию и строить за-

ключения на основе имеющихся знаний. То, как знания представляются и моделируются человеческим мозгом, на данный момент определяет два различных течения научной мысли.

В рамках символической школы считается, что познавательная функция человека опирается на представление знаний в виде символов, которые затем обрабатываются и при необходимости разбиваются на более мелкие составляющие [28]. Символы могут разбиваться или объединяться в другие символы. С позиций символических вычислений человеческое познание — пример манипуляции символами. При этом представляется достаточно трудным формализовать и реализовать вычислительные операции над символическими отношениями.

С другой стороны, суб-символические системы опираются на такую абстракцию как нейрон [18]. Данный подход основан на том, что человеческий мозг рассматривается как естественная нейронная сеть огромного масштаба, которая работает с распределенным представлением знаний и умеет осуществлять осмысленные операции над таким представлением. Суб-символические системы строятся из базовых строительных блоков — нейронов, которые работают параллельно и состояние которых в каждый момент времени хранит лишь частичное представление входного импульса. Тогда общее представление входного импульса, хранимое ИНС и изменяемое ею, является распределенным. Такой подход к представлению знаний и операциями над ними называется суб-символическим, или коннективистским.

Следует отметить, что сосуществование двух этих парадигм обусловлено набором взаимных преимуществ и недостатков. Например, суб-символические системы обладают способностью обучаться и адаптироваться к изменяющимся данным. Символические системы такими способностями к автономности не обладают и требуют ручного кодирования внутренних правил. Последнее может приводить к проблеме символического основания (*symbol grounding problem*), когда картина мира программиста системы отражается в правилах, которыми эта система пользуется. Суб-символические подходы по своей природе распределены и имеют высокую эффективность и надежность. Кроме того, они включают важный компонент обучения, позволяя обучать суб-символические методы для решения конкретной задачи и постоянно модифицировать их по мере поступления новой информации. В то же время такой подход представляется

сложным для интерпретации. Для этого формируется отдельная область знаний, называемая объясняемым ИИ (explainable AI, xAI) и посвященная разработке методов извлечения смысла из сложных вычислительных моделей.

Другим недостатком суб-символических методов является их неспособность артикулировать сложные взаимосвязи в связи с ограничениями современных методов распределенного представления информации [28–29]. Некоторые достижения в этой области позволили решить ряд проблем распределенного представления, связанных с суб-символьными архитектурами. К ним относятся тензорные представления [30], способные представлять рекурсию в символьных структурах, дальнейшее развитие идей о более компактных распределенных представлениях с помощью голографических сокращенных представлений (holographic reduced representations, HRR) [31] и других методов символьных вычислений. Как правило, этот класс методов называют векторными символьными архитектурами (vector symbolic architectures, VSA) [32–33].

В современных научных работах, посвященных изучению и развитию идей по построению сильного или общего ИИ, констатируется необходимость создания интегрированных решений, которые основывались бы и на глубоком обучении, и на символических рассуждениях [18]. Это связано с тем, что система, включающая элементы общего ИИ, должна быть семантически обоснована, интерпретируема и надежна, а ее решения должны вызывать полное доверие у всех заинтересованных сторон. Согласно вышеуказанным свойствам символического и коннективистского подходов, а также определению общего ИИ, становится понятным, что создание общего ИИ невозможно без взаимной интеграции этих подходов и развития нейросимволических методов. Как уже отмечалось, создается нормативно-правовая база, в которой явно указывается на необходимость полной интерпретируемости результатов, что является требованием к внедряемым системам. Данные действия усложняют внедрение чисто коннективистских подходов в связи с тем, что объяснить причины формирования нейронной сетью предлагаемого решения зачастую не представляется возможным. Следовательно, даже внедрение систем с элементами слабого ИИ требует использования символических методов в дополнение к нейросетевым, что делает задачу создания и развития нейросимволических методов еще более актуальной и востребованной.

При построении нейросимволических систем степень интеграции двух парадигм может сильно различаться. Согласно таксономии Кауца, существует шесть типов таких систем [34] (сохранено авторское именование типов систем):

Тип 1: Symbolic-Neuro-Symbolic. Системы, основывающиеся на идеях традиционного глубокого обучения, принимающие на вход символы (например, текст с вопросом) и выдающие в качестве результата символы (например, текст с ответом на поставленный вопрос).

Тип 2: Symbolic[Neuro]. Подобные системы характеризуются символическими рассуждениями (например, выбор действия при управлении автономным автомобилем) с подключением ИНС для решения узкой задачи (например, обнаружения объектов на дороге).

Тип 3: Neuro-Union-compile[Symbolic]. В качестве входа такой нейросетевой системы используются символические правила (например, математическое выражение интеграла), а в качестве выхода также формируются символические правила (например, решение математической задачи вычисления интеграла).

Тип 4: Neuro-Symbolic. Данный тип представляет собой каскад из суб-символической и символической систем, где символическая система также способна обучаться (например, Neuro-Symbolic Concept Learner [35]).

Тип 5: Neuro[Symbolic]. Символические рассуждения выполняются на суб-символическом уровне (примеры подобных систем пока отсутствуют).

Таким образом, при проектировании СППР с элементами ИИ неизбежно использование как элементов символического, так и суб-символического подходов. В зависимости от поставленных задач и требований к итоговой СППР может требоваться различная степень интеграции суб-символических подходов. При этом, полностью суб-символической СППР стать не может в связи с требованиями к интерпретируемости результатов работы систем, а также к необходимости задавать априорные правила принятия решений.

Далее рассмотрим существующие СППР и проанализируем тенденции развития данной предметной области. Затем сформулируем предложения по построению нейросимволических СППР с точки зрения ключевых элементов нейросимволической парадигмы. В частности, рассмотрим вопрос о том,

как представлять знания одновременно в распределенном и символическом видах и как выражать символические рассуждения на суб-символическом уровне.

2. Принципы исследования в соответствии с методологией DSRM

Предметом данного исследования является разработка новых моделей и алгоритмов распределенных нейросетевых СППР. Подобные исследования относятся к области инженерно-ориентированных наук об искусственном интеллекте. В этой предметной области принято использовать методологию Design Science Research Methodology (DSRM) [19, 36–40].

При проведении научных исследований в области бизнес-информатики по методологии DSRM важное значение имеет разработка стратегии систематического сбора и анализа актуальной научной литературы, характеризующей различные ИТ-решения изучаемой проблемы [36–40]. Целью систематического сбора и анализа актуальной научной литературы является максимально точное определение исследовательской проблемы и стимулирующих факторов (актуальность, нерешенность проблемы, появление новых технологий).

Международное научное сообщество выработало определенные рекомендации и форму для определения стратегии исследования литературы. В данной работе используется наиболее подробная и детальная методология, предложенная в работе [40]. Эта методология позволяет полностью обосновать критерии выбора литературы для анализа, объективно представить результаты анализа и выделить ключевые причины необходимости проведения собственных исследований и новых разработок (в нашем случае – обосновать необходимость фундаментальных и прикладных исследований в области распределенных СППР на основе нейро-парадигмы).

Стратегия систематического поиска и анализа литературы [36, 40] основана на делении всех научных статей на две категории: конфигуративные и агрегативные публикации. Конфигуративные статьи помогают понять, в каких условиях определенный артефакт лучше всего проявляет полезное качество. Агрегативные статьи помогают понять, какие артефакты чаще использовались для решения данной проблемы. Требование к формирова-

нию корпуса статей, который должен включать как конфигуративные, так и агрегативные статьи, обеспечивает необходимые условия верификации выдвигаемых тезисов о применимости вновь разрабатываемых артефактов в условиях изучаемой проблемной ситуации, а также обеспечивает аргументы в пользу предлагаемых исследователями функциональных возможностей разрабатываемого решения. Делению научных статей на две категории соответствует определение двух категорий новых результатов, которые необходимо выделить и проанализировать. Эти две категории результатов носят названия эвристики конструкции и эвристики ожиданий соответственно [8]. Эвристики конструкции – это требования к надлежащему функционированию внутренней среды артефакта в соответствии с внешней средой. На этом этапе раскрываются внутренние механизмы и их организация с учетом желаемого воздействия на внешнюю среду. Кроме того, эвристика содержит конкретные знания, которые также могут быть использованы для разработки новых артефактов в будущем. Эвристики ожиданий – это определение пределов применимости артефакта, условия его использования и ситуации, в которых он будет полезен. Эвристика характеризует внешнюю среду артефакта, то есть контекст, в котором артефакт может использоваться, и пределы его производительности. Знания, созданные на этом этапе, могут использоваться для проектирования и создания новых артефактов.

Исследователи в области наук об искусственном интеллекте предлагают структурировать результаты поиска и анализа литературы в виде двух аналитических таблиц. В первой (промежуточной) аналитической таблице информация представляется в разрезе каждой отдельной проанализированной работы. Для каждой работы указывается ключевая проблематика, категория статьи, важнейшие эвристики конструкции, итоговый результат применения предлагаемых эвристик и метрики для сравнения результатов статьи с собственными решениями.

Вторая (заключительная) аналитическая таблица позволяет сформировать агрегированное представление результатов анализа литературы в разрезе ключевых повторно исследуемых проблем. Это дает возможность аргументации выбора проблематики и применяемых методов в собственном исследовании.

С учетом изложенных выше методологических принципов в рамках настоящего исследования

была сформирована следующая стратегия поиска и анализа литературы по теме распределенных нейросетевых СППР:

- ♦ горизонт поиска — 1991–2021 гг. (период появления наиболее значимых фундаментальных и прикладных работ в рассматриваемой области);
- ♦ источники информации — базы научного цитирования Scopus и Web of Science (публикации по теме исследований наиболее полно индексируются в этих базах цитирования в разделах Computer Science, Decision Sciences и Management Information Systems);
- ♦ язык поиска и статей — английский;
- ♦ ключевые запросы — “decision support systems”, “intelligent decision support systems”. Первый запрос является более общим по отношению ко второму, необходимость его использования объясняется относительно небольшим числом статей, которые удается найти в базах цитирования с применением второго (более конкретного) запроса. В частности, второй (более конкретный) запрос без применения критериев исключения позволил найти 300 работ в базе Web of Science и 1269 работ в базе Scopus. В то же время использование первого (более общего) запроса позволило найти 20 003 работы в Web of Science и 108 131 работу в Scopus;
- ♦ критерии исключения статей из корпуса текстов:
 - низкая релевантность, определенная на основе изучения реферата статьи;
 - отсутствие или сложность повторного воспроизведения результатов статьи;
 - сложность повторного использования программных артефактов, представленных в статье;
 - невозможность анализа статьи из-за использования языка, отличного от русского и английского;
 - отсутствие использования элементов искусственного интеллекта (таких как нечеткие множества или ИНС) при построении предлагаемых методов.

В результате применения разработанной стратегии был сформирован корпус статей со следующими характеристиками (таблица 1). Корпус был разбит на интервалы по пять лет, начиная с 1991 года.

Таблица 1.

Состав корпуса анализируемых статей

Горизонт поиска	Агрегативные статьи	Конфигуративные статьи
1991–1995	6	7
1996–2000	6	8
2001–2005	7	7
2006–2010	8	28
2011–2015	7	20
2016–2021	19	34

Общее количество статей, отобранных для анализа, составило 157. Обратим внимание на тот факт, что изначальное количество работ, удовлетворяющих выбранному поисковому запросу в базе цитирования Web of Science, составило 303. Однако применение критериев исключения к найденным работам в обеих базах цитирования (Scopus и Web of Science) позволило сократить число работ для анализа до 157. Поскольку исследование проводилось с января по май 2021 года, этот показатель соответствует аналогичным исследованиям, проводимых по методологии DSRM в тех же временных рамках [41–43]. Из таблицы 1 видно, что, начиная с 2006 года, количество конфигуративных статей заметно превышает число агрегативных работ по данной тематике.

Опережающий рост конфигуративных статей может быть объяснен расширением перечня задач, в которых используются СППР. Как уже отмечалось ранее, конфигуративные статьи — это статьи, в которых описываются условия предметной области и задачи, которые способствуют успешному применению того или иного артефакта. Чем больше сценариев использования — тем больше число публикуемых статей. Полнотекстовый анализ статей из сформированного корпуса позволил получить результаты исследования. Избранные статьи представлены в таблице 2. Эти статьи были выбраны из общего корпуса по таким критериям, как репрезентативность выборки по каждому из временных интервалов для демонстрации постоянного интереса к данной теме и использование в статьях описаний реальных ситуаций, которые могли бы быть повторно проанализированы независимым исследователем с получением тех же результатов. Иначе говоря, были выбраны работы, где обеспечивается воспроизводимость результата. При этом в колонке «Артефакт» таблицы 2 характеристика «Тип 1» оз-

начает общую поддержку принятия решений с явным указанием на возможность многокритериального выбора, а «Тип 2» означает общую поддержку принятия решений без явного указания на возможность многокритериального выбора.

Как видно из представленных таблиц, анализ корпуса статей в целом подтверждает гипотезу об актуальности и нерешенности проблемы разработки нейросетевых распределенных СППР в различных предметных областях. Подробному анализу выявленных эвристик конструкции и формулированию ключевых направлений собственных исследований посвящены последующие разделы настоящей статьи. Согласно методологии DSRM, в «каноническую» структуру таблицы должен включаться столбец, содержащий метрики сравнения с аналогами, предлагаемые авторами работ. Однако в таблице 2 этот столбец отсутствует, поскольку ни в одной из рассматриваемых статей какие-либо явно определенные критерии сравнения различных подходов к разработке нейросетевых распределенных СППР не представлены. Это затрудняет объективный анализ существующих решений и выбор близких аналогов. Поэтому разработка и апробация объективных критериев сравнения нейросетевых СППР уже на этапе предварительного анализа литературы может быть включена в состав перспективных тем исследований.

3. Результаты анализа

3.1. Применение нейросимволической парадигмы к построению современных СППР

Как уже было отмечено ранее, при создании ИСППР необходимо решить два принципиальных вопроса. Первый вопрос касается представления информации и знаний в таком виде, чтобы было возможно использование этих знаний как в символических, так и в суб-символических системах. Второй вопрос посвящен выражению символических рассуждений на суб-символическом уровне. Без решения этих вопросов создание нейросимволических систем невозможно.

В силу того, что любая нейросимволическая система состоит из символических и суб-символических модулей, вопросы коммуникации между ними играют важнейшую роль. Иначе говоря, требуется возможность перевода символического знания в распределенный вид и обратно. Такой двусто-

ронный перевод оправдан тем, что ИНС не могут функционировать на высоких уровнях абстракции: рассуждения на высоких уровнях абстракции могут быть исключительно символическими. Кроме того, возникает вопрос о расположении этого закодированного знания в суб-символических модулях: возможно кодирование знания в веса ИНС, в функцию потерь ИНС или в представление в виде факторных моделей [60]. Выбор способа представления знаний в виде, понятном для нейронной сети входит в актуальную повестку данной области знаний на ближайшие 10 лет [18]. Помимо технических вопросов конструирования распределенных представлений, также существуют актуальные вопросы выражения связей между элементами кодируемой символической структуры, а также кодирования выражений логики первого порядка [61].

Существуют различные варианты построения распределенных представлений для символических структур. Одним из таких подходов являются тензорные представления [30], которые мы отмечали ранее. Этот метод позволяет строить распределенные представления довольно сложных и рекурсивных символьных структур, например, двоичных деревьев. Уникальным свойством этого подхода по сравнению, например, с парадигмой VSA (Vector Symbolic Architectures) является декодирование структуры из распределенного представления без потерь. Вторым важным свойством является возможность выражения ряда символических операций в виде тензорных манипуляций.

Это позволяет тензорным представлениям стать основой для нейросимволических алгоритмов, поскольку скомпилированная ИНС может служить универсальным исполнителем тензорных операций. Важно отметить, что создание нейронных сетей, не требующих обучения, но позволяющих выполнять сложные задачи, является сложной и перспективной задачей [62, 63]. Таким образом, нейросимволические системы, использующие тензорные представления, позволяют выражать определенный символический алгоритм в виде компилируемых сетей, не требующих обучения, и являются системами пятого типа, согласно рассмотренной выше классификации. Однако известно, что тензорные представления характеризуются взрывным ростом размерности по мере роста глубины кодируемой структуры. Поэтому существуют другие подходы, которые позволяют кодировать символические структуры в вектор фиксированного

Таблица 2.

**Заключительная аналитическая таблица.
Избранные работы, посвященные созданию ИСППР**

Проблема	Артефакт	Эвристики конструкции	Эвристики ожидания	Источник
Оценка характера беременности	Тип 1	Нечеткая логика 2-tuple	Наличие экспертных оценок	[44]
Выбор поставщика	Тип 1	Нечеткая логика	Наличие исторических данных и критериев	[45]
Выбор лауреата стипендии	Тип 1	Нечеткая логика. Рассуждения, основанные на правилах	Наличие заявок учащихся	[46]
Оценка риска заболевания	Тип 2	Рассуждения, основанные на правилах. Генетические алгоритмы	Наличие экспертных оценок и исторических данных	[47]
Рекомендации клиентам	Тип 1	Нечеткая логика	Наличие исторических данных	[48]
Схема паллетизации грузов на борту самолета	Тип 2	Рассуждения, основанные на правилах. Генетические алгоритмы	Наличие ограничений	[49]
Выбор наиболее важного риска для митигации	Тип 1	Нечеткая логика 2-tuple. Метод выбора порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS)	Наличие экспертных оценок и альтернатив	[50]
Оценка скорости водного потока	Тип 2	ИНС	Наличие исторических данных	[51]
Оценка риска наводнения	Тип 2	Метод анализа иерархий	Наличие экспертных оценок	[52]
Выбор модели перевода вычислений в облачную инфраструктуру	Тип 1	Нечеткая логика 2-tuple. Метод выбора порядка предпочтения по сходству с идеальным решением (TOPSIS)	Наличие экспертных оценок и альтернатив	[53]
Предотвращение аварий	Тип 2	Нечеткая логика. ИНС	Наличие исторических данных	[54]
Поиск поставщика	Тип 1	Нечеткая логика 2-tuple	Наличие экспертных оценок и альтернатив	[55]
Поиск лучшей ERP-системы	Тип 1	ИНС. Метод анализа иерархий	Наличие экспертных оценок и альтернатив	[56]
Поиск лучшего проекта	Тип 1	Функции доверия. Теория Демпстера–Шафера	Наличие экспертных оценок и альтернатив	[57]
Анализ исковых заявлений	Тип 2	Рассуждения, основанные на правилах. Рассуждения, основанные на примерах	Наличие базы правил и базы примеров	[58]
Анализ возможностей использования возобновляемых источников энергии	Тип 1	Рассуждения, основанные на правилах	Наличие цифровых карт	[59]

размера. Это семейство подходов называется VSA/HD (Vector Symbolic Architectures / High Dimensional Computing). Фиксированность длины результирующего вектора одновременно является недостатком таких подходов: может оказаться, что размерности вектора может не хватить для того, чтобы хранить необходимую информацию для восстановления символической структуры без потерь.

Тензорные представления также можно использовать для решения второго актуального вопроса, возникающего при построении нейросимволических систем — выражения символических рассуждений на суб-символическом уровне. Было показано, что простые алгоритмы (такие как арифметические операции) могут быть выражены в виде последовательности скомпилированных нейронных сетей

[64, 65]. Однако, существуют и другие подходы, позволяющие выражать сложные символические алгоритмы в виде нейросетевых архитектур. К таким архитектурам относятся, например, нейронные машины Тьюринга (neural Turing machine, NTN). Они впервые были предложены в 2014 году [66] и с тех пор получили широкое распространение в различных задачах, начиная от простых алгоритмических задач и заканчивая обучением с подкреплением [67], последовательными рекомендациями [68], транскрипцией естественного языка [69] и др.

В нейросимволических СППР обучение играет критическую роль, так как этим системам необходимо предлагать решения, в том числе основываясь на исторических данных (например, задавать веса критериям или оценкам экспертов согласно предыдущим примерам принятия решений). Кроме того, результаты рассуждений на суб-символическом уровне также должны быть извлекаемыми из суб-символической системы (ИНС). С одной стороны, это позволит получить полностью обучаемую систему, а с другой — в любой момент становится возможным воспользоваться символическими рассуждениями и перейти на более высокий уровень абстракции. Это в очередной раз поднимает вопрос об интерпретируемости результатов, получаемых с помощью нейросимволических систем.

В нейросимволических системах необходимо учитывать различные требования, такие как модульность, возможность работать с символическим языком, возможность выражения рассуждений и удовлетворения ограничений как на символическом, так и на суб-символическом уровнях. Вопросы унифицированного выражения знаний и рассуждений являются актуальными, в том числе, при построении нейросимволических СППР.

3.2. Возможный процесс внедрения

В задачах многокритериального принятия решений знание проблемной ситуации имеет иерархический характер [26, 50, 53, 70] и может быть описано в виде дерева, где в качестве листьев выступают лингвистические оценки, а узлами являются соответствующие элементы, такие как критерии, группы критериев, эксперты и альтернативы. Выбор лингвистических оценок определяется необходимостью учитывать неопределенность контекста, неструктурированность экспертных оценок и другие факторы. Таким образом, кодируя знание проблемной ситуации с помощью дерева, воз-

можно его выражение в распределенном виде без потери информации при условии использования тензорных представлений. Согласно вышеуказанным свойствам тензорных представлений, становится возможным при необходимости извлекать из распределенного представления символические структуры и представлять определенный символический алгоритм на суб-символическом уровне. Использование распределенных представлений и рассуждений на суб-символическом уровне позволяет представить определенные части СППР в виде высокоэффективных распределенных модулей.

Кодирование дерева, а также извлечение структурных элементов может выполняться в виде скомпилированных ИНС, построенных в соответствии с правилами тензорных представлений. В терминах нейросимволической парадигмы шаг агрегации оценок является примером рассуждений. Представление рассуждений на суб-символическом уровне является актуальной задачей. Шаг агрегации, рассматриваемый как рассуждения в нейросимволических СППР, предлагается выполнять с помощью обучаемой распределенной нейросетевой архитектуры, такой как нейронные машины Тьюринга. Как было показано ранее, с помощью этой архитектуры возможно выражение математического алгоритма поиска взвешенной суммы и некоторых других. Соответственно, становится возможным создание полностью обучаемого нейросетевого агрегатора лингвистических оценок, который адаптировался бы во времени к новым данным и использовал бы исторические данные. В частности, такой алгоритм мог бы самостоятельно назначать веса экспертов и критериев (а также групп критериев) согласно многоуровневой методологии принятия решений на основе лингвистических оценок [70]. В таком случае результатом работы сети становится экземпляр тензорных представлений, который после декодирования превращается в лингвистическую оценку. Таким образом, достигается одно из важнейших требований к СППР — интерпретируемость результатов.

Построение нейросимволических СППР является интересной научной и практически значимой задачей. Текущий набор технологических решений позволяет создавать как символические, так и суб-символические модули для нейросимволических СППР, которые характеризуются отказоустойчивостью, распределенностью и высокой эффективностью вычислений, а также высоким уровнем интерпретируемости, что крайне важно при принятии ЛПР стратегических решений.

Заключение

В рамках данной работы было проведено выявление и исследование новых направлений развития систем поддержки принятия решений в соответствии с методологией DSRM. В результате сбора и анализа большого количества актуальных научных источников получила поддержку первоначальная гипотеза о существенном повышении значимости распределенных СППР в условиях глобальной цифровизации и развития новых организационных форм. Была выявлена устойчивая тенденция к построению подобных систем на основе интегрированных нейросетевых подходов. К числу наиболее значимых выводов следует отнести следующее:

- ♦ в настоящее время чаще всего ИНС используются в СППР в качестве модуля, решающего задачи прогнозирования и классификации;
- ♦ в большом количестве приложений используются распределенные представления на основе тензорных представлений, в силу возможности выражения символов и символических опера-

ций на тензорном уровне и извлечение символов из таких представлений без потери информации.

При этом анализ показывает, что наиболее перспективными направлениями фундаментальных и прикладных исследований являются:

- ♦ реализация объясняющих способностей для распределенных СППР;
- ♦ модификация базовых моделей тензорных представлений для случаев большой размерности;
- ♦ интегрирование в СППР перспективных нейросетевых архитектур, таких как нейронные машины Тьюринга;
- ♦ разработка номенклатуры конфигураций и возможных вариантов внедрения нейросимволических СППР на основе анализа, проведенного в данной работе. ■

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-37-90058.

Литература

1. Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future / H. Panetto [et al.] // *Annual Reviews in Control*. 2019. Vol. 47. P. 200–213. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2019.02.002.
2. Moreira M.E. *The agile enterprise: Building and running agile organizations*. New York: Apress, 2017. DOI: 10.1007/978-1-4842-2391-8.
3. MacDonald T.J., Allen D.W.E., Potts J. *Blockchains and the boundaries of self-organized economies: Predictions for the future of banking* // *Banking beyond banks and money. New economic window*. Cham: Springer, 2016. P. 279–296. DOI: 10.1007/978-3-319-42448-4_14.
4. Hu P., Dhelim S., Ning H., Qiu T. Survey on fog computing: Architecture, key technologies, applications and open issues // *Journal of Network and Computer Applications*. 2017. Vol. 98. P. 27–42. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.09.002.
5. Neuron as an agent / S. Ohsawa [et al.] // *Proceedings of the 6th International Conference on Learning Representations (ICLR 2018)*, Vancouver, Canada, 30 April – 3 May 2018. [Электронный ресурс]: <https://openreview.net/forum?id=BkfEzz-0> (дата обращения 05.07.2021).
6. Fitzgerald S. *Design and implementation of a distributed neural network platform utilising crowdsourcing processing (MAI Thesis)*. Dublin: Trinity College Dublin, 2018.
7. Arcand J.-F., Pelletier S.-J. ADN-analysis and development of distributed neural networks for intelligent applications // *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN '94)*. Orlando, USA, 27–29 June 1994. Vol. 3. P. 1519–1524. DOI: 10.1109/ICNN.1994.374513.
8. James M., Hoang D. Design of low-cost, real-time simulation systems for large neural networks // *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 1992. Vol. 14. No 3. P. 221–235. DOI: 10.1016/0743-7315(92)90065-U.
9. Pi Y., Yuan Q., Meng X. A flexible implementation method of distributed ANN // *Proceedings of the 2012 International Conference on Brain Inspired Cognitive Systems (BICS 2012)*. Shenyang, China, 11–14 July 2012. P. 345–350. DOI: 10.1007/978-3-642-31561-9_39.
10. Meng X., Yuan Q., Pi Y., Wang J. A novel method of constructing ANN // *Proceedings of the 2007 International Symposium on Neural Networks (ISNN 2007)*. Nanjing, China, 3–7 June 2007. P. 493–499. DOI: 10.1007/978-3-540-72393-6_59.
11. Khouzam B. *Neural networks as cellular computing models for temporal sequence processing (PhD Thesis)*. Supelec, 2014.
12. *Machine learning at the network edge: A survey* / M. Murshed [et al.]. Working paper arXiv:1908.00080, 2019.
13. Ghosh J., Hwang K. Mapping neural networks onto message-passing multicomputers // *Journal of Parallel and Distributed Computing*. 1989. Vol. 6. No 2. P. 291–330. DOI: 10.1016/0743-7315(89)90063-4.
14. Suresh S., Omkar S., Mani V. Parallel implementation of back-propagation algorithm in networks of workstations // *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*. 2005. Vol. 16. No 1. P. 24–34. DOI: 10.1109/TPDS.2005.11.

15. Tollenaere T., Orban G. Simulating modular neural networks on message-passing multiprocessors // *Parallel Computing*. 1991. Vol. 17. No 4–5. P. 361–379. DOI: 10.1016/S0167-8191(05)80142-5.
16. Failout: Achieving failure-resilient inference in distributed neural networks / A. Yousefpour [et al.]. Working paper arXiv:2002.07386, 2020.
17. Garcez A., Lamb L. Neurosymbolic AI: The 3rd wave. Working paper arXiv:2012.05876, 2020.
18. Peffers K., Tuunanen T., Rothenberger M.A., Chatterjee S. A design science research methodology for information systems research // *Journal of Management Information Systems*. 2007. Vol. 24. No 3. P. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.
19. Плетняков В.А. Развитие современных технологий поддержки принятия управленческих решений стратегического характера в инновационной сфере // *Terra Economicus*. 2012. Т. 10. № 2.2. С. 56–59.
20. Селютина Л.Г. Развитие современных технологий поддержки принятия управленческих решений в предпринимательской деятельности в сервисной экономике // *Экономика XXI века*. Сб. материалов Международной научно-практической конференции. Новосибирск, 23 октября 2020 г. С. 387–393.
21. Power D.J. Supporting decision-makers: An expanded framework // *Informing Science*. 2001. Vol. 1. P. 1901–1915. DOI: 10.28945/2384.
22. Power D.J. Understanding data-driven decision support systems // *Information Systems Management*. 2008. Vol. 25. No 2. P. 149–154. DOI: 10.1080/10580530801941124.
23. Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения / Черников А.Д. и [др.] // *Георесурсы*. 2020. Т. 22. № 3. С. 87–96. DOI: 10.18599/grs.2020.3.87-96.
24. Бондаренко И.С. Концепция имитационной модели системы поддержки принятия решений угольного предприятия // *Вестник университета*. 2021. № 2. С. 42–50. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-2-42-50.
25. Курейчик В.М. Особенности построения систем поддержки принятия решений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2012. № 7. С. 92–98.
26. Kuziemski M., Misuraca G. AI governance in the public sector: Three tales from the frontiers of automated decision-making in democratic settings // *Telecommunications Policy*. 2020. Vol. 44. No 6. Article ID 101976. DOI: 10.1016/j.telpol.2020.101976.
27. Yeung K. Recommendation of the council on artificial intelligence (OECD) // *International Legal Materials*. 2020. Vol. 59. No 1. P. 27–34. DOI: 10.1017/ilm.2020.5.
28. Kelley T.D. Symbolic and sub-symbolic representations in computational models of human cognition: What can be learned from biology? // *Theory & Psychology*. 2003. Vol. 13. No 6. P. 847–860. DOI: 10.1177/0959354303136005.
29. Pylyshyn Z.W. Computing in cognitive science. Foundations of cognitive science. Cambridge, MA: MIT Press, 1989. P. 51–91.
30. Smolensky P., Legendre G. The harmonic mind: From neural computation to optimality-theoretic grammar. Vol. 1: Cognitive architecture. Cambridge, MA: MIT Press, 2006.
31. Plate T.A. Holographic reduced representations // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1995. Vol. 6. No 3. P. 623–641. DOI: 10.1109/72.377968.
32. Kanerva P. Hyperdimensional computing: An introduction to computing in distributed representation with high-dimensional random vectors // *Cognitive Computation*. 2009. No 1. P. 139–159. DOI: 10.1007/s12559-009-9009-8.
33. Schlegel K., Neubert P., Protzel P. A comparison of vector symbolic architectures. Working paper arXiv:2001.11797, 2020.
34. Kautz H. The third AI summer: AAAI 2020 Robert S. Englemore memorial award lecture. 2020. Available at: https://youtu.be/_cQITY0SPiw (дата обращения 05.07.2021).
35. Mao J., Gan C., Kohli P., Tenenbaum J.B., Wu J. The neuro-symbolic concept learner: Interpreting scenes, words, and sentences from natural supervision. Working paper arXiv:1904.12584, 2019.
36. Johannesson P., Perjons E. An introduction to design science. Cham: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-10632-8.
37. Höckmayr B.S. Engineering service systems in the digital age. Wiesbaden: Springer Gabler, 2019. DOI: 10.1007/978-3-658-26203-7.
38. vom Brocke J., Havner A., Maedche A. Design science research: cases. Cham: Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-46781-4.
39. Dresch A., Lacetda D.P., Antunes J.A.V. Jr. Design science research. A method for science and technology advancement. Cham: Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-07374-3.
40. Alismail S., Zhang H., Chatterjee S. A framework for identifying design science research objectives for building and evaluating IT artifacts // *Proceedings of the International Conference on Design Science Research in Information System and Technology*. Karlsruhe, Germany, 30 May – 1 June 2017. P. 218–230. DOI: 10.1007/978-3-319-59144-5_13.
41. An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success / R.T. Sutton [et al.] // *NPJ Digital Medicine*. 2020. No 3. Article ID 17. DOI: 10.1038/s41746-020-0221-y.
42. Kasie F.M., Bright G., Walker A. Decision support systems in manufacturing: a survey and future trends // *Journal of Modelling in Management*. 2017. Vol. 12. No 3. P. 432–454. DOI: 10.1108/JM2-02-2016-0015.
43. Zhai Z., Mart nez J.F., Beltran V., Mart nez N.L. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 170. Article ID 105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.

44. An interpretable knowledge-based decision support system and its applications in pregnancy diagnosis / K. Song [et al.] // Knowledge-Based Systems. 2021. Vol. 221. Article ID 106835. DOI: 10.1016/j.knosys.2021.106835.
45. Alavi B., Tavana M., Mina H. A dynamic decision support system for sustainable supplier selection in circular economy // Sustainable Production and Consumption. 2021. Vol. 27. P. 905–920. DOI: 10.1016/j.spc.2021.02.015.
46. Fuzzy logic implementation using the Tsukamoto method as a decision support system in scholarship acceptance / S.T.M.T. Sukenda [et al.] // Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT). 2021. Vol. 12. No 11. P. 1411–1417. DOI: 0.17762/turcomat.v12i11.6054.
47. Aggarwal L., Goswami P., Sachdeva S. Multi-criterion intelligent decision support system for COVID-19 // Applied Soft Computing. 2021. Vol. 101. Article ID 107056. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.107056.
48. Zong K., Yuan Y., Montenegro-Marin C.E., Kadry S.N. Or-based intelligent decision support system for e-commerce // Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research. 2021. Vol. 16. No 4. P. 1150–1164. DOI: 10.3390/jtaer16040065.
49. Lee N.-S., Mazur P., Bittner M., Schoder D. An intelligent decision-support system for air cargo palletizing // Proceedings of the 54th Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii, 5–8 January 2021. P. 1405. DOI: 10.24251/HICSS.2021.170.
50. APOLLO: A fuzzy multi-criteria group decision-making tool in support of climate policy / A. Labella [et al.] // International Journal of Computational Intelligence Systems. 2020. Vol. 13. No 1. P. 1539–1553. DOI: 10.2991/ijcis.d.200924.002.
51. Artificial neural network incorporated decision support tool for point velocity prediction / S. Simsek [et al.] // Journal of Business Analytics. 2020. Vol. 3. No 1. P. 67–78. DOI: 10.1080/2573234X.2020.1751569.
52. GIS-based MCDM–AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. / D. Souissi [et al.] // Geocarto International. 2020. Vol. 35. No 9. P. 991–1017. DOI: 10.1080/10106049.2019.1566405.
53. Sohaib O., Naderpour M., Hussain W., Martinez L. Cloud computing model selection for e-commerce enterprises using a new 2-tuple fuzzy linguistic decision-making method // Computers & Industrial Engineering. 2019. Vol. 132. P. 47–58. DOI: 10.1016/j.cie.2019.04.020.
54. Dwi Putra M.S., Andryana S., Fauziah, Gunaryati A. Fuzzy analytical hierarchy process method to determine the quality of gemstones // Advances in Fuzzy Systems. 2018. Vol. 2018. Article ID 9094380. DOI: 10.1155/2018/9094380.
55. Jimenez Moya G.E., Zulueta Veliz Y. A 2-tuple linguistic multi-period decision making approach for dynamic green supplier selection // DYNA. 2017. Vol. 84. No 202. P. 199–206. DOI: 10.15446/dyna.v84n202.58032.
56. Yazgan H.R., Boran S., Goztepe K. An ERP software selection process with using artificial neural network based on analytic network process approach // Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36. No 5. P. 9214–9222. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.12.022.
57. Weidong Z., Shiping G. Intelligent decision support system and its application in science research project selection // Proceedings of the 2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science. NW Washington, USA, 7–8 March 2009. Vol. 1. P. 858–862. DOI: 10.1109/ETCS.2009.194.
58. Pal K., Palmer O. A decision-support system for business acquisitions // Decision Support Systems. 2000. Vol. 27. No 4. P. 411–429. DOI: 10.1016/S0167-9236(99)00083-4.
59. Voivontas D., Assimacopoulos D., Mourelatos A., Corominas J. Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system // Renewable Energy. 1998. Vol. 13. No 3, P. 333–344. DOI: 10.1016/S0960-1481(98)00006-8.
60. A meta-transfer objective for learning to disentangle causal mechanisms / Y. Bengio [et al.]. Working paper arXiv:1901.10912, 2019.
61. Bader S., Hitzler P., H Ildobler S., Witzel A. A fully connectionist model generator for covered first-order logic programs // Proceedings of the Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI–2007). Hyderabad, India, 6–12 January 2007. P. 666–671.
62. Pinkas G. Reasoning, nonmonotonicity and learning in connectionist networks that capture propositional knowledge // Artificial Intelligence. 1995. Vol. 77. No 2. P. 203–247. DOI: 10.1016/0004-3702(94)00032-V.
63. Pinkas G., Lima P., Cohen S. Representing, binding, retrieving and unifying relational knowledge using pools of neural binders // Biologically Inspired Cognitive Architectures. 2013. Vol. 6. P. 87–95. DOI: 10.1016/j.bica.2013.07.005.
64. Demidovskij A.V., Babkin E.A. Towards designing linguistic assessments aggregation as a distributed neuroalgorithm // Proceedings of the 2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). St. Petersburg, Russia, 27–29 May 2020, pp. 161–164. DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198767.
65. Demidovskij A., Babkin E. Designing arithmetic neural primitive for sub-symbolic aggregation of linguistic assessments // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1680. No 1. Article ID 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012007.
66. Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory / A. Graves [et al.] // Nature. 2016. No 538. P. 471–476. DOI: 10.1038/nature20101.
67. Zaremba W., Sutskever I. Reinforcement learning neural Turing machines-revised. Working paper arXiv:1505.00521, 2015.
68. Sequential recommendation with user memory networks / X. Chen [et al.] // Proceedings of the Eleventh ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM '18), New York, 5–9 February 2018, pp. 108–116. DOI: 10.1145/3159652.3159668.
69. Grefenstette E., Hermann K. M., Suleyman M., Blunsom P. Learning to transduce with unbounded memory. Working paper arXiv:1506.02516, 2015.
70. Demidovskij A.V., Babkin E.A. Developing a distributed linguistic decision making system // Business Informatics. 2019. Vol. 13. No 1. P. 18–32. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.18.32.

Об авторах**Демидовский Александр Владимирович**

аспирант кафедры информационных систем и технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/20;

E-mail: ademidovskij@hse.ru

ORCID: 0000-0003-3605-6332

Бабкин Эдуард Александрович

кандидат технических наук, PhD (Computer Science);

профессор кафедры информационных систем и технологий, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 603155, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/20;

E-mail: eababkin@hse.ru

ORCID: 0000-0003-2597-9043

Integrated neurosymbolic decision support systems: problems and opportunities

Alexander V. Demidovskij

E-mail: ademidovskij@hse.ru

Eduard A. Babkin

E-mail: eababkin@hse.ru

National Research University Higher School of Economics

Address: 25/12, Bolshaya Pecherskaya Street, Nizhny Novgorod 603155, Russia

Abstract

The current problem of developing new kinds of decision support systems for different categories of management personnel is addressed in this study. A critical feature of such systems is their distributed and decentralized nature, which enables the construction of next-generation information systems in the form of Multi-Agent Systems, Internet of Things, or Fog Computing Architectures. Parallel models of the dynamics of artificial neural networks are produced under such realistic circumstances, demonstrating their potential for addressing a variety of issues. The purpose of this study is to conduct a critical analysis of the problem of integrating Artificial Neural Networks with decision support systems using a corpus of relevant scholarly literature. To tackle this question, the Design Science Research methodology was considered. According to this methodology, a literary search strategy was established, scientific literature was collected and analyzed, and key comparisons between different solutions were emphasized. The study resulted in the presentation of the most important findings, outstanding issues, and potential areas of fundamental and applied solutions. A consistent trend toward the development of decision support systems based on integrated neural-network methods has been observed, which is efficient and cost-effective since it enables the creation of distributed and trainable decision support systems.

Key words: linguistic decision-making; multi-criteria decision-making; decision support systems; neurosymbolic systems; artificial intelligence.

Citation: Demidovskij A.V., Babkin E.A. (2021) Integrated neurosymbolic decision support systems: problems and opportunities. *Business Informatics*, vol. 15, no 3, pp. 7–23. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.7.23

References

1. Panetto H., Iung B., Ivanov D., Weichhart G., Wang X. (2019) Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future. *Annual Reviews in Control*, vol. 47, pp. 200–213. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2019.02.002.
2. Moreira M.E. (2017). *The agile enterprise: Building and running agile organizations*. New York: Apress. DOI: 10.1007/978-1-4842-2391-8.
3. MacDonald T.J., Allen D.W.E., Potts J. (2016) Blockchains and the boundaries of self-organized economies: Predictions for the future of banking. *Banking beyond banks and money. New economic window*. Cham: Springer, pp. 279–296. DOI: 10.1007/978-3-319-42448-4_14.
4. Hu P., Dhelim S., Ning H., Qiu T. (2017) Survey on fog computing: Architecture, key technologies, applications and open issues. *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 98, pp. 27–42. DOI: 10.1016/j.jnca.2017.09.002.
5. Ohsawa S., Akuzawa K., Matsushima T., Bezerra G., Iwasawa Y., Kajino H., Takenaka S., Matsuo Y. (2018) Neuron as an agent. Proceedings of the 6th International Conference on Learning Representations (ICLR 2018), Vancouver, Canada, 30 April – 3 May 2018. Available at: <https://openreview.net/forum?id=BkfEzz-0> (accessed 5 July 2021).
6. Fitzgerald S. (2018) *Design and implementation of a distributed neural network platform utilising crowdsourcing processing* (MAI Thesis). Dublin: Trinity College Dublin.
7. Arcand J.-F., Pelletier S.-J. (1994) ADN-analysis and development of distributed neural networks for intelligent applications. Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN '94). Orlando, USA, 27–29 June 1994, vol. 3, pp. 1519–1524. DOI: 10.1109/ICNN.1994.374513.
8. James M., Hoang D. (1992) Design of low-cost, real-time simulation systems for large neural networks. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 14, no 3, pp. 221–235. DOI: 10.1016/0743-7315(92)90065-U.
9. Pi Y., Yuan Q., Meng X. (2012) A flexible implementation method of distributed ANN. Proceedings of the 2012 International Conference on Brain Inspired Cognitive Systems (BICS 2012). Shenyang, China, 11–14 July 2012, pp. 345–350. DOI: 10.1007/978-3-642-31561-9_39.
10. Meng X., Yuan Q., Pi Y., Wang J. (2007) A novel method of constructing ANN. Proceedings of the 2007 International Symposium on Neural Networks (ISNN 2007). Nanjing, China, 3–7 June 2007, pp. 493–499. DOI: 10.1007/978-3-540-72393-6_59.
11. Khouzam B. (2014) *Neural networks as cellular computing models for temporal sequence processing* (PhD Thesis). Supelec.
12. Murshed M., Murphy C., Hou D., Khan N., Ananthanarayanan G., Hussain F. (2019) *Machine learning at the network edge: A survey*. Working paper arXiv:1908.00080.
13. Ghosh J., Hwang K. (1989) Mapping neural networks onto message-passing multicomputers. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 6, no 2, pp. 291–330. DOI: 10.1016/0743-7315(89)90063-4.
14. Suresh S., Omark S., Mani V. (2005) Parallel implementation of back-propagation algorithm in networks of workstations. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 16, no 1, pp. 24–34. DOI: 10.1109/TPDS.2005.11.
15. Tollenaere T., Orban G. (1991) Simulating modular neural networks on message-passing multiprocessors. *Parallel Computing*, vol. 17, no 4–5, pp. 361–379. DOI: 10.1016/S0167-8191(05)80142-5.
16. Yousefpour A., Nguyen B.Q., Devic S., Wang G., Kreidieh A., Lobel H., Bayen A., Jue J. (2020) *Failout: Achieving failure-resilient inference in distributed neural networks*. Working paper arXiv:2002.07386.
17. Garcez A., Lamb L. (2020) *Neurosymbolic AI: The 3rd wave*. Working paper arXiv:2012.05876.
18. Peffers K., Tuunanen T., Rothenberger M.A., Chatterjee S. (2007) A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, no 3, pp. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.
19. Pletnyakov V.A. (2012) The development of modern technologies to support management decision-making in strategic innovation. *Terra Economicus*, vol. 10, no 2.2, pp. 56–59 (in Russian).
20. Selyutina L.G. (2020) Development of modern technologies to support management decision-making in the service economy business. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “Economics of XXI century”, Novosibirsk, 23 October 2020, pp. 387–393 (in Russian).
21. Power D.J. (2001) Supporting decision-makers: An expanded framework. *Informing Science*, vol. 1, pp. 1901–1915. DOI: 10.28945/2384.
22. Power D.J. (2008) Understanding data-driven decision support systems. *Information Systems Management*, vol. 25, no 2, pp. 149–154. DOI: 10.1080/10580530801941124.
23. Chernikov A.D., Eremin N.A., Stolyarov V.E., Sboev A.G., Semenova-Chashchina O.K., Fitsner L.K. (2020) Application of artificial intelligence methods for identifying and predicting complications in the construction of oil and gas wells: Problems and solutions. *Georesources*, vol. 22, no 3, pp. 87–96 (in Russian). DOI: 10.18599/grs.2020.3.87-96.
24. Bondarenko I.S. (2021) The concept of the simulation model of the decision support system of the coal enterprise. *Vestnik Universiteta*, no 2, pp. 42–50. DOI: 10.26425/1816-4277-2021-2-42-50 (in Russian).
25. Kureichik V.M. (2012) Features of decision making support system design. *Izvestiya SFedU: Engineering Sciences*, vol. 7, pp. 92–98 (in Russian).
26. Kuziemski M., Misuraca G. (2020) AI governance in the public sector: Three tales from the frontiers of automated decision-making in democratic settings. *Telecommunications Policy*, vol. 44, no 6, article ID 101976. DOI: 10.1016/j.telpol.2020.101976.
27. Yeung K. (2020) Recommendation of the council on artificial intelligence (OECD). *International Legal Materials*, vol. 59, no 1, pp. 27–34. DOI: 10.1017/ilm.2020.5.
28. Kelley T.D. (2003) Symbolic and sub-symbolic representations in computational models of human cognition: What can be learned from biology? *Theory & Psychology*, vol. 13, no 6, pp. 847–860. DOI: 10.1177/0959354303136005.

29. Pylyshyn Z.W. (1989) Computing in cognitive science. *Foundations of cognitive science*. Cambridge, MA: MIT Press, pp. 51–91.
30. Smolensky P., Legendre G. (2006) *The harmonic mind: From neural computation to optimality-theoretic grammar. Vol. 1: Cognitive architecture*. Cambridge, MA: MIT Press.
31. Plate T.A. (1995) Holographic reduced representations. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 6, no 3, pp. 623–641. DOI: 10.1109/72.377968.
32. Kanerva P. (2009) Hyperdimensional computing: An introduction to computing in distributed representation with high-dimensional random vectors. *Cognitive Computation*, no 1, pp. 139–159. DOI: 10.1007/s12559-009-9009-8.
33. Schlegel K., Neubert P., Protzel P. (2020) *A comparison of vector symbolic architectures*. Working paper arXiv:2001.11797.
34. Kautz H. (2020) *The third AI summer: AAAI 2020 Robert S. Engelmore memorial award lecture*. Available at: https://youtu.be/_cQITY0SPiw (accessed 5 July 2021).
35. Mao J., Gan C., Kohli P., Tenenbaum J.B., Wu J. (2019) *The neuro-symbolic concept learner: Interpreting scenes, words, and sentences from natural supervision*. Working paper arXiv:1904.12584.
36. Johannesson P., Perjons E. (2014) *An introduction to design science*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-10632-8.
37. Höckmayr B.S. (2019) *Engineering service systems in the digital age*. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-658-26203-7.
38. vom Brocke J., Havner A., Maedche A. (2020) *Design science research: cases*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-46781-4.
39. Dresch A., Lacetda D.P., Antunes J.A.V. Jr. (2014) *Design science research. A method for science and technology advancement*. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-319-07374-3.
40. Alismail S., Zhang H., Chatterjee S. (2017) A framework for identifying design science research objectives for building and evaluating IT artifacts. Proceedings of the *International Conference on Design Science Research in Information System and Technology. Karlsruhe, Germany, 30 May – 1 June 2017*, pp. 218–230. DOI: 10.1007/978-3-319-59144-5_13.
41. Sutton R.T., Pincock D., Baumgart D.C., Sadowski D.C., Fedorak R.N., Kroeker, K.I. (2020) An overview of clinical decision support systems: benefits, risks, and strategies for success. *NPJ Digital Medicine*, no 3, article ID 17. DOI: 10.1038/s41746-020-0221-y.
42. Kasie F.M., Bright G., Walker A. (2017) Decision support systems in manufacturing: a survey and future trends. *Journal of Modelling in Management*, vol. 12, no 3, pp. 432–454. DOI: 10.1108/JM2-02-2016-0015.
43. Zhai Z., Martínez J.F., Beltran V., Martínez N.L. (2020) Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 170, article ID 105256. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105256.
44. Song K., Zeng X., Zhang Y., Jonckheere J., Yuan X., Koehl L. (2021) An interpretable knowledge-based decision support system and its applications in pregnancy diagnosis. *Knowledge-Based Systems*, vol. 221, article ID 106835. DOI: 10.1016/j.knosys.2021.106835.
45. Alavi B., Tavana M., Mina H. (2021) A dynamic decision support system for sustainable supplier selection in circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, vol. 27, pp. 905–920. DOI: 10.1016/j.spc.2021.02.015.
46. Sukenda S.T.M.T., Puspitarani Y., Wahyu A.P., Yustim B., Sunjana (2021) Fuzzy logic implementation using the Tsukamoto method as a decision support system in scholarship acceptance. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, vol. 12, no 11, pp. 1411–1417. DOI: 0.17762/turcomat.v12i11.6054.
47. Aggarwal L., Goswami P., Sachdeva S. (2021) Multi-criterion intelligent decision support system for COVID-19. *Applied Soft Computing*, vol. 101, article ID 107056. DOI: 10.1016/j.asoc.2020.107056.
48. Zong K., Yuan Y., Montenegro-Marin C.E., Kadry S.N. (2021) Or-based intelligent decision support system for e-commerce. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, vol. 16, no 4, pp. 1150–1164. DOI: 10.3390/jtaer16040065.
49. Lee N.-S., Mazur P., Bittner M., Schoder D. (2021) An intelligent decision-support system for air cargo palletizing. Proceedings of the *54th Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii, 5–8 January 2021*, p. 1405. DOI: 10.24251/HICSS.2021.170.
50. Labella A., Koasidis K., Nikas A., Arsenopoulos A., Doukas H. (2020) APOLLO: A fuzzy multi-criteria group decision-making tool in support of climate policy. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 13, no 1, pp. 1539–1553. DOI: 10.2991/ijcis.d.200924.002.
51. Simsek S., Genc O., Albizri A., Dinc S., Gonen B. (2020) Artificial neural network incorporated decision support tool for point velocity prediction. *Journal of Business Analytics*, vol. 3, no 1, pp. 67–78. DOI: 10.1080/2573234X.2020.1751569.
52. Souissi D., Zouhri L., Hammami S., Msaddek M.H., Zghibi A., Dlala M. (2020) GIS-based MCDM–AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. *Geocarto International*, vol. 35, no 9, pp. 991–1017. DOI: 10.1080/10106049.2019.1566405.
53. Sohaib O., Naderpour M., Hussain W., Martinez L. (2019) Cloud computing model selection for e-commerce enterprises using a new 2-tuple fuzzy linguistic decision-making method. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 132, pp. 47–58. DOI: 10.1016/j.cie.2019.04.020.
54. Dwi Putra M.S., Andryana S., Fauziah, Gunaryati A. (2018) Fuzzy analytical hierarchy process method to determine the quality of gemstones. *Advances in Fuzzy Systems*, vol. 2018, article ID 9094380. DOI: 10.1155/2018/9094380.
55. Jimenez Moya G.E., Zulueta Veliz Y. (2017) A 2-tuple linguistic multi-period decision making approach for dynamic green supplier selection. *DYNA*, vol. 84, no 202, pp. 199–206. DOI: 10.15446/dyna.v84n202.58032.
56. Yazgan H.R., Boran S., Goztepe K. (2009) An ERP software selection process with using artificial neural network based on analytic network process approach. *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no 5, pp. 9214–9222. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.12.022.
57. Weidong Z., Shiping G. (2009) Intelligent decision support system and its application in science research project selection. Proceedings of the *2009 First International Workshop on Education Technology and Computer Science. NW Washington, USA, 7–8 March 2009*, vol. 1, pp. 858–862. DOI: 10.1109/ETCS.2009.194.

58. Pal K., Palmer O. (2000) A decision-support system for business acquisitions. *Decision Support Systems*, vol. 27, no 4, pp. 411–429. DOI: 10.1016/S0167-9236(99)00083-4.
59. Voivontas D., Assimacopoulos D., Mourelatos A., Corominas J. (1998) Evaluation of renewable energy potential using a GIS decision support system. *Renewable Energy*, vol. 13, no 3, pp. 333–344. DOI: 10.1016/S0960-1481(98)00006-8.
60. Bengio Y., Deleu T., Rahaman N., Ke R., Lachapelle S., Bilaniuk O., Goyal A., Pal C. (2019) *A meta-transfer objective for learning to disentangle causal mechanisms*. Working paper arXiv:1901.10912.
61. Bader S., Hitzler P., Hölldobler S., Witzel A. (2007) A fully connectionist model generator for covered first-order logic programs. Proceedings of the *Twentieth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*. Hyderabad, India, 6–12 January 2007, pp. 666–671.
62. Pinkas G. (1995) Reasoning, nonmonotonicity and learning in connectionist networks that capture propositional knowledge. *Artificial Intelligence*, vol. 77, no 2, pp. 203–247. DOI: 10.1016/0004-3702(94)00032-V.
63. Pinkas G., Lima P., Cohen S. (2013) Representing, binding, retrieving and unifying relational knowledge using pools of neural binders. *Biologically Inspired Cognitive Architectures*, vol. 6, pp. 87–95. DOI: 10.1016/j.bica.2013.07.005.
64. Demidovskij A.V., Babkin E.A. (2020) Towards designing linguistic assessments aggregation as a distributed neuroalgorithm. Proceedings of the *2020 XXIII International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. St. Petersburg, Russia, 27–29 May 2020, pp. 161–164. DOI: 10.1109/SCM50615.2020.9198767.
65. Demidovskij A., Babkin E. (2020) Designing arithmetic neural primitive for sub-symbolic aggregation of linguistic assessments. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1680, no 1, article ID 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/1680/1/012007.
66. Graves A., Wayne G., Reynolds M., Harley T., Danihelka I., Grabska-Barwińska A., Colmenarejo S.G., Grefenstette E., Ramalho T., Agapiou J., Badia A.P., Hermann K.M., Zwols Y., Ostrovski G., Cain A., King H., Summerfield C., Blunsom P., Kavukcuoglu K., Hassabis D. (2016) Hybrid computing using a neural network with dynamic external memory. *Nature*, no 538, pp. 471–476. DOI: 10.1038/nature20101.
67. Zaremba W., Sutskever I. (2015) *Reinforcement learning neural Turing machines-revised*. Working paper arXiv:1505.00521.
68. Chen X., Xu H., Zhang Y., Tang J., Cao Y., Qin Z., Zha H. (2018) Sequential recommendation with user memory networks. Proceedings of the *Eleventh ACM International Conference on Web Search and Data Mining (WSDM '18)*, New York, 5–9 February 2018, pp. 108–116. DOI: 10.1145/3159652.3159668.
69. Grefenstette E., Hermann K. M., Suleyman M., Blunsom P. (2015) *Learning to transduce with unbounded memory*. Working paper arXiv:1506.02516.
70. Demidovskij A.V., Babkin E.A. (2019) Developing a distributed linguistic decision making system. *Business Informatics*, vol. 13, no 1, pp. 18–32. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.1.18.32.

About the authors

Alexander V. Demidovskij

Doctoral Student, Department of Information Systems and Technologies, National Research University Higher School of Economics, 25/12, Bolshaya Pecherskaya Street, Nizhny Novgorod 603155, Russia;

E-mail: ademidovskij@hse.ru

ORCID: 0000-0003-3605-6332

Eduard A. Babkin

Cand. Sci. (Tech.), PhD (Computer Science);

Professor, Department of Information Systems and Technologies, National Research University Higher School of Economics, 25/12, Bolshaya Pecherskaya Street, Nizhny Novgorod 603155, Russia;

E-mail: eababkin@hse.ru

ORCID: 0000-0003-2597-9043

Анализ влияния пресс-релизов ЦБ РФ на показатели денежного рынка

Д.А. Петрова 

E-mail: petrova-da@ranepa.ru

П.В. Трунин 

E-mail: pt@iep.ru

Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ
Адрес: 119571, г. Москва, проспект Вернадского, д. 82–84

Аннотация

Публикация пресс-релизов по принятым мерам денежно-кредитной политики играет важную роль в информационной политике центрального банка. В них обсуждаются принятые решения по ключевой ставке и содержатся сигналы о будущей направленности денежно-кредитной политики центрального банка. Сигналы о будущих действиях могут оказывать влияние на ожидания участников финансового рынка, повышать предсказуемость и эффективность денежно-кредитной политики. Существует не так много исследований, посвященных текстовому анализу пресс-релизов Банка России и построению количественных индикаторов информационных сигналов на их основе. По этой причине в данной статье проводится исследование влияния информационных сигналов о денежно-кредитной политике, содержащихся в пресс-релизах Банка России, на ставку денежного рынка, временной и кредитный спреда. Для определения информационных сигналов такого типа, во-первых, проводится тематическое моделирование всего корпуса пресс-релизов с помощью латентного размещения Дирихле. Во-вторых, проводится анализ тональности пресс-релизов по денежно-кредитной политике для определения сигналов о смягчении или ужесточении монетарной политики Банка России. В-третьих, проводится исследование влияния сигналов о будущем изменении денежно-кредитной политики на ключевые показатели денежного рынка в рамках экспоненциальной GARCH-модели. Результаты эмпирического исследования показали, что сигналы о будущем смягчении денежно-кредитной политики сопряжены со снижением ставки денежного рынка и временного спреда, а также соответствуют увеличению кредитного спреда. Результат оказался устойчивым к различным способам векторизации текста пресс-релизов. Статья подготовлена в рамках выполнения научно-исследовательской работы государственного задания РАНХиГС.

Ключевые слова: пресс-релиз; Банк России; текстовый анализ; анализ тональности; латентное размещение Дирихле; денежный рынок; МИАКР; временной спред; кредитный спред.

Цитирование: Петрова Д.А., Трунин П.В. Анализ влияния пресс-релизов ЦБ РФ на показатели денежного рынка // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 3. С. 24–34. DOI: [10.17323/2587-814X.2021.3.24.34](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.24.34)

Введение

В последние несколько десятилетий денежно-кредитная политика центральных банков претерпела множество изменений. На текущий момент традиционные инструменты, которыми пользуются центральные банки, успешно дополняются информационной политикой. Так, в докладах о денежно-кредитной политике, на пресс-конференциях, в пресс-релизах, выступлениях в СМИ и т.д. обсуждаются принимаемые решения, текущая экономическая ситуация и будущие перспективы. В таком случае повышение степени прозрачности центрального банка может приводить к снижению асимметрии информации среди экономических агентов и улучшить эффективность проводимой монетарной политики в условиях неопределенности. Появление новой информации о текущей экономической ситуации до принятия решений агентами способствует лучшей оценке рисков, принятию более обоснованных решений и повышению общественного благосостояния [1–5].

Сигналы в отношении будущей направленности денежно-кредитной политики остаются широко распространенным способом воздействовать на участников финансового рынка, но напрямую о конкретных сроках изменения процентной политики представителями центрального банка не сообщается [6, 7]. Участники финансового рынка могут слишком сильно отреагировать на заявления денежных властей, пересматривая ожидания на основе всей доступной информации и внося значительные изменения, что осложнит достижение целей центрального банка. По этой причине большинство центральных банков подают косвенные сигналы о будущей направленности денежно-кредитной политики, чтобы сохранить правдоподобность передаваемой информации [8].

В результате информационная политика стала важным инструментом для центральных банков, позволяющим эффективно управлять ожиданиями экономических агентов [9], повысить предсказуемость решений в области денежно-кредитной политики [10] и способствовать достижению макроэкономических целей центрального банка [11–15].

В этой связи представляет интерес исследование степени воздействия информационной политики Банка России на поведение участников финансовых рынков. В рамках данного исследования проводится анализ влияния информационных сигналов о будущей направленности денежно-кредитной политики (ДКП), содержащихся в пресс-релизах Бан-

ка России, на показатели денежного рынка. Количественные показатели информационных сигналов оценены с использованием модели латентного размещения Дирихле (latent Dirichlet allocation, LDA) и словаря для определения тональности за период с января 2013 г. по май 2020 г.

Статья имеет следующую структуру. В разделе 1 обсуждаются результаты международных и российских исследований влияния информационных сигналов на показатели финансовых рынков. В разделе 2 приведена методология оценки количественных индикаторов, получаемых из неструктурированных данных корпуса пресс-релизов Банка России. В разделе 3 показаны результаты эконометрического анализа влияния информационных сигналов о будущей направленности ДКП на показатели денежного рынка России.

1. Обзор литературы

Для количественной оценки сигналов центрального банка могут быть использованы различные информационные источники — пресс-релизы [16], выступления и заявления в СМИ [17], посты в социальных сетях [18] и т.д. Поскольку данные такого типа являются неструктурированными, распространенным подходом к построению количественных индикаторов является использование словарей позитивных и негативных слов или методов машинного обучения для определения тональности материалов. Кроме того, для оценки важности различных экономических вопросов в материалах центральных банков в отдельные моменты времени также может применяться тематическое моделирование корпуса документов.

В работе [19] проводится текстовый анализ на основе словаря заявлений Комитета по операциям на открытом рынке ФРС США в период с января 1998 г. по декабрь 2014 г. для оценки направленности денежно-кредитной политики и ее влияния на экономические и финансовые показатели. Результаты исследования свидетельствуют о важности информационных сигналов для финансовых рынков: в целом при смягчении денежно-кредитной политики в будущем повышается оптимизм инвесторов. Но при этом не было выявлено значимой реакции реальных экономических переменных, за исключением показателей рынка труда.

В работе [20] анализируется влияние протоколов заседания Банка Англии на фьючерсную процентную ставку за период с июля 1999 г. по март 2014 г.

Авторами было выявлено, что количественные индикаторы информационных сигналов, полученные с помощью латентного размещения Дирихле и словаря, улучшают точность прогнозов фьючерсных ставок в течение следующих 12 месяцев.

В исследовании [21] осуществляется построение индекса финансовой стабильности на основе текстового анализа отчетов по финансовой стабильности 35 центральных банков, а также исследуется его влияние на финансовые показатели банковского сектора в течение 2005–2015 гг. В целом авторы показали, что индекс финансовой стабильности, построенный на основе коммуникаций центральных банков, может быть хорошим индикатором для предсказания банковского кризиса.

В работе [22] представлен текстовый анализ протоколов заседаний FOMC с помощью латентного размещения Дирихле для оценки их влияния на показатели финансовых рынков США с января 1995 г. по октябрь 2019 г. Автор сделал вывод, что для временного спреда процентных ставок наиболее важными¹ темами оказались «экономический рост», «цены», «рыночные условия», «операции на открытом рынке» и «инфляционные ожидания», а для дефолтного спреда — «экономический рост», «операции на открытом рынке», «рынок труда» и «банковское кредитование».

Также имеются работы, в которых исследуется влияние на ожидания экономических агентов не только материалов центрального банка, но и заявлений представителей центрального банка в СМИ. В таких работах предполагается, что частный сектор получает и обрабатывает всю доступную информацию, включая такие каналы, как СМИ. Новостные агентства по-своему интерпретируют материалы центрального банка и публикуют мнения представителей монетарных властей. По этой причине в статье [23] исследуется, какой из этих двух источников в большей степени влияет на волатильность процентных ставок в Канаде с декабря 2000 г. по сентябрь 2008 г. Авторы использовали три типа информационных сигналов ЦБ: пресс-релизы по принятым решениям относительно процентных ставок после заседания Совета директоров Банка Канады, доклады о денежно-кредитной политике и новостные статьи, содержащие информацию о

принятых Банком Канады решениях. Результаты показали, что существует разница между источниками информации — пресс-релизами центрального банка и новостями. Обсуждение макроэкономической тематики или ключевых рисков в пресс-релизах, в отличие от новостей в СМИ, может оказывать успокаивающее воздействие на финансовый рынок и вести к снижению волатильности фьючерсных ставок.

В российской литературе также можно выделить ряд исследований в области анализа информационных сигналов Банка России. Так в исследовании [24] было выявлено значимое влияние заявлений Совета директоров ЦБ РФ о будущей направленности денежно-кредитной политики на ставку денежного рынка и курс рубля к доллару за период с апреля 2013 г. по сентябрь 2016 г.

В работе [25] проводится исследование влияния заявлений представителей ЦБ РФ и публикаций пресс-центра ЦБ РФ на курс рубля к доллару. Результаты исследования показали, что материалы ЦБ РФ, содержащие высказывания об инфляционных рисках и волатильности обменного курса, сопряжены с обесценением курса рубля к доллару за период с ноября 2014 г. по декабрь 2016 г.

Однако важно отметить, что в проведенных исследованиях не изучалось влияние информационных сигналов Банка России на временную структуру процентных ставок. В данной статье приводятся результаты оценки влияния информационных сигналов Банка России на различные показатели денежного рынка. В качестве источника информационных сигналов рассматриваются пресс-релизы ЦБ РФ за период с января 2013 г. по май 2020 г. Текстовый анализ пресс-релизов ЦБ РФ проводится с помощью тематического моделирования, а тональность определяется на основе словаря позитивных и негативных слов.

2. Текстовый анализ пресс-релизов Банка России

В данном разделе описывается методология для оценки информационных сигналов² о будущей направленности денежно-кредитной политики. Как было отмечено ранее, при обсуждении различных эмпирических исследований, посвященных анали-

¹ Результаты оценки модели лассо для отбора наиболее значимых переменных

² Под информационным сигналом Банка России понимается информация в пресс-релизах о причинах возможного изменения денежно-кредитной политики, в частности, экономических перспектив и инфляционных рисков

зу новостей и материалов центральных банков, популярным подходом к получению количественных индикаторов на основе анализа текстов является тематическое моделирование и анализ тональности с помощью словаря. В частности, исследователи применяют модель латентного размещения Дирихле [26], которая обладает хорошей интерпретируемостью получаемых тем и возможностью последующего использования предобученной модели для кластеризации новых документов по уже определенным темам. По этой причине в данной работе отдается предпочтение именно латентному размещению Дирихле. Далее более подробно остановимся на конкретной спецификации и методе ее оценивания.

В работе используются пресс-релизы³ Банка России, которые содержат информационные сигналы о будущей направленности денежно-кредитной политики, принимаемых решениях по кредитным и депозитным аукционам, отзыву лицензий и т.д.

На этапе предобработки данных применяются стандартные процедуры: удаление стоп-слов⁴ и редких слов, лемматизация для русского языка с помощью пакета *ru morphology2* на языке программирования Python. Векторизация осуществлялась двумя способами — с использованием мешка слов⁵ и *tf-idf*⁶.

Остановимся более подробно на модели латентного размещения Дирихле, оцененной в *Gensim* на языке программирования Python с помощью онлайн-алгоритма вариационного байесовского вывода [27]. Как говорилось ранее, она является вероятностной моделью для кластеризации новостных статей или пресс-релизов по смеси тем. Кроме того, LDA позволяет вычислить вероятности появления слов в определенной теме и вероятности каждой из тем для корпуса документов. Распределение слов характеризует смысл каждой темы, поскольку наиболее часто встречающимся словам в текстах, отне-

сенных к данной теме, присваивается больший вес. Полученное распределение тем для корпуса пресс-релизов делает возможным определение того, какая из тем является популярной в течение выбранного промежутка времени, при котором каждое слово из пресс-релиза принадлежит с определенной вероятностью⁷ скрытой теме. Текст пресс-релиза Банка России представляется как смесь заданных тем с вероятностью:

$$p(\theta, z, w | \alpha, \beta) = p(\theta | \alpha) \prod_{n=1}^N p(z_n | \theta) p(w_n | z_n, \beta), \quad (1)$$

где θ — совместное распределение тем;

w_n — n -е слово в тексте;

z_n — распределение слов в каждой теме;

α, β — гиперпараметры, характеризующие разреженность тем в документе и разреженность распределения слов в темах, соответственно.

Для пресс-релизов ЦБ РФ в рамках модели LDA оптимальными оказались 25 тем при векторизации «мешок слов» и 20 тем при векторизации *tf-idf*.

В эконометрическом анализе будут рассматриваться только сигналы о будущей направленности денежно-кредитной политики. При тематическом моделировании были получены соответствующие темы — Тема 7 (рис. 1) с векторизацией «мешок слов» и Тема 19 (рис. 2) с векторизацией *tf-idf*. На рисунках 1 и 2 можно увидеть топ-20 слов из распределения для изучаемых тем, которые позволяют соотнести их с интересующей нас тематикой информационных сигналов.

Будущая направленность денежно-кредитной политики Банка России в пресс-релизах определяется на основе словаря позитивных и негативных слов. Для каждого из отфильтрованных пресс-релизов⁸ на основе словаря рассчитывалась мера чистого оптимизма [28]:

³ Для обучения моделей латентного размещения Дирихле использовался расширенный корпус пресс-релизов за период с января 2010 г. по май 2020 г. для увеличения выборки и более качественной кластеризации

⁴ Слова, часто встречающиеся и не отражающие смысл в тексте

⁵ При данном подходе не учитывается порядок слов в тексте, и подсчитывается лишь частота их появления

⁶ Модификация метода мешка слов — словарная частота, обратная документной частоте (*tf-idf*): чем чаще слово появляется в пресс-релизах, тем вероятнее, что оно важно для данного текста (*tf*, частота слов). Если слово встречается в большей части корпуса новостей, то оно становится менее значимым для отдельного текста (*idf*, частота в документе)

⁷ В данном случае рассматриваются вероятности встретить j -е слово в тексте пресс-релиза, отнесенного к i -й теме

⁸ Отбирались пресс-релизы, которые были отнесены к данной теме с вероятностью не менее 20%

$$S(A) = \frac{W_{pos}(A) - W_{neg}(A)}{W_{tot}(A)} \in [-1; 1], \quad (2)$$

где A — пресс-релиз, для которого рассчитывается тональность;

$S(A)$ — индикатор оптимизма, построенный на основе анализа пресс-релизов;

$W_{pos}(A)$ — количество слов с позитивной тональностью;

$W_{neg}(A)$ — количество слов с негативной тональностью;

$W_{tot}(A)$ — общее количество слов.

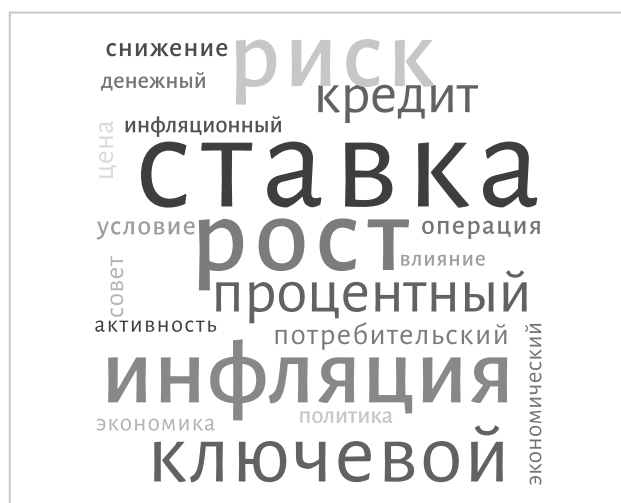


Рис. 1. Тема 7 «Сигналы ЦБ РФ о будущей направленности ДКП» в модели LDA с векторизацией «мешок слов»



Рис. 2. Тема 19 «Сигналы ЦБ РФ о будущей направленности ДКП» в модели LDA с tf-idf

Полученный индикатор тональности $S(A)$ нужно интерпретировать следующим образом. Если значения положительные, то индикатор предполагает смягчение денежно-кредитной политики. Наоборот, если $S(A)$ меньше нуля, то это свидетельствует об ужесточении монетарной политики в будущем.

Итоговые индикаторы информационных сигналов Банка России рассчитывались как произведение вероятности отнесения пресс-релиза к соответствующей теме и индикатора тональности:

$$toptone = topic7 \cdot S(A_{tfidf}) \quad (3)$$

$$toptone_tfidf = topic19 \cdot S(A_{tfidf}) \quad (4)$$

где $toptone$ и $toptone_tfidf$ — информационные сигналы Банка России с векторизацией «мешок слов» и tf-idf, соответственно;

$topic7$ и $topic19$ — Тема 7 и Тема 19 из моделей LDA с векторизацией «мешок слов» и tf-idf, соответственно;

$S(A_{bg})$ и $S(A_{tfidf})$ — тональность пресс-релизов с векторизацией «мешок слов» и tf-idf, соответственно.

3. Эконометрический анализ влияния сигналов Банка России на показатели денежного рынка

При проведении эконометрического анализа влияния сигналов Банка России о будущей направленности денежно-кредитной политики на различные показатели денежного рынка применяется подход экспоненциальной GARCH-модели. EGARCH позволяет одновременно оценить влияние информационных сигналов ЦБ РФ на условное среднее и условную дисперсию показателей денежного рынка, а также учитывать эффект рычага⁹ и не накладывает ограничений на коэффициенты в уравнении для волатильности по сравнению с GARCH.

В модели использовались индикаторы сигналов ЦБ РФ двух типов « $toptone$ » и « $toptone_tfidf$ ». Тип « $toptone$ » — это сигналы о будущем изменении денежно-кредитной политики, полученной на основе пресс-релизов в модели латентного размещения Дирихле с векторизацией «мешок слов», а « $toptone_tfidf$ » — сигналы о будущем изменении денежно-кредитной политики, полученной на основе пресс-релизов в модели латентного размещения Дирихле с векторизацией tf-idf. Индикаторы сиг-

⁹ Для волатильности характерна асимметричная реакция на плохие и хорошие новости

налов ЦБ РФ «toptone» и «toptone_tfids» в уравнениях условного среднего нужно интерпретировать следующим образом: при повышении индикаторов информационных сигналов предполагается смягчение ДКП, следовательно, снижение ставок на денежном рынке.

Оцененная EGARCH(1,1) модель имеет следующий вид:

$$y_t = c + \delta_1 \text{signal}_{t-1} + \delta_2 \text{dlogbrent}_t + X_t + \varepsilon_t, \quad (5)$$

$$\log(\sigma_t^2) = \omega + \alpha \left[\frac{\varepsilon_{t-1}}{\sigma_{t-1}} \right] + \beta \log(\sigma_{t-1}^2) + \gamma \frac{\varepsilon_{t-1}}{\sigma_{t-1}} + \lambda_1 \text{signal}_{t-1} + \lambda_2 \text{dlogbrent}_t, \quad (6)$$

где y_t – прирост однодневной ставки денежного рынка МИАКР, прирост спреда 10- и 2-летних государственных облигаций, прирост спреда 10-летних и 3-месячных государственных облигаций, прирост спреда эффективной доходности корпоративных облигаций (индекс CBONDS) и 10-летних государственных облигаций;

c – константа в уравнении условного среднего;

signal – один из индикаторов сигналов ЦБ РФ: «toptone» в спецификации 1 или «toptone_tfids» в спецификации 2;

X_t – контрольная переменная, в частности для однодневной ставки МИАКР в модель включалась переменная dlogcorr_t – прирост логарифма остатков на корреспондентских счетах¹⁰;

dlogbrent_t – прирост логарифма цены на нефть марки Brent (Источник: ФИНАМ);

σ_t^2 – условная дисперсия;

ε_t – случайные ошибки.

Результаты эконометрического анализа представлены в *таблицах 1–4*. Для всех показателей денежного рынка было выявлено значимое снижение волатильности при увеличении цен на нефть. Это можно объяснить предположением, что улучшение условий торговли повышает оптимизм экономических агентов и снижает неопределенность на финансовых рынках.

Для ставки МИАКР были получены ожидаемые результаты. Ожидаемое в будущем смягчение денежно-кредитной политики будет сопряжено со снижением однодневной ставки МИАКР (*таблица 1*) на

0,275 п.п. при векторизации «мешок слов» и на 0,16 п.п. при векторизации tf-idf. Результат устойчив и значим для всех переменных информационных сигналов. Также информация об ожидаемом смягчении ДКП снижает неопределенность на денежном рынке, что становится причиной снижения волатильности ставки МИАКР. Повышение ликвидности на корреспондентских счетах было сопряжено со снижением ставки МИАКР в среднем на 0,07 п.п.

Таблица 1.
Результаты оценки EGARCH(1,1)
для МИАКР

Переменная	Спецификация 1	Спецификация 2
Уравнение условного среднего		
dlogbrent_t	–0,668***	–0,667***
toptone_{t-1}	–0,275***	–
$\text{toptone_tfids}_{t-1}$	–	–0,160***
dlogcorr_t	–0,07***	–0,067***
Уравнение условной дисперсии		
γ	0,032**	0,032
toptone_{t-1}	–2,857***	–
$\text{toptone_tfids}_{t-1}$	–	–2,324**
dlogbrent_t	–6,759***	–6,870**
LL	332,354	331,51
AIC	–0,354	–0,353
SIC	–0,324	–0,323

Примечание: Уровни значимости *** – 1%, ** – 5%, * – 10%.
В круглых скобках представлены стандартные ошибки.

Повышение цен на нефть соответствует снижению ставки МИАКР в среднем на 0,667 п.п., поскольку происходит улучшение условий торговли, снижение инфляционных рисков и, возможно, смягчение денежно-кредитной политики.

Результаты для спреда 10- и 2-летних и спреда 10-летних и 3-месячных доходностей государственных облигаций представлены в *таблицах 2 и 3*. Повышение цен на нефть также приводит к снижению

¹⁰ Это позволяет учесть в модели влияние изменения ликвидности в банковском секторе

временных спредов. Было выявлено, что сигнал о смягчении денежно-кредитной политики предшествует повышению временного спреда 10- и 2-летних доходностей государственных облигаций в среднем на 0,074 п.п., а спреда 10-летних и 3-месячных доходностей государственных облигаций на 0,059 п.п. при векторизации «мешок слов».

Таблица 2.
Результаты оценки EGARCH(1,1)
для спреда 10- и 2-летних
государственных облигаций

Переменная	Спецификация 1	Спецификация 2
Уравнение условного среднего		
$dlogbrent_t$	-0,296***	-0,294***
$toptone_{t-1}$	0,086***	–
$toptone_tfidf_{t-1}$	–	0,062***
Уравнение условной дисперсии		
γ	0,013	0,013
$toptone_{t-1}$	-0,458	–
$toptone_tfidf_{t-1}$	–	-0,380
$dlogbrent_t$	-2,760***	-2,765***
LL	2505,54	2504,73
AIC	-2,745	-2,744
SIC	-2,717	-2,717

Примечание: Уровни значимости *** – 1%, ** – 5%, * – 10%.
В круглых скобках представлены стандартные ошибки.

В литературе это объясняется тем, что в краткосрочном и среднесрочном периодах ставки снижаются сильнее при ожидаемом смягчении ДКП, по сравнению с долгосрочным периодом. Если выполняется гипотеза ожиданий относительно временной структуры процентных ставок и наблюдается жесткость цен, то за счет большего снижения ставок в краткосрочном периоде может увеличиться экономическая активность.

Таблица 3.

Результаты оценки EGARCH(1,1)
для спреда 10-летних и 3-месячных
государственных облигаций

Переменная	Спецификация 1	Спецификация 2
Уравнение условного среднего		
$dlogbrent_t$	-0,429***	-0,430***
$toptone_{t-1}$	0,059***	–
$toptone_tfidf_{t-1}$	–	0,022
Уравнение условной дисперсии		
γ	0,148***	0,147***
$toptone_{t-1}$	-0,343	–
$toptone_tfidf_{t-1}$	–	-1,086
$dlogbrent_t$	-3,734***	-3,775***
LL	1377,405	1377,84
AIC	-1,505	-1,505
SIC	-1,477	-1,478

Примечание: Уровни значимости *** – 1%, ** – 5%, * – 10%.
В круглых скобках представлены стандартные ошибки.

Для волатильности спреда 10-летних и 3-месячных государственных облигаций была выявлена асимметричная реакция волатильности на положительные и негативные шоки. Волатильность сильнее растет при повышении спреда.

Что касается кредитного спреда (разницы между доходностями корпоративных облигаций и долгосрочными 10-летними государственными облигациями), то смягчение денежно-кредитной политики соответствует его снижению в среднем на 0,065 п.п. (таблица 4). Это объясняется балансовым каналом трансмиссионного механизма денежно-кредитной политики¹¹.

При снижении процентной ставки центральным банком происходит увеличение чистого богатства компаний при снижении внешней финансовой премии по корпоративным облигациям¹². В свою

¹¹ Балансовый канал показывает, как изменение процентной ставки влияет на благосостояние экономических агентов через изменение цен на финансовые активы, которые являются частью чистого богатства и могут быть использованы в качестве залога для кредиторов. В свою очередь, изменение цен на финансовые активы влияет на оценку риска дефолта для экономических агентов

¹² Внешняя финансовая премия – разница между издержками привлечения финансирования за счет продажи акций или облигаций и издержками использования средств от основной экономической деятельности

Таблица 4.

**Результаты оценки EGARCH(1,1)
для спреда доходностей корпоративных
и 10-летних государственных облигаций**

Переменная	Спецификация 1	Спецификация 2
Уравнение условного среднего		
$dlogbrent_t$	0,398***	0,40***
$toptone_{t-1}$	-0,056***	–
$toptone_tfidf_{t-1}$	–	-0,073***
Уравнение условной дисперсии		
γ	-0,049	-0,05
$toptone_{t-1}$	-0,256	–
$toptone_tfidf_{t-1}$	–	-1,347
$dlogbrent_t$	-4,707***	-4,749***
LL	1639,891	1642,158
AIC	-1,793	-1,796
SIC	-1,766	-1,768

Примечание: Уровни значимости *** – 1%, ** – 5%, * – 10%.
В круглых скобках представлены стандартные ошибки.

очередь, доходность по корпоративным облигациям снижается сильнее, чем долгосрочная доходность государственных облигаций, поскольку наряду со снижением ключевой ставки происходит снижение риска дефолта.

В целом результаты показали, что информационные сигналы о будущем изменении ДКП, содер-

жащиеся в пресс-релизах Банка России, являются важным источником информации при пересмотре решений участниками денежного рынка.

Заключение

С 2013 года информационная политика Банка России стала важным инструментом денежно-кредитной политики. В этой связи в данной статье была осуществлена попытка исследования степени эффективности информационных сигналов Банка России за период 2013–2020 гг. Для идентификации информационных сигналов осуществлен текстовый анализ пресс-релизов Банка России. На первом этапе было проведено тематическое моделирование корпуса пресс-релизов для определения важности различных экономических вопросов в отдельные моменты времени. На втором этапе для оценки направленности информационных сигналов ДКП применялся словарь позитивных и негативных слов.

В целом результаты свидетельствуют о том, что информационные сигналы Банка России играют важную роль при формировании ожиданий рыночными игроками, что было проиллюстрировано для различных показателей денежного рынка. Ожидаемое смягчение денежно-кредитной политики Банком России было сопряжено с падением однодневной ставки МИАКР, сужением временного спреда и ростом кредитного спреда. По сравнению с международным опытом, где показано снижение неопределенности при смягчении ДКП, не было выявлено влияние информационных сигналов на волатильность показателей денежного рынка, за исключением ставки МИАКР. ■

Литература

- Morris S., Shin H.S. Social value of public information // American Economic Review. 2002. Vol. 92. No 5. P. 1521–1534. DOI: 10.1257/000282802762024610.
- Svensson L.E.O. Social value of public information: Comment: Morris and Shin (2002) is actually pro-transparency, not con. // American Economic Review. 2006. Vol. 96. No 1. P. 448–452. DOI: 10.1257/000282806776157650.
- Angeletos G.M., Pavan A. Transparency of information and coordination in economies with investment complementarities // American Economic Review. 2004. Vol. 94. No 2. P. 91–98. DOI: 10.1257/0002828041301641.
- Cornand C., Heinemann F. Optimal degree of public information dissemination // The Economic Journal. 2008. Vol. 118. No 528. P. 718–742. DOI: 10.1111/j.1468-0297.2008.02139.x.
- Hellwig C. Heterogeneous information and the benefits of transparency / 2005. [Электронный ресурс]: <http://idei.fr/sites/default/files/medias/doc/conf/jil/papers/135hellwig.pdf> (дата обращения 01.02.2021).
- Rudebusch G.D., Williams J.C. Revealing the secrets of the temple: The value of publishing central bank interest rate projections // Asset Prices and Monetary Policy. Chicago: University of Chicago Press, 2008. P. 247–289.
- Faust J., Leeper E.M. Forecasts and inflation reports: An evaluation. Washington, DC: Federal Reserve Board. 2005.

8. Woodford M. Central bank communication and policy effectiveness. Working Paper 11898. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2005. DOI: 10.3386/w11898.
9. Woodford M. Monetary policy in the information economy. Working Paper 8674. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2001. DOI: 10.3386/w8674.
10. Mizen P. What can we learn from central bankers' words? Some nonparametric tests for the ECB // *Economics Letters*. 2009. Vol. 103. No 1. P. 29–32. DOI: 10.1016/j.econlet.2009.01.013.
11. Central bank communication and monetary policy: A survey of theory and evidence / A.S. Blinder [et al.] // *Journal of Economic Literature*. 2008. Vol. 46. No 4. P. 910–945. DOI: 10.1257/jel.46.4.910.
12. Guthrie G., Wright J. Open mouth operations // *Journal of Monetary Economics*. 2000. Vol. 46. No 2. P. 489–516. DOI: 10.1016/S0304-3932(00)00035-0.
13. Hansen S., McMahon M., Tong M. The long-run information effect of central bank communication // *Journal of Monetary Economics*. 2019. Vol. 108. P. 185–202. DOI: 10.1016/j.jmoneco.2019.09.002.
14. Rosa C., Verga G. On the consistency and effectiveness of central bank communication: Evidence from the ECB // *European Journal of Political Economy*. 2007. Vol. 23. No 1. P. 146–175. DOI: 10.1016/j.ejpoleco.2006.09.016.
15. Ehrmann M., Fratzscher M. Communication by central bank committee members: different strategies, same effectiveness? // *Journal of Money, Credit and Banking*. 2007. Vol. 39. No 2–3. P. 509–541. DOI: 10.1111/j.0022-2879.2007.00034.x.
16. Ehrmann M., Talmi J. Starting from a blank page? Semantic similarity in central bank communication and market volatility // *Journal of Monetary Economics*. 2020. Vol. 111. P. 48–62. DOI: 10.1016/j.jmoneco.2019.01.028.
17. Fišer R., Horvath R. Central bank communication and exchange rate volatility: a GARCH analysis // *Macroeconomics and Finance in Emerging Market Economies*. 2010. Vol. 3. No 1. P. 25–31. DOI: 10.1080/17520840903498099.
18. Azar P.D., Lo A.W. The wisdom of Twitter crowds: Predicting stock market reactions to FOMC meetings via Twitter feeds // *The Journal of Portfolio Management*. 2016. Vol. 42. No 5. P. 123–134. DOI: 10.3905/jpm.2016.42.5.123.
19. Hansen S., McMahon M. Shouting language: Understanding the macroeconomic effects of central bank communication // *Journal of International Economics*. 2016. Vol. 99. Suppl. 1. P. S114–S133. DOI: 10.1016/j.jinteco.2015.12.008.
20. Moniz A., de Jong F. Predicting the impact of central bank communications on financial market investors' interest rate expectations // *Proceedings of the European Semantic Web Conference (ESWC 2014)*. Anissaras, Crete, Greece, 25–29 May 2014. P. 144–155. DOI: 10.1007/978-3-319-11955-7_12.
21. Correa R., Garud K., Londono J.M., Mislang N. Sentiment in central banks' financial stability reports // *Review of Finance*. 2021. Vol. 25. No 1. P. 85–120. DOI: 10.1093/rof/rfaa014.
22. Filatov D. Central banks communication and the state of the economy // SSRN, 2020. [Электронный ресурс]: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3519846 (дата обращения 01.02.2021). DOI: 10.2139/ssrn.3519846.
23. Hendry S. Central bank communication or the media's interpretation: What moves markets? // *Staff Working Papers* // Bank of Canada. 2012. No 12–9.
24. Анализ информационной политики Банка России / С.М. Дробышевский и [др.] // *Вопросы экономики*. 2017. № 10. С. 88–110. DOI: 10.32609/0042-8736-2017-10-88-110.
25. Кузнецова О.С., Ульянова С.Р. Валютный курс и вербальные интервенции Банка России и органов государственной власти // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. 2018. Т. 22. № 2. С. 228–250. DOI: 10.17323/1813-8691-2018-22-2-228-250.
26. Blei D.M., Ng A.Y., Jordan M.I. Latent Dirichlet allocation // *The Journal of Machine Learning Research*. 2003. No 3. P. 993–1022.
27. Hoffman M., Bach F.R., Blei D.M. Online learning for latent Dirichlet allocation // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2010. No 23. P. 856–864.
28. Förschler F., Alfano S. Reading between the lines: The effect of language sentiment on economic indicators // *Proceedings of the 8th International Workshop on Enterprise Applications, Markets and Services in the Finance Industry (FinanceCom 2016)*. Frankfurt, Germany, 8 December 2016. P. 89–104. DOI: 10.1007/978-3-319-52764-2_7.

Об авторах

Петрова Диана Абдумуниновна

научный сотрудник Центра изучения проблем центральных банков, Институт прикладных экономических исследований, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, 119571, г. Москва, проспект Вернадского, д. 82–84;

E-mail: petrova-da@ranepa.ru

ORCID: 0000-0003-1030-4932

Трунин Павел Вячеславович

доктор экономических наук;

директор Центра изучения проблем центральных банков, Институт прикладных экономических исследований, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, 119571, г. Москва, проспект Вернадского, д. 82–84; руководитель научного направления «Макроэкономика и финансы» Института экономической политики им. Е.Т. Гайдара, 125993, г. Москва, Газетный пер., д. 5, стр. 3;

E-mail: pt@iep.ru

ORCID: 0000-0001-8306-9422

Analysis of the impact of central bank communications on money market indicators

Diana A. Petrova

E-mail: petrova-da@ranepa.ru

Pavel V. Trunin

E-mail: pt@iep.ru

Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration
Address: 84, Prospect Vernadskogo, Moscow 119571, Russia

Abstract

Press releases on monetary policy play an important role in the communication policy of the central bank. These press releases explain key rate decisions and provide signals about the future direction of the central bank's monetary policy. Information signals can influence the expectations of financial market participants and increase the predictability and effectiveness of monetary policy. There are not enough research papers dedicated to the text analysis of the Bank of Russia press releases and the assessment of information signals. Hence, this article examines the impact of information signals about monetary policy on the money market rate, term and credit spreads. First, we estimate latent Dirichlet allocation to determine the topics of information signals. Second, we use sentiment analysis to construct signals about easing or tightening of the monetary policy. Third, the impact of signals about the future monetary policy on the money market indicators is assessed using the exponential GARCH model. Empirical research has shown that signals of future monetary policy easing are associated with lower money market rates and term spreads, and an increase in the credit spread. The result proved to be resistant to various ways of vectorizing the text of press releases. The article was prepared as a part of the state assignment research of Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.

Key words: press release; Bank of Russia; text analysis; sentiment analysis; latent Dirichlet allocation; money market; MIACR; term spread; credit spread.

Citation: Petrova D.A., Trunin P.V. (2021) Analysis of the impact of central bank communications on money market indicators. *Business Informatics*, vol. 15, no 3, pp. 24–34. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.24.34

References

1. Morris S., Shin H.S. (2002) Social value of public information. *American Economic Review*, vol. 92, no 5, pp. 1521–1534. DOI: 10.1257/000282802762024610.
2. Svensson L.E.O. (2006) Social value of public information: Comment: Morris and Shin (2002) is actually pro-transparency, not con. *American Economic Review*, vol. 96, no 1, pp. 448–452. DOI: 10.1257/000282806776157650.
3. Angeletos G.M., Pavan A. (2004) Transparency of information and coordination in economies with investment complementarities. *American Economic Review*, vol. 94, no 2, pp. 91–98. DOI: 10.1257/0002828041301641.
4. Cornand C., Heinemann F. (2008) Optimal degree of public information dissemination. *The Economic Journal*, vol. 118, no 528, pp. 718–742. DOI: 10.1111/j.1468-0297.2008.02139.x.
5. Hellwig C. (2005) *Heterogeneous information and the benefits of transparency*. Available at: <http://idei.fr/sites/default/files/medias/doc/conf/jil/papers/135hellwig.pdf> (accessed 01 February 2021).
6. Rudebusch G.D., Williams J.C. (2008) Revealing the secrets of the temple: The value of publishing central bank interest rate projections. *Asset Prices and Monetary Policy*. Chicago: University of Chicago Press, pp. 247–289.
7. Faust J., Leeper E.M. (2005) *Forecasts and inflation reports: An evaluation*. Washington, DC: Federal Reserve Board.
8. Woodford M. (2005) *Central bank communication and policy effectiveness*. Working Paper 11898. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: 10.3386/w11898.
9. Woodford M. (2001) *Monetary policy in the information economy*. Working Paper 8674. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: 10.3386/w8674.

10. Mizen P. (2009) What can we learn from central bankers' words? Some nonparametric tests for the ECB. *Economics Letters*, vol. 103, no 1, pp. 29–32. DOI: 10.1016/j.econlet.2009.01.013.
11. Blinder A.S., Ehrmann M., Fratzscher M., De Haan J., Jansen D.J. (2008) Central bank communication and monetary policy: A survey of theory and evidence. *Journal of Economic Literature*, vol. 46, no 4, pp. 910–945. DOI: 10.1257/jel.46.4.910.
12. Guthrie G., Wright J. (2000) Open mouth operations. *Journal of Monetary Economics*, vol. 46, no 2, pp. 489–516. DOI: 10.1016/S0304-3932(00)00035-0.
13. Hansen S., McMahon M., Tong M. (2019) The long-run information effect of central bank communication. *Journal of Monetary Economics*, vol. 108, pp. 185–202. DOI: 10.1016/j.jmoneco.2019.09.002.
14. Rosa C., Verga G. (2007) On the consistency and effectiveness of central bank communication: Evidence from the ECB. *European Journal of Political Economy*, vol. 23, no 1, pp. 146–175. DOI: 10.1016/j.ejpol.2006.09.016.
15. Ehrmann M., Fratzscher M. (2007) Communication by central bank committee members: different strategies, same effectiveness? *Journal of Money, Credit and Banking*, vol. 39, no 2–3, pp. 509–541. DOI: 10.1111/j.0022-2879.2007.00034.x.
16. Ehrmann M., Talmi J. (2020) Starting from a blank page? Semantic similarity in central bank communication and market volatility. *Journal of Monetary Economics*, vol. 111, pp. 48–62. DOI: 10.1016/j.jmoneco.2019.01.028.
17. Fišer R., Horvath R. (2010) Central bank communication and exchange rate volatility: a GARCH analysis. *Macroeconomics and Finance in Emerging Market Economies*, vol. 3, no 1, pp. 25–31. DOI: 10.1080/17520840903498099.
18. Azar P.D., Lo A.W. (2016) The wisdom of Twitter crowds: Predicting stock market reactions to FOMC meetings via Twitter feeds. *The Journal of Portfolio Management*, vol. 42, no 5, pp. 123–134. DOI: 10.3905/jpm.2016.42.5.123.
19. Hansen S., McMahon M. (2016) Shocking language: Understanding the macroeconomic effects of central bank communication. *Journal of International Economics*, vol. 99, suppl. 1, pp. S114–S133. DOI: 10.1016/j.jinteco.2015.12.008.
20. Moniz A., de Jong F. (2014) Predicting the impact of central bank communications on financial market in investors' interest rate expectations. Proceedings of the *European Semantic Web Conference (ESWC 2014)*. Anissaras, Crete, Greece, 25–29 May 2014, pp. 144–155. DOI: 10.1007/978-3-319-11955-7_12.
21. Correa R., Garud K., Londono J.M., Mislav N. (2021) Sentiment in central banks' financial stability reports. *Review of Finance*, vol. 25, no 1, pp. 85–120. DOI: 10.1093/rof/rfaa014.
22. Filatov D. (2020) *Central banks communication and the state of the economy*. Available at: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3519846 (accessed 01 February 2021). DOI: 10.2139/ssrn.3519846.
23. Hendry S. (2012) Central bank communication or the media's interpretation: What moves markets? Staff Working Papers. *Bank of Canada*, no 12–9.
24. Drobyshevsky S.M., Trunin P.V., Bozhechkova A.V., Gorunov E.V., Petrova D.V. (2017) Analysis of the Bank of Russia information policy. *Voprosy Ekonomiki*, no 10, pp. 88–110 (in Russian). DOI: 10.32609/0042-8736-2017-10-88-110.
25. Kuznetsova O.S., Ulyanova S.R. (2018) The exchange rate and the verbal interventions by the government and the Bank of Russia. *HSE Economic Journal*, vol. 22, no 2, pp. 228–250 (in Russian). DOI: 10.17323/1813-8691-2018-22-2-228-250.
26. Blei D.M., Ng A.Y., Jordan M.I. (2003) Latent Dirichlet allocation. *The Journal of Machine Learning Research*, no 3, pp. 993–1022.
27. Hoffman M., Bach F.R., Blei D.M. (2010) Online learning for latent Dirichlet allocation. *Advances in Neural Information Processing Systems*, no 23, pp. 856–864.
28. Förschler F., Alfano S. (2016) Reading between the lines: The effect of language sentiment on economic indicators. Proceedings of the *8th International Workshop on Enterprise Applications, Markets and Services in the Finance Industry (FinanceCom 2016)*. Frankfurt, Germany, 8 December 2016, pp. 89–104. DOI: 10.1007/978-3-319-52764-2_7.

About the authors

Diana A. Petrova

Research Fellow, Center for the Study of Problems of Central Banks, Institute of Applied Economic Research, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 84, Prospect Vernadskogo, Moscow 119571, Russia;

E-mail: petrova-da@ranepa.ru

ORCID: 0000-0003-1030-4932

Pavel V. Trunin

Dr. Sci. (Econ.);

Director, Center for the Study of Problems of Central Banks, Institute of Applied Economic Research, Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, 84, Prospect Vernadskogo, Moscow 119571, Russia;

Head of Macroeconomics and Finance Division, Gaidar Institute for Economic Policy, 3–5, Gazetnyy Lane, Moscow 125993, Russia

E-mail: pt@iep.ru

ORCID: 0000-0001-8306-9422

[DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.35.47](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2021.3.35.47)

Методический подход к выявлению угрозы извлечения конфиденциальных данных из автоматизированных систем управления на базе интернет-технологий*

В.Н. Кузьмин 

E-mail: vka@mil.ru

А.Б. Менисов 

E-mail: vka@mil.ru

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
Адрес: 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13

Аннотация

В современных условиях всеохватывающей глобальной цифровизации стремительно растет и развивается киберпреступность. Поэтому обеспечение информационной безопасности относят к стратегическим целям развития информационного общества в России. Однако вопрос о том, как должно быть достигнуто «состояние защищенности личности, общества и государства от внутренних и внешних информационных угроз» в соответствии с содержанием и требованиями программ «Информационная безопасность» и «Цифровая экономика России 2024», остается открытым. Целью исследования, некоторые результаты которого представлены в настоящей публикации, является повышение эффективности выявления угроз извлечения конфиденциальных данных из автоматизированных систем управления с html-страниц для снижения риска использования этих данных на подготовительных и начальных этапах организации атак на информационную инфраструктуру государственных и коммерческих организаций. В статье описан разработанный подход к выявлению сущностей конфиденциальных данных, основанный на объединении нескольких нейросетевых технологий — универсального кодировщика предложений и нейросетевой рекуррентной архитектуры двунаправленной долгой краткосрочной памяти. Результаты оценивания показателей эффективности в сравнении с современным инструментарием обработки текстов естественного языка (spaCy) показали достоинства и перспективы практического применения данного методического подхода.

Ключевые слова: защита информации; парирование угроз информационной безопасности; конфиденциальные данные; персональные данные; машинное обучение; глубокое обучение; выявление сущностей текстов естественного языка.

Цитирование: Кузьмин В.Н., Менисов А.Б. Методический подход к выявлению угрозы извлечения конфиденциальных данных из автоматизированных систем управления на базе интернет-технологий // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 3. С. 35–47. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.35.47

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

Введение

Современный этап развития общества характеризуется возрастающей ролью информационной сферы, представляющей собой совокупность информации, информационной инфраструктуры, субъектов, осуществляющих сбор, формирование, распространение и использование информации, а также системы регулирования возникающих при этом общественных отношений. Информационная сфера, являясь системообразующим фактором жизни общества, активно влияет на состояние политической, экономической, оборонной и других составляющих национальной безопасности [1]. В свою очередь, развитие информационных технологий привело к преобразованию понимания личного пространства и частной жизни. Процессы, ранее происходившие в физическом (реальном) мире, перетекали в онлайн-среду: электронная торговля, поисковые сервисы, социальные сети, распространение планшетов и смартфонов, дающих людям возможность постоянно находиться в режиме онлайн. Вследствие этого объемы конфиденциальных сведений, которые человек раскрывает и выкладывает в глобальную сеть, как и персональных данных граждан, собираемых и систематизируемых разными учреждениями и ведомствами, многократно увеличились [2].

Таким образом, одной из значимых угроз национальной безопасности и интересам Российской Федерации в информационной сфере [1] является возможность использования конфиденциальной информации [3–5] на подготовительных и начальных этапах организации и проведения атак на инфраструктуру государственных и коммерческих организаций [6].

Вместе с тем, модели, методы, технологии и технические средства выявления и удаления конфиденциальных данных из открытых источников являются недостаточно совершенными из-за низкой результативности использования методов синтаксического сопоставления данных, а также отсутствия глобального охвата открытого сегмента информации [7, 8]. В рамках настоящего исследования проблемная ситуация сформулирована как необходимость обеспечения эффективного выявления конфиденциальных и персональных данных с html-страниц на основе развития и реализации моделей, методов и технических средств выявления и удаления конфиденциальных данных из открытых информационных источников.

1. Анализ существующих исследований

Повышение эффективности выявления угроз утечки конфиденциальных данных может быть достигнуто посредством реализации ряда направленных действий, к которым относятся [9]:

- ♦ совершенствование средств мониторинга открытых источников;
- ♦ лингвистическая обработка неструктурированных данных [10];
- ♦ выявление в текстах упоминаний персон и связанных конфиденциальных данных.

В 1990-х годах выявление в текстах упоминаний впервые было представлено как задача извлечения информации (named entity recognition, NER) [11], и с тех пор данный подход привлекает большое внимание исследователей. Основная цель NER — пометить или классифицировать объекты (слова) в определенном тексте на основе заранее определенных ярлыков или тегов (например, человека, местоположения, организации и т.д.) [12]. Большая часть исследований относится к обработке английского текста, но вне зависимости от языка можно выделить три основных подхода: на основе лингвистических правил, на основе алгоритмов машинного обучения и гибридные подходы.

Лингвистический подход использует модели, основанные на правилах, которые вручную написаны лингвистами. При таком подходе формируется набор правил или шаблонов для того, чтобы различать упоминание в определенном месте текста. Разработано несколько автоматизированных систем [13, 14], в которых используются специализированные словари, включающие названия стран, крупных городов, организаций, имен людей и т.д. Основным недостатком данного подхода является необходимость использования большого объема грамматических правил в дополнение к измененному использованию (стиль, жаргон). Кроме того, эти системы практически непригодны для работы с другими языками.

Подходы, основанные на алгоритмах машинного обучения, используют большой объем аннотированных обучающих данных для получения языковых знаний высокого уровня и подразделяются на два типа: осуществляющие обучение с учителем и без учителя. Модели NER, осуществляющие обучение без учителя, не требуют никаких обучающих данных [15] и имеют возможность самостоятельно аннотирования данных. Эти модели обучения не

пользуются популярностью в практическом применении из-за достаточно низкой точности выявления сущностей в тексте. С другой стороны, модели, осуществляющие обучение с учителем, требуют большого объема качественных проаннотированных данных. Некоторые алгоритмы машинного обучения, используемых для NER (марковские модели [16–19], метод максимальной энтропии [20–22], деревья решений [23–25], метод опорных векторов [26, 27] и др.) показали надежные результаты для выявления сущностей в мультязычных текстах.

Глубокое обучение — это подраздел машинного обучения, который представляет собой комбинацию нескольких уровней обработки данных на основе представления на нескольких уровнях абстракции. Методы глубокого обучения в последнее время широко используются из-за их выдающейся производительности по сравнению с другими методами для решения различных задач, включая обработку естественного языка.

Существуют две основные архитектуры, которые широко используются для извлечения текстового представления на уровне символов или слов [28]:

- ♦ модели на основе сверточных нейронных сетей (convolutional neural networks, CNN) [29];
- ♦ модели на основе рекуррентных нейронных сетей (recurrent neural networks RNN) [30].

Более современные архитектуры нейронных сетей, основанные на различных комбинациях сверточных и рекуррентных сетей, показывают самые высокие результаты при решении многих задач [31–34]. Эти модели демонстрируют значительную универсальность, поскольку они могут применяться к нескольким языкам с унифицированной сетевой архитектурой.

Анализ исследований в данной области показал достоинства алгоритмов глубокого обучения для решения задачи выявления конфиденциальных данных с html-страниц.

2. Методы

В настоящем исследовании предложен методический подход, включающий применение двух разных нейросетевых технологий:

- ♦ нейросетевой рекуррентной архитектуры двунаправленной долгой краткосрочной памяти (bidirectional long short-term memory, BLSTM), которая показала улучшение качества выявления сущностей для решения других задач [35, 36];

- ♦ универсального кодировщика предложений, позволяющего масштабировать подход для текстов разных языков [37].

Объединение двунаправленной нейронной сети долгой краткосрочной памяти (BLSTM) и кодировщика предложений включает в себя следующие этапы (рисунки 1):

1. Очистка html-страницы от разметки и другой служебной информации. Выделение текстовой части, находящейся на html-странице.
2. Предобработка текста.
3. Представление признаков текста: преобразование первичных признаков в векторное представление.
4. Представление предложений на основе BLSTM: получение высокоуровневого представления признаков (семантики) из признаков этапа 3.
5. Построение общего вектора признаков: объединение признаков предложения лексического и семантического уровней из этапов 3 и 4 с целью формирования окончательного вектора признаков.
6. Классификация: определение конфиденциальных данных.

Рассмотрим более подробно каждый из этапов выявления конфиденциальных сущностей на html-страницах.

Этап 1. Очистка html-страницы. На данном этапе необходимо решить задачи извлечения фактического текста из содержимого html-страницы и очистки текста от специальных символов. Процесс начинается с построения объектной модели документа (document object model, DOM) html-страницы путем анализа тегов. Модель DOM обеспечивает представление структуры html-страницы. Текстовые узлы модели DOM извлекаются для дальнейшего использования: текст фильтруется и очищается, с исключением скриптов и символов структуры html, таких как списки навигации, теги стилей, таблицы и различные фреймы. На этом этапе также удаляются знаки препинания и специальные символы.

Этап 2. Предобработка текста. На этом этапе полученные текстовые сегменты токенизируются, чтобы получить отдельные токены (слова). Затем удаляются стоп-слова — часто встречающиеся слова на разных языках, которые имеют наименьшее семантическое значение. Сначала идентифицируется язык текста, а затем определяется список стоп-слов для этого языка. Это не противоречит цели представления не зависящего от языка метода, поскольку

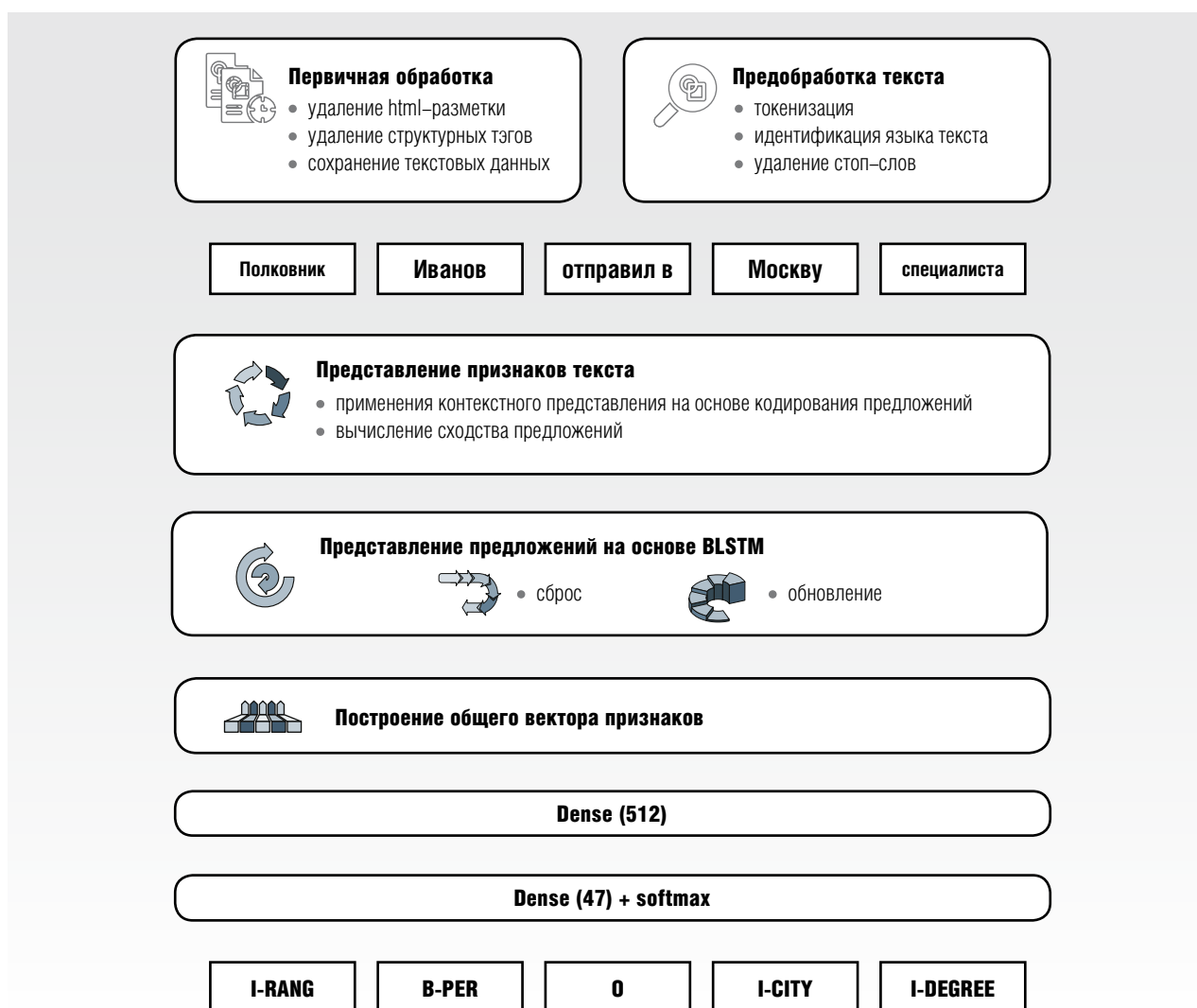


Рис. 1. Схема разработанного методического подхода извлечения конфиденциальных данных

ку средство определения языка и список стоп-слов для разных языков доступны в открытых программных библиотеках.

В сложных естественных языках (таких как русский) одно и то же слово может принимать разные формы (падежи), и в словарь частотного анализа могут попадать все словоформы, отличающиеся предлогами и окончаниями. Из-за этого может сильно увеличиваться размер словаря и, соответственно, размер набора данных для обучения, что может вызывать уменьшение производительности системы и ухудшение обобщающих способностей классификатора (переобучения). Для решения этой проблемы применяются дополнительные меры предобработки текста: лемматизация и стемминг.

Для решения задачи выявления конфиденциальных данных эти дополнительные меры были специально пропущены, что объясняется следующими причинами:

- ◆ стемминг (и особенно лемматизация) требуют словарей языков, на которых написан текст;
- ◆ эти меры выполняют поиск по словарям нормальной формы для всех слов текста, что может существенно снизить производительность;
- ◆ конфиденциальные данные часто содержат информацию, представленную в форме цифр и специальных знаков (например, номера удостоверений и других документов).

Этап 3. Представление признаков текста. Представление признаков текста — один из основных эта-

пов его лингвистической обработки. Для решения задачи выявления конфиденциальных данных предлагается применять предварительно обученный алгоритм представления предложений (или последовательностей слов) под названием Universal Sentence Encoder (USE) [37]. USE — это алгоритм кодирования предложений, выпущенный Google в 2018 году, цель которого — обеспечить представление на уровне предложений, а не на уровне слов или символов.

Алгоритм USE был реализован с использованием двух подходов:

- ◆ применения контекстного представления на основе кодирования предложений;
- ◆ оценки сходства предложений.

Алгоритм USE впервые был применен для английского языка [37], а затем был реализован для многоязычных текстов [38].

Этап 4. Представление предложений на основе BLSTM. На этом этапе используется двунаправленный рекуррентный блок как расширенная версия рекуррентной нейронной сети. Облегченная структура блока с использованием двух вентилях (сброса и обновления) позволяет повысить оперативность решения проблемы исчезновения градиента по сравнению с архитектурой долгой краткосрочной памяти (long short-term memory, LSTM) [39], которая состоит из трех вентилях (вход, выход и вентиль забывания).

Этап 5. Построение общего вектора признаков. На данном этапе происходит объединение признаков предложения лексического и семантического уровней с целью сохранения всех возможных отличительных особенностей текста. Объединение производится в конкатинационном слое.

Этап 6. Классификация. На этапе классификации вначале плотно-связанный слой из 512 нейронов используется для обработки отличительных характеристик текста из слоя конкатенации признаков. Далее используется слой с элементом активации softmax для вычисления вероятности того, что данное слово относится к одному из 57 классов. Набор данных аннотируется с использованием формата маркировки IOB [40], и включает 28 классов конфиденциальной информации (B- и I-тегов) и один дополнительный класс (O-тег). Поэтому модель позволяет проводить классификацию по 57 классам.

3. Результаты

В данном разделе описано проведение эксперимента и параметры, которые использовались для обучения и валидации предложенного подхода.

3.1. Набор данных

Набор данных, используемый для исследований, был предоставлен организацией Kaspersky Innovation Hub¹, в рамках Всероссийского хакатона Digital SuperHero (Fintech&Security) 2020 года². Набор данных состоит из 28 классов конфиденциальных данных (таблица 1). В данной таблице также представлено распределение вхождений по классам конфиденциальных данных, которые использовались для обучения и валидации предлагаемых в подходе моделей. Всего набор данных состоит из почти из 900 html-страниц, из которых 833 html-страницы использовались в качестве обучающего набора данных, а 70 html-страниц — для валидации модели.

3.2. Метрики качества

Чтобы оценить эффективность предлагаемого подхода, использовалось несколько метрик. Сначала была измерена точность, которая является известным показателем для оценки любой модели машинного или глубокого обучения и характеризует долю правильно классифицированных объектов из их общего числа. Показатель точности вычисляется следующим образом:

$$Pr = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (1)$$

где TP — число истинно-положительных результатов;

FP — число ошибок первого рода (ложноположительное срабатывание).

Затем была оценена метрика полноты, которая представляет собой количество правильно определенных объектов из общего числа объектов в наборе данных. Данная метрика вычисляется следующим образом:

$$R = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (2)$$

где TP — число истинно-положительных результатов;

¹ <https://www.kaspersky.ru/ihub/>

² <https://www.dshkazan.ru/finsec/>

FN – число ошибок второго рода (ложноотрицательное срабатывание).

Наконец, $F1$ -мера рассчитывается на основе значений точности и полноты:

$$F1 = 2 \frac{Pr \cdot R}{Pr + R}. \quad (3)$$

где Pr – значение показателя точности;

R – значение показателя полноты.

3.3. Качество выявления конфиденциальных данных

В настоящее время на рынке средств анализа открытых источников информации и применения технологии искусственного интеллекта есть много программных решений (например, Amazon, ABBYY, IBM Watson, MS Azure и продукты компании Palantir). Однако для сравнения с разработанным подходом был принят фреймворк spaCy³, что объясняется следующими причинами экономического и технического характера:

- ♦ поддержка более 60 языков;
- ♦ готовая к промышленному применению система обучения лингвистических моделей;
- ♦ наличие расширяемых компонент для распознавания именованных сущностей, тегирования частей речи, синтаксического анализа зависимостей, сегментации предложений, классификации текста, лемматизации, морфологического анализа, связывания сущностей и т.д.;
- ♦ поддержка пользовательских моделей на PyTorch, TensorFlow и других нейросетевых фреймворках;
- ♦ наличие встроенных визуализаторов для синтаксиса и NER;
- ♦ относительно простая интеграция модели в автоматизированные системы.

Сравнение результатов, представленных на картинке⁴ и полученных с помощью фреймворка spaCy показало, что разработанный подход показывает повышение качества выявления конфиденциальных данных на 21% по всем классам конфиденциальных данных (таблица 2). Подход обеспечил достижение средней $F1 = 0,55$, средней точности $Pr = 0,57$ и средней полноты $R = 0,67$.

Таблица 1.

Классы использованного набора данных

№ п/п	Обозначение	Характеристика	Количество вхождений
1	PASSPORT	Паспортные данные	1
2	DRIVER_LIC	Данные водительского удостоверения	1
3	CAR_START	Начало использования автомобиля	8
4	CAR	Государственный регистрационный номер автомобиля	28
5	EDU_START	Начало обучения	35
6	DEATHDATE	Дата смерти	83
7	AGE	Возраст	120
8	EDU_END	Окончание учебы	145
9	BIRTHDATE	Дата рождения	146
10	ZIPCODE	Почтовый индекс	218
11	FACULTY	Факультет	219
12	HOBBY	Хобби	315
13	START	Время начала обучения или работы	338
14	EMAIL	Адрес электронной почты	354
15	END	Окончание работы	355
16	STREET	Улица	364
17	EDU	Образование	389
18	TEL	Телефон	409
19	DEGREE	Звание, должность	459
20	STATE	Подразделение	912
21	NICKNAME	Профиль социальной сети (логин)	1220
22	COUNTRY	Страна	1254
23	INDUSTRY	Направление деятельности	1597
24	CITY	Город	1824
25	GENDER	Пол	1960
26	FUNC	Должностные обязанности	2517
27	ORG	Название организации	3667
28	PER	ФИО (или его часть)	7682

³ <https://www.spaCy.com>

⁴ <https://www.dshkazan.ru/finsec/>

Таблица 2.

**Сравнение результатов моделей
для выявления конфиденциальных данных**

№ п/п	Класс	Точность		Полнота		F1	
		Авторский подход	sраСу	Авторский подход	sраСу	Авторский подход	sраСу
1	PER	0,9082	0,35	0,87076	0,98	0,88908	0,51579
2	ORG	0,1932	0,44	0,93319	0,75	0,32008	0,55462
3	FUNC	0,1872	0,15	0,51531	0,79	0,27466	0,25213
4	CITY	0,584	0,23	0,58657	0,83	0,58528	0,36019
5	NICKNAME	0,7695	0,16	0,94219	0,88	0,84714	0,27077
6	COUNTRY	0,8086	0,45	0,51655	0,92	0,63038	0,60438
7	GENDER	0,9379	0,18	0,29631	0,06	0,45034	0,09
8	INDUSTRY	0,5283	0,3	0,2601	0,08	0,34858	0,12632
9	STATE	0,1797	0,17	0,72339	0,83	0,28783	0,2822
10	EMAIL	0,8901	0,34	0,41612	0,19	0,56712	0,24377
11	STREET	0,7692	0,25	0,69175	0,8	0,72844	0,38095
12	TEL	0,8774	0,5	0,5833	0,76	0,70075	0,60318
13	EDU	0,171	0,16	0,80821	0,8	0,28224	0,26667
14	ZIPCODE	0,6034	0,41	0,77374	0,85	0,67807	0,55318
15	DEGREE	0,6585	0,35	0,93206	0,1	0,77175	0,15556
16	START	0,3947	0,27	0,43456	0,84	0,41368	0,40865
17	EDU_END	0,1366	0,45	0,55193	0,3	0,21896	0,36
18	END	0,0298	0,38	0,86437	0,92	0,05754	0,53785
19	AGE	0,9287	0,18	0,83912	0,76	0,88164	0,29106
20	HOBBY	0,1011	0,3	0,5287	0,21	0,16975	0,24706
21	BIRTHDATE	0,8076	0,17	0,92066	0,5	0,86043	0,25373
22	FACULTY	0,9578	0,34	0,97121	0,45	0,96448	0,38734
23	CAR	0,4014	0,25	0,99413	0,85	0,57185	0,38636
24	DEATHDATE	0,6176	0,5	0,73078	0,96	0,66942	0,65753
25	EDU_START	0,9323	0,16	0,78325	0,02	0,85131	0,03556
26	CAR_START	0,3057	0,15	0,146	0,2	0,19761	0,17143
27	PASSPORT	0,8492	0,23	0,72283	0,53	0,78096	0,32079
28	DRIVER_LIC	0,5959	0,16	0,44169	0,54	0,50733	0,24686
Среднее значение:		0,57588	0,285	0,67067	0,59643	0,55381	0,34157

4. Дискуссия

Чтобы продемонстрировать практическую значимость предлагаемого методического подхода выявления конфиденциальных данных из сети интернет, произведено сравнение полученных результатов с другими композициями нейросетевых технологий (таблица 3).

Как видно из таблицы 3, модель BLSTM, примененная в разработанном подходе, превосходит модель LSTM во всех указанных классах. Можно отметить, что самое незначительное улучшение было достигнуто в классе EDU_END, в то время как самое высокое – в классе PER. Это можно объяснить распределением данных по классам и их размером. Возвращаясь к таблице 1, можно заметить, что у

Таблица 3.

Сравнение результатов работы разных композиций методического подхода

№ п/п	Класс	Точность				Полнота				F1			
		Авторский подход	LSTM	Без USE	USE	Авторский подход	LSTM	Без USE	USE	Авторский подход	LSTM	Без USE	USE
1	PER	0.9082	0.788899	0.7554	0.2513	0.87076	0.3161	0.9247	0.4166	0.88908	0.45136	0.83153	0.31349
2	ORG	0.1932	0.910661	0.7594	0.3073	0.93319	0.0655	0.6615	0.4548	0.32008	0.12222	0.70711	0.36673
3	FUNC	0.1872	0.564068	0.2792	0.8071	0.51531	0.2536	0.0691	0.5931	0.27466	0.34992	0.11074	0.68375
4	CITY	0.584	0.979289	0.1985	0.5707	0.58657	0.4723	0.3151	0.8761	0.58528	0.63722	0.24358	0.69113
5	NICKNAME	0.7695	0.958619	0.6594	0.9251	0.94219	0.9439	0.3993	0.0077	0.84714	0.9512	0.4974	0.01521
6	COUNTRY	0.8086	0.682749	0.9073	0.8715	0.51655	0.1534	0.7579	0.4965	0.63038	0.25058	0.82588	0.63264
7	GENDER	0.9379	0.761573	0.3181	0.0151	0.29631	0.7039	0.2468	0.4464	0.45034	0.73159	0.27794	0.02926
8	INDUSTRY	0.5283	0.155593	0.2821	0.1805	0.2601	0.2655	0.8068	0.0553	0.34858	0.19621	0.41799	0.08467
9	STATE	0.1797	0.109872	0.0281	0.2822	0.72339	0.2258	0.8331	0.873	0.28783	0.14783	0.05438	0.42655
10	EMAIL	0.8901	0.712207	0.4924	0.5611	0.41612	0.3041	0.3899	0.8125	0.56712	0.42625	0.4352	0.66379
11	STREET	0.7692	0.154987	0.7198	0.9594	0.69175	0.9779	0.9269	0.7743	0.72844	0.26757	0.8103	0.85698
12	TEL	0.8774	0.036389	0.7911	0.4411	0.5833	0.1756	0.5942	0.4934	0.70075	0.06028	0.67864	0.46582
13	EDU	0.171	0.26002	0.0648	0.5232	0.80821	0.1515	0.7556	0.2679	0.28224	0.19149	0.11942	0.35438
14	ZIPCODE	0.6034	0.203505	0.9409	0.2833	0.77374	0.1067	0.5478	0.7517	0.67807	0.13998	0.69245	0.41156
15	DEGREE	0.6585	0.299845	0.3623	0.9814	0.93206	0.8859	0.242	0.0327	0.77175	0.44805	0.2902	0.06328
16	START	0.3947	0.436453	0.8491	0.716	0.43456	0.7234	0.3869	0.9749	0.41368	0.54442	0.53161	0.82562
17	EDU_END	0.1366	0.806458	0.8001	0.8182	0.55193	0.3229	0.2334	0.4665	0.21896	0.46118	0.3614	0.59419
18	END	0.0298	0.858825	0.7621	0.4577	0.86437	0.9984	0.3264	0.242	0.05754	0.92338	0.45707	0.31662
19	AGE	0.9287	0.239638	0.4984	0.4532	0.83912	0.3478	0.8059	0.8474	0.88164	0.28376	0.61586	0.59055
20	HOBBY	0.1011	0.116531	0.9497	0.9496	0.5287	0.5741	0.0152	0.4049	0.16975	0.19373	0.02987	0.56771
21	BIRTHDATE	0.8076	0.133296	0.9161	0.9204	0.92066	0.6129	0.15	0.3458	0.86043	0.21897	0.25785	0.50276
22	FACULTY	0.9578	0.995736	0.0912	0.8146	0.97121	0.0517	0.6599	0.3144	0.96448	0.09824	0.16023	0.4537
23	CAR	0.4014	0.378413	0.2613	0.821	0.99413	0.3192	0.6812	0.0832	0.57185	0.34627	0.37774	0.15108
24	DEATHDATE	0.6176	0.634855	0.9917	0.3356	0.73078	0.3214	0.8013	0.3979	0.66942	0.42675	0.88636	0.3641
25	EDU_START	0.9323	0.5145	0.4761	0.5342	0.78325	0.1459	0.0167	0.0504	0.85131	0.22736	0.03235	0.09205
26	CAR_START	0.3057	0.4658	0.8526	0.8066	0.146	0.9981	0.5294	0.7014	0.19761	0.63518	0.6532	0.75031
27	PASSPORT	0.8492	0.689894	0.3281	0.5283	0.72283	0.6247	0.3017	0.9222	0.78096	0.6557	0.31436	0.67176
28	DRIVER_LIC	0.5959	0.390814	0.511194	0.012905	0.44169	0.233	0.0786	0.6786	0.50733	0.29193	0.13618	0.02533
Среднее значение:		0.57588	0.5085532	0.56595	0.57602	0.67067	0.43841	0.48062	0.4922	0.55381	0.38138	0.42167	0.42732

класса PER самый большой объем по сравнению с другими классами (7682 именованных объектов), в то время как у класса EDU_END — самый маленький объем (145 именованных объектов).

Однако, для таких классов конфиденциальных данных, как ORG и COUNTRY наблюдается пониженное качество, что объясняется следующими причинами:

- ♦ объективное преимущество выявления этих классов фреймворком spaCy, поскольку возможность выявления класса ORG присутствует во всех лингвистических моделях spaCy для разных языков, обученных на большем объеме данных; также имеется возможность выявления класса COUNTRY с помощью дополнительных классов spaCy (GPE и LOC);
- ♦ пересечение сущностей разных классов в обучающей выборке: ORG, STATE, EDU и FACULTY.

К числу причин повышения качества выявления конфиденциальных данных относятся:

- ♦ возможности алгоритма USE в части обработки семантических представлений предложений и фраз. Использование только алгоритма USE в качестве классификатора для того же набора данных, как показано в *таблице 3* (USE), позволило достичь средней $F1 = 0,42$. Хотя общие результаты алгоритма USE для классификации ниже, чем результаты, достигнутые с помощью разработанного подхода, можно увидеть, что использование алгоритма USE только для классификации некоторых других классов (STREET) выше, чем у предложенного подхода

($F1 = 0,81$ у USE, против $0,73$ у предложенного подхода). Следовательно, в дальнейших исследованиях следует провести дополнительную работу по улучшению классификации отдельных массивов данных;

- ♦ предложенная последовательность этапов и архитектурой нейронной сети. В частности, путем аккумуляции алгоритма USE и BLSTM было достигнуто улучшение средней $F1$ -меры на 15%.

Заключение

Огромный объем неструктурированных данных сети интернет, распространяемый ежедневно, вызывает потребность в разработке эффективных методов поиска и извлечения информации. Извлечение конфиденциальных данных — сложная задача классификации для текстов естественного языка, которая еще более усложняется при применении к html-страницам из-за их особых свойств и сложной структуры. В настоящей статье представлен новый подход глубокого обучения для выявления конфиденциальных данных, который доказал свою эффективность по сравнению с другими.

Основная цель разработки нового подхода — предоставить более детализированные результаты для практического применения в области обработки естественного языка и информационной безопасности. В разработанном подходе использована нейросетевая технология двунаправленной долгой краткосрочной памяти в сочетании с многоязычным универсальным кодировщиком предложений. ■

Литература

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации. Утверждена Указом Президента Российской Федерации от 5 декабря 2016 г. № 646. [Электронный ресурс]: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102161033&backlink=1&nd=102417017> (дата обращения 01.02.2021).
2. Шайдуллина В.К. Большие данные и защита персональных данных: основные проблемы теории и практики правового регулирования // Общество: политика, экономика, право. 2019. № 1 (66). С. 51–55. DOI: 10.24158/pep.2019.1.8.
3. Федеральный закон РФ от 27.07.2006 №152-ФЗ «О персональных данных». [Электронный ресурс]: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102108261> (дата обращения 01.02.2021).
4. Указ Президента Российской Федерации от 06.03.1997 г. № 188 «Об утверждении перечня сведений конфиденциального характера». [Электронный ресурс]: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102046005> (дата обращения 01.02.2021).
5. Федеральный закон от 27.07.2004 г. № 79-ФЗ «О государственной гражданской службе Российской Федерации». [Электронный ресурс]: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102088054> (дата обращения 01.02.2021).
6. Информационное сообщение «О разработке методического документа ФСТЭК России «Методика определения угроз безопасности информации в информационных системах» от 9 апреля 2020 г. № 240/22/1534. [Электронный ресурс]: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/2071-informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-9-aprelya-2020-g-n-240-22-1534> (дата обращения 01.02.2021).

7. Лось В.П., Никульчев Е.В., Пушкин П.Ю., Русаков А.М. Информационно-аналитическая система мониторинга выполнения операторами персональных данных требований законодательства // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 3. С. 16–23.
8. Козин И.С. Метод обеспечения безопасности персональных данных при их обработке в информационной системе на основе анализа поведения пользователей // Информационно-управляющие системы. 2018. № 3. С. 69–78. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.69.
9. Ивичев В.А., Игнатова Т.В. Технологии выявления и очистки персональных данных открытых источников // ЭКО. 2013. № 2 (464). С. 168–179.
10. Платонов А.А., Псарев А.А. Подход к выявлению дефектов программ на основе применения взаимодополняющих семантик // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2019. № 666. С. 148–157.
11. Grishman R. Whither written language evaluation? // Proceedings of the Workshop on Human Language Technology. Plainsboro, New Jersey, 8–11 March 1994. P. 120–125.
12. Minkov E., Wang R.C., Cohen W. Extracting personal names from email: Applying named entity recognition to informal text // Proceedings of the Human Language Technology Conference and the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Vancouver, British Columbia, Canada, 6–8 October 2005. P. 443–450.
13. Grishman R. The NYU System for MUC-6 or Where's the Syntax? // Proceedings of the Sixth Message Understanding Conference (MUC-6). Columbia, Maryland, 6–8 November 1995. P. 167–175.
14. Wakao T., Gaizauskas R., Wilks Y. Evaluation of an algorithm for the recognition and classification of proper names // Proceedings of the 16th International Conference on Computational Linguistics (COLING 1996). Copenhagen, 5–9 August 1996. Vol. 1. P. 418–423.
15. Alfred R., Leong L.C., On C.K., Anthony P. Malay named entity recognition based on rule-based approach // International Journal of Machine Learning and Computing. 2014. Vol. 4. No 3. P. 300–306. DOI: 10.7763/IJMLC.2014.V4.428.
16. Salleh M.S., Asmai S.A., Basiron H., Ahmad S. Named entity recognition using fuzzy c-means clustering method for Malay textual data analysis // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2018. Vol. 10. No 2–7. P. 121–126.
17. Zhou G.D., Su J. Named entity recognition using an HMM-based chunk tagger // Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Philadelphia, PA, USA, 6–12 July 2002. P. 473–480.
18. Morwal S., Jahan N., Chopra D. Named entity recognition using hidden Markov model (HMM) // International Journal on Natural Language Computing. 2012. Vol. 1. No 4. P. 15–23. DOI: 10.5121/ijnlc.2012.1402.
19. Morwal S., Jahan N. Named entity recognition using hidden Markov model (HMM): an experimental result on Hindi, Urdu and Marathi languages // International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering. 2013. Vol. 3. No 4. P. 671–675.
20. Borthwick A. A maximum entropy approach to named entity recognition (PhD Thesis). New York: New York University, 1999.
21. Chieu H.L., Ng H.T. Named entity recognition: a maximum entropy approach using global information // Proceedings of the 19th International Conference on Computational Linguistics (COLING 2002). Taipei, Taiwan, 24 August – 1 September 2002. Vol. 1. P. 1–7. DOI: 10.3115/1072228.1072253.
22. Chieu H.L., Ng H.T. Named entity recognition with a maximum entropy approach // Proceedings of the Seventh Conference on Natural language learning at HLT-NAACL 2003. Edmonton Canada, 31 May 2003. P. 160–163.
23. Speck R., Ngomo A.C.N. Ensemble learning for named entity recognition // Proceedings of the 13th International Semantic Web Conference (ISWC 2014). Riva del Garda, Italy, 19–23 October 2014. P. 519–534.
24. Paliouras G., Karkaletsis V., Petasis G., Spyropoulos C.D. Learning decision trees for named-entity recognition and classification // Proceedings of the ECAI Workshop on Machine Learning for Information Extraction (ECAI 2000). Berlin, 21 August 2000. P. 1–6.
25. Szarvas G., Farkas R., Kocsor A. A multilingual named entity recognition system using boosting and C4.5 decision tree learning algorithms // Proceedings of the 9th International Conference on Discovery Science (DS 2006). Barcelona, Spain, 7–10 October 2006. P. 267–278. DOI: 10.1007/11893318_27.
26. Mansouri A., Affendey L. S., Mamat A. Named entity recognition approaches // International Journal of Computer Science and Network Security. 2008. Vol. 8. No 2. P. 339–344.
27. Ekbal A., Bandyopadhyay S. Named entity recognition using support vector machine: A language independent approach // International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering. 2010. Vol. 4. No 2. P. 155–170.
28. Li J., Sun A., Han J., Li C. A survey on deep learning for named entity recognition // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2020. (Early access). DOI: 10.1109/TKDE.2020.2981314.
29. Ma X., Hovy E. End-to-end sequence labeling via bi-directional lstm-cnns-crf // arXiv:1603.01354v5. 2016.
30. Leveraging linguistic structures for named entity recognition with bidirectional recursive neural networks / P.-H. Li [et al.] // Proceedings of the 2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Copenhagen, Denmark, 7–11 September 2017. P. 2664–2669.
31. Fu J., Liu P., Zhang Q. Rethinking generalization of neural models: A named entity recognition case study // Proceedings of the 34th AAAI Conference on Artificial Intelligence. New York, USA, 7–12 February 2020. Vol. 34. No 05. P. 7732–7739. DOI: 10.1609/aaai.v34i05.6276.
32. Al-Smadi M., Al-Zboon S., Jararweh Y., Juola P. Transfer learning for Arabic named entity recognition with deep neural networks // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 37736–37745. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973319.
33. Triggerer: Learning with entity triggers as explanations for named entity recognition / B.Y. Lin [et al.] // arXiv:2004.07493v4. 2020.
34. Cho M., Ha J., Park C., Park S. Combinatorial feature embedding based on CNN and LSTM for biomedical named entity recognition // Journal of Biomedical Informatics. 2020. Vol. 103. Article ID 103381. DOI: 10.1016/j.jbi.2020.103381.

35. Neural architectures for named entity recognition / G. Lample [et al.] // arXiv:1603.01360v3. 2016.
36. Huang Z., Xu W., Yu K. Bidirectional LSTM-CRF models for sequence tagging // arXiv:1508.01991v1. 2015.
37. Universal sentence encoder / D. Cer [et al.] // arXiv:1803.11175v2. 2018.
38. Multilingual universal sentence encoder for semantic retrieval / Y. Yang [et al.] // arXiv:1907.04307v1. 2019.
39. LSTM: A search space Odyssey / K. Greff [et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. 2016. Vol. 28. No 10. P. 2222–2232. DOI: 10.1109/TNNLS.2016.2582924.
40. Song Y., Kim E., Lee G.G., Yi B.-K. POSBIOTM-NER in the shared task of BioNLP/NLPBA2004 // Proceedings of the International Joint Workshop on Natural Language Processing in Biomedicine and its Applications (NLPBA/BioNLP). Geneva, Switzerland, 28–29 August 2004. P. 103–106.

Об авторах

Кузьмин Владимир Никифорович

доктор военных наук, профессор;

ведущий научный сотрудник военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;

E-mail: vka@mil.ru

ORCID: 0000-0002-6411-4336

Менисов Артем Бакытжанович

кандидат технических наук;

докторант Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;

E-mail: vka@mil.ru

ORCID: 0000-0002-9955-2694

An approach to identifying threats of extracting confidential data from automated control systems based on internet technologies

Vladimir N. Kuzmin

E-mail: vka@mil.ru

Artem B. Menisov

E-mail: vka@mil.ru

Space Military Academy named after A.F. Mozhaysky

Address: 13, Zhdanovskaya Street, Saint Petersburg 197198, Russia

Abstract

Together with ubiquitous, global digitalization, cybercrime is growing and developing rapidly. The state considers the creation of an environment conducive to information security to be a strategic goal for the development of the information society in Russia. However, the question of how the “state of protection of the individual, society and the state from internal and external information threats” should be achieved in accordance with the “Information Security” and the “Digital Economy of Russia 2024” programs remains open. The aim of this study is to increase the efficiency whereby automated control systems identify confidential data from html-pages to reduce the risk of using this data in

the preparatory and initial stages of attacks on the infrastructure of government organizations. The article describes an approach that has been developed to identify confidential data based on the combination of several neural network technologies: a universal sentence encoder and a neural network recurrent architecture of bidirectional long-term short-term memory. The results of an assessment in comparison with modern means of natural language text processing (SpaCy) showed the merits and prospects of the practical application of the methodological approach.

Key words: information security; countering information security threats; confidential data; personal data; machine learning; deep learning; identifying the entities of natural language texts.

Citation: Kuzmin V.N., Menisov A.B. (2021) An approach to identifying threats of extracting confidential data from automated control systems based on internet technologies. *Business Informatics*, vol. 15, no 3, pp. 35–47. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.35.47

References

1. *The Information Security Doctrine of the Russian Federation*. Approved by Decree of the President of the Russian Federation No 646 of 5 December 2016. Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&prevDoc=102161033&backlink=1&&nd=102417017> (accessed 01 February 2021) (in Russian).
2. Shaydullina V.K. (2019) Big data and personal data protection: the main theoretical and practical issues of legal regulation. *Society: Politics, Economics, Law*, no 1, pp. 51–55 (in Russian). DOI: 10.24158/pep.2019.1.8.
3. Federal Law of the Russian Federation No 152-FZ of 27 July 2006 “*About personal data*.” Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody&nd=102108261> (accessed 01 February 2021) (in Russian).
4. Decree of the President of the Russian Federation No 188 of 06 March 1997 “*On approval of the list of confidential information*.” Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102046005> (accessed 01 February 2021) (in Russian).
5. Federal Law of the Russian Federation No 79-FZ of 27 July 2004 “*About the state civil service of the Russian Federation*.” Available at: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102088054> (accessed 01 February 2021) (in Russian).
6. Information message “*On the development of the methodological document of the FSTEC of Russia “Methodology for determining information security threats in information systems”*” No 240/22/1534 of 9 April 2020. Available at: <https://fstec.ru/normotvorcheskaya/informatsionnye-i-analiticheskie-materialy/2071-informatsionnoe-soobshchenie-fstek-rossii-ot-9-aprelya-2020-g-n-240-22-1534> (accessed 01 February 2021) (in Russian).
7. Los V.P., Nikulchev E.V., Pushkin P.Yu., Rusakov A.M. (2020) Information-analytical system of monitoring implementation of legislation requirements by operators of personal information. *Information Security Problems. Computer Systems*, no 3, pp. 16–23 (in Russian).
8. Kozin I.S. (2018) Providing personal data protection in an information system based on user behavior analytics. *Information and Control Systems*, no 3, pp. 69–78 (in Russian). DOI: 10.15217/issn1684-8853.2018.3.69.
9. Ivichev V.A., Ignatova T.V. (2013) Technologies of identification and depersonalization of Data. *ECO*, vol. 43, no 2, pp. 168–179 (in Russian).
10. Platonov A.A., Psaryov A.A. (2019) Approach to identifying program defects based on mutually complementing semantics. *Proceedings of the Mozhaisky Military Space Academy*, no 666, pp. 148–157 (in Russian).
11. Grishman R. (1994) Whither written language evaluation? Proceedings of the *Workshop on Human Language Technology. Plainsboro, New Jersey, 8–11 March 1994*, pp. 120–125.
12. Minkov E., Wang R.C., Cohen W. (2005) Extracting personal names from email: Applying named entity recognition to informal text. Proceedings of the *Human Language Technology Conference and the Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Vancouver, British Columbia, Canada, 6–8 October 2005*, pp. 443–450.
13. Grishman R. (1995) The NYU System for MUC-6 or Where’s the Syntax? Proceedings of the *Sixth Message Understanding Conference (MUC-6). Columbia, Maryland, 6–8 November 1995*, pp. 167–175.
14. Wakao T., Gaizauskas R., Wilks Y. (1996) Evaluation of an algorithm for the recognition and classification of proper names. Proceedings of the *16th International Conference on Computational Linguistics (COLING 1996). Copenhagen, 5–9 August 1996*, vol. 1, pp. 418–423.
15. Alfred R., Leong L.C., On C.K., Anthony P. (2014) Malay named entity recognition based on rule-based approach. *International Journal of Machine Learning and Computing*, vol. 4, no 3, pp. 300–306. DOI: 10.7763/IJMLC.2014.V4.428.
16. Salleh M.S., Asmai S.A., Basiron H., Ahmad S. (2018) Named entity recognition using fuzzy c-means clustering method for Malay textual data analysis. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 10, no 2–7, pp. 121–126.
17. Zhou G.D., Su J. (2002) Named entity recognition using an HMM-based chunk tagger. Proceedings of the *40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Philadelphia, PA, USA, 6–12 July 2002*, pp. 473–480.
18. Morwal S., Jahan N., Chopra D. (2012) Named entity recognition using hidden Markov model (HMM). *International Journal on Natural Language Computing*, vol. 1, no 4, pp. 15–23. DOI: 10.5121/ijnlc.2012.1402.
19. Morwal S., Jahan N. (2013) Named entity recognition using hidden Markov model (HMM): an experimental result on Hindi, Urdu and Marathi languages. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, no 4, pp. 671–675.
20. Borthwick A. (1999) *A maximum entropy approach to named entity recognition* (PhD Thesis). New York: New York University.

21. Chieu H.L., Ng H.T. (2002) Named entity recognition: a maximum entropy approach using global information. Proceedings of the *19th International Conference on Computational Linguistics (COLING 2002)*. Taipei, Taiwan, 24 August – 1 September 2002, vol. 1, pp. 1–7. DOI: 10.3115/1072228.1072253.
22. Chieu H.L., Ng H.T. (2003) Named entity recognition with a maximum entropy approach. Proceedings of the *Seventh Conference on Natural language learning at HLT-NAACL 2003*. Edmonton Canada, 31 May 2003, pp. 160–163.
23. Speck R., Ngomo A.C.N. (2014) Ensemble learning for named entity recognition. Proceedings of the *13th International Semantic Web Conference (ISWC 2014)*. Riva del Garda, Italy, 19–23 October 2014, pp. 519–534.
24. Paliouras G., Karkaletsis V., Petasis G., Spyropoulos C.D. (2000) Learning decision trees for named-entity recognition and classification. Proceedings of the *ECAI Workshop on Machine Learning for Information Extraction (ECAI 2000)*. Berlin, 21 August 2000, pp. 1–6.
25. Szarvas G., Farkas R., Kocsor A. (2006) A multilingual named entity recognition system using boosting and C4.5 decision tree learning algorithms. Proceedings of the *9th International Conference on Discovery Science (DS 2006)*. Barcelona, Spain, 7–10 October 2006, pp. 267–278. DOI: 10.1007/11893318_27.
26. Mansouri A., Affendey L. S., Mamat A. (2008) Named entity recognition approaches. *International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 8, no 2, pp. 339–344.
27. Ekbal A., Bandyopadhyay S. (2010) Named entity recognition using support vector machine: A language independent approach. *International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering*, vol. 4, no 2, pp. 155–170.
28. Li J., Sun A., Han J., Li C. (2020) A survey on deep learning for named entity recognition. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* (Early access). DOI: 10.1109/TKDE.2020.2981314.
29. Ma X., Hovy E. (2016) End-to-end sequence labeling via bi-directional lstm-cnns-crf. *arXiv:1603.01354v5*.
30. Li P.-H., Dong R.-P., Wang Y.-S., Chou J.-C., Ma W.-Y. (2017) Leveraging linguistic structures for named entity recognition with bidirectional recursive neural networks. Proceedings of the *2017 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*. Copenhagen, Denmark, 7–11 September 2017, pp. 2664–2669.
31. Fu J., Liu P., Zhang Q. (2020) Rethinking generalization of neural models: A named entity recognition case study. Proceedings of the *34th AAAI Conference on Artificial Intelligence*. New York, USA, 7–12 February 2020, vol. 34, no 05, pp. 7732–7739. DOI: 10.1609/aaai.v34i05.6276.
32. Al-Smadi M., Al-Zboon S., Jararweh Y., Juola P. (2020) Transfer learning for Arabic named entity recognition with deep neural networks. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 37736–37745. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2973319.
33. Lin B.Y., Lee D.-H., Shen M., Moreno R., Huang X., Shiralkar P., Ren X. (2020) Triggerer: Learning with entity triggers as explanations for named entity recognition *arXiv:2004.07493v4*.
34. Cho M., Ha J., Park C., Park S. (2020) Combinatorial feature embedding based on CNN and LSTM for biomedical named entity recognition. *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 103, article ID 103381. DOI: 10.1016/j.jbi.2020.103381.
35. Lample G., Ballesteros M., Subramanian S., Kawakami K., Dyer C. (2016) Neural architectures for named entity recognition. *arXiv:1603.01360v3*.
36. Huang Z., Xu W., Yu K. (2015) Bidirectional LSTM-CRF models for sequence tagging. *arXiv:1508.01991v1*.
37. Cer D., Yang Y., Kong S.-Y., Hua N., Limtiaco N., John R.S., Constant N., Guajardo-Cespedes M., Yuan S., Tar C., Sung Y.-H., Strope B., Kurzweil R. (2018) Universal sentence encoder. *arXiv:1803.11175v2*.
38. Yang Y., Cer D., Ahmad A., Guo M., Law J., Constant N., Abrego G.H., Yuan S., Tar C., Sung Y.-H., Strope B., Kurzweil R. (2019) Multilingual universal sentence encoder for semantic retrieval. *arXiv:1907.04307v1*.
39. Greff K., Srivastava R.K., Koutník J., Steunebrink B.R., Schmidhuber J. (2016) LSTM: A search space Odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 28, no 10, pp. 2222–2232. DOI: 10.1109/TNNLS.2016.2582924.
40. Song Y., Kim E., Lee G.G., Yi B.-K. (2004) POSBIOTM-NER in the shared task of BioNLP/NLPBA2004. Proceedings of the *International Joint Workshop on Natural Language Processing in Biomedicine and its Applications (NLPBA/BioNLP)*. Geneva, Switzerland, 28–29 August 2004, pp. 103–106.

About the authors

Vladimir N. Kuzmin

Dr. Sci. (Mil.), Professor;

Leading Researcher, Military Institute (Science and Researching), Space Military Academy named after A.F. Mozhaysky, 13, Zhdanovskaya Street, Saint Petersburg 197198, Russia;

E-mail: vka@mil.ru

ORCID: 0000-0002-6411-4336

Artem B. Menisov

Cand. Sci. (Tech.);

Doctoral Student, Space Military Academy named after A.F. Mozhaysky, 13, Zhdanovskaya Street, Saint Petersburg 197198, Russia;

E-mail: vka@mil.ru

ORCID: 0000-0002-9955-2694

Подготовка данных для машинного анализа ключевых показателей эффективности территориальных менеджеров

А.Ю. Владова^{a,b} 

E-mail: ayvladova@fa.ru

Е.Д. Шек^c

E-mail: 1399selena@gmail.com

^a Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Адрес: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

^b Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации
Адрес: 125993, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 49

^c Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова
Адрес: 117997, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36

Аннотация

Существенная трансформация операционной деятельности компаний — дистрибьюторов продуктов и услуг обусловлена изменениями в технологии получения и обработки данных. На данный момент работа представителей этих компаний в значительной степени оцифрована: например, автоматически фиксируется время нахождения в дороге, количество и места встреч с клиентами. При этом эффективность работы территориальных менеджеров, не совершающих прямые продажи, по-прежнему вынужденно оценивают с помощью опросов, экспертов и затратных двойных визитов, хотя наличие объемной выборки данных позволяет с помощью статистического анализа выявить как недостаточные, так и завышенные значения показателей эффективности работы. Исходные данные: реляционная база данных, накапливающая информацию о 28 категориальных, количественных, геолокационных и временных параметрах активностей территориальных менеджеров за год. На основе имеющихся данных созданы синтетические признаки (широта и долгота — индекс, регион, улица, дом; по идентификаторам вычислены суммы активностей; по временным признакам определены сезон года, день недели и период суток). Методика проведения статистического анализа включала три стадии: сбор и обработку первичных данных, обобщение и группировку обработанной информации, формулирование статистических гипотез и интерпретацию результатов. Для моделирования уровня искажения информации об активности менеджеров использован вероятностный подход. В результате с помощью построенного облака тегов выделены: наиболее популярный сезон для проведения рекламных кампаний; наиболее продуктивные отделы и территориальные представители; дни недели, на которые приходится наибольшее количество контактов с клиентами. Установлено наличие значительного числа записей о проведении встреч в выходные дни. В результате проведенной разведки данных сформулирована статистическая гипотеза о возможности выявления территориальных менеджеров, искажающих

количество и параметры встреч. Для выявления скрытых взаимосвязей создан набор синтетических целых, действительных и категориальных переменных. Выявлены сомнительные данные (например, работа в выходные дни или ночью). Полученный обобщенный набор данных сгруппирован по признаку идентификатора активности территориального представителя и построено распределение признака. По каждому территориальному менеджеру просуммированы целые и действительные признаки и выявлены выбросы, характеризующие неэффективную работу или искажение данных. Таким образом, наличие объемной выборки данных об истории перемещений и активностях позволяют по косвенным признакам оценить эффективность работы территориальных менеджеров дистрибьюторской компании.

Ключевые слова: машинное обучение; ключевой показатель эффективности; база данных; временной ряд; геолокация; обучение без учителя; торговый представитель; b2b.

Цитирование: Влагова А.Ю., Шек Е.Д. Подготовка данных для машинного анализа ключевых показателей эффективности территориальных менеджеров // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 3. С. 48–59. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.48.59

Введение

Система количественно измеримых ключевых показателей эффективности (key performance indicators, KPI) наиболее эффективна в крупных компаниях, где по сравнению с мелкими предприятиями сложнее выделить вклад каждого работника. Главным положительным моментом внедрения KPI является возможность количественного анализа деятельности работников и последующее планирование, а одним из отрицательных моментов является то, что при отсутствии контроля работник в состоянии адаптировать свои показатели под требования KPI.

Ежедневная работа территориального менеджера (ТМ) в рамках рекламной кампании продукта или услуги состоит из нескольких встреч (активностей) с клиентами, в ходе которых он демонстрирует рекламную презентацию в специальной программе. Эта программа фиксирует дату, время начала и длительность демонстрации, а также определяет географические координаты ТМ с помощью GPS-наблюдения. После проведенной активности ТМ заносит в распределенную базу данных отчет о посещении, устанавливая ряд дополнительных параметров, к числу которых относятся:

- ♦ характер активности (например, индивидуальный, в группе, дистанционный);
- ♦ сегментация клиента по месту работы и специальности, отношению к рекламируемому продукту или услуге;
- ♦ рекомендуемое количество активностей с клиентом.

Таким образом, специфика работы ТМ такова, что факт проведения активности не может быть отслежен работодателем, а характер дополнительных параметров представляет собой частное мнение ТМ.

С другой стороны, естественные для менеджеров по продажам и хорошо контролируемые параметры обратной связи, такие как объем продаж, количество заключенных договоров, закрытие сделок, количество новых клиентов и выполнение показателей плана, нерелевантны для ТМ, участвующих в процессе ознакомления клиентов с продуктом или услугой. Таким образом, из-за невозможности контроля результатов работодатель вынужден переходить к контролю процесса — тех действий, которые совершаются для достижения цели. Это соблюдение работниками регламента и нормативов компании, качество обслуживания и общения с клиентами, знание продукта, возможность самостоятельно принимать решения. Однако вопрос оценки эффективности работы ТМ остается открытым.

1. Существующие исследования

Согласно данным платформы Dimensions [1], которая предоставляет доступ к информации со всего мира о результатах работ по грантам, публикациям, патентам и другим источникам, количество публикаций и патентов в области оценки эффективности территориальных менеджеров с помощью современных методов анализа данных растет от года к году (рисунок 1). Некоторый спад в 2020 году объясняется одно-двухлетним периодом (в среднем), который проходит с момента подачи статьи или заявки до публикации или выдачи патента.

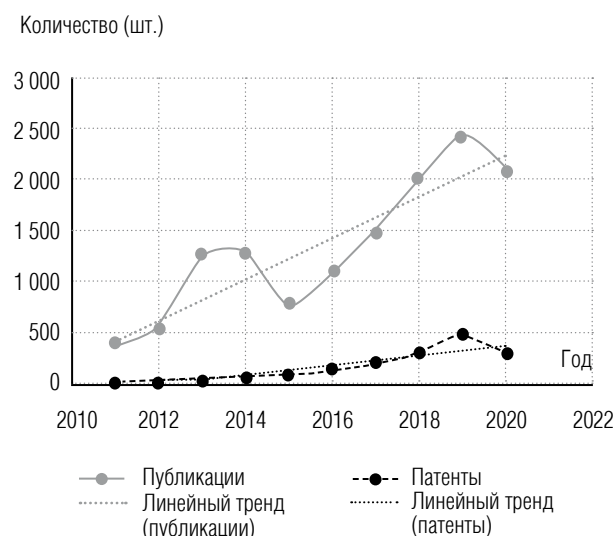


Рис. 1. Динамика числа публикаций и патентов

Существующие исследования в области оценки эффективности работы ТМ, а также выявления зависимостей между контролируемыми показателями и результативностью работы сотрудников базируются в основном на анализе стандартных методов контроля, вычисления числовых показателей результативности и использования аналитических и CRM-систем.

В статье [2] оценена эффективность подходов к управлению продажами в трех компаниях. Исследованы обоснованность распределения задач и продуктов между менеджерами, обоснованность фокусирования на определенных территориях, а также планирование презентаций продукта. Информация для исследования получена в ходе интервью с руководителями отделов продаж и маркетинга, наблюдения за работой медицинских представителей, а также изучения отчетов о деятельности организации и данных о рынке.

В исследовании [3] определены такие методы контроля результативности, как телефонные звонки, внешний и внутренний аудит, двойные визиты, в ходе которых оцениваются и отрабатываются профессиональные и коммуникативные навыки сотрудника и его умение провести презентацию продукта, ежедневные отчеты в системе CRM и их оценка путем проведения срезов, оценка финансовой отчетности в используемой информационной системе.

Статья [4] настаивает на интеллектуальном планировании деятельности ТМ, поскольку штат ТМ является одним из наиболее затратных по оплате труда и обучения. Выявлено, что работа ТМ в значитель-

ной степени оцифрована, так как в CRM-системах фиксируются многие параметры — от времени нахождения в пути до количества встреч в месяц. Существующие аналитические решения выстраивают маршруты до клиентов на основе времени в пути, возможной отмены встречи и других параметров, позволяя определить оптимальную последовательность обхода клиентов. При этом комплексный анализ собранных данных не всегда осуществляется должным образом. Кроме того, ключевой параметр эффективности деятельности ТМ, — человеческий фактор, — с трудом поддается анализу.

Авторы работы [5] рассмотрели цифровые технологии, применимые в сфере здравоохранения. Предложенные меры связаны с внедрением систем контроля KPI для оценки деятельности работников сферы здравоохранения (например, результата проведенной консультации или телефонного разговора администратора клиники). С использованием данных систем появляется возможность определить, какой отдел работает наиболее эффективно, какая услуга приносит больше прибыли.

В статье [6] описано применение гибридной процедуры, основанной на методе k -средних и дерева решений, для прогнозирования производительности сотрудников на следующий год. Используются такие факторы, как личность, пунктуальность, красноречие и т.д. Алгоритм прогнозирует количество сотрудников, выбранных для повышения или увольнения, и помогает выявить неэффективных сотрудников.

Статья [7] посвящена описанию человеческого поведения как цепочке математических моделей — фильтров Калмана, упорядоченных цепью Маркова. Эти модели используют для распознавания поведения человека по сенсорным данным и краткосрочного прогнозирования его действий (например, последующих действий водителей на основе подготовительных движений). Авторы применили наивный байесовский классификатор к набору данных о продажах глобальной транспортно-экспедиторской компании за три года. Классификация проводилась по трем классам: «не справляется с обязанностями», «справляется с обязанностями» и «показывает выдающиеся результаты». Авторы предлагают использовать наивный байесовский классификатор для оценки работы специалистов по продажам с привлечением большего количества информации из CRM-систем.

В работе [8] KPI формируются на основе фрагментарных знаний о бизнес-процессах. Авторы статьи представили метод, позволяющий оценить свойства

KPI до внедрения и включающий сочетание целевого и концептуального моделирования.

Таким образом, анализ литературы показал, что наряду с высоким уровнем цифровизации бизнес-процессов, активность ТМ по-прежнему оценивают проведением опросов, мнениями экспертов и затратами двойными визитами. При этом наличие объемной выборки данных позволяет с помощью статистического анализа выявить как недостаточные, так и завышенные показатели эффективности работы ТМ.

2. Исходные данные

Исходные данные аккумулированы B2B-компанией, являющейся дистрибьютором лекарственных препаратов и БАДов. Компания имеет два бизнес-отдела (RX и OTC) и пять подразделений (Т1, Т2, Т3, Т4, Т5). Маркетинговая деятельность ТМ компании ориентирована на ознакомление лиц, принимающих решения, с характеристиками продукции (в рамках брендовых кампаний). Параметры, автоматически формирующиеся в ходе встречи с клиентом, и параметры из отчета ТМ о результатах встречи заносятся в распределенную базу данных, управляемую CRM. В ней ведется учет ТМ, клиентов, продуктов и услуг. Имеющаяся выборка содержит более трехсот тысяч наблюдений по 28 различным признакам, к числу которых относятся:

- ♦ уникальные цифровые и/или символьные идентификаторы ТМ, их активностей, клиентов и компаний, в которых они работают, а также рекламных кампаний, в рамках которых проведена активность;
- ♦ категориальные признаки типа активности и компании, специальности, подразделения, категории и целевой группы клиента, рекламной кампании, флаги выполнения активности, информации о присутствии менеджера на активности;
- ♦ временные признаки начала и окончания активности, длительность показа презентации, договоренности по бренду, время определения координат;
- ♦ целые (количество встреч, результаты рекламной кампании, флаги), вещественные и геолокационные признаки: долгота и широта места проведения активности.

Таким образом, имеются умеренно разнородные цифровые данные с преобладанием служебной информации (рисунк 2а). Из-за пропусков в данных

некоторые типы определились некорректно. После преобразования значений одного типа в значения другого типа (как явного приведения типов, так и определения по дате встречи, времени суток, дня недели, сезона года) соотношение целых, вещественных, временных и категориальных признаков усилилось в пользу целых и категориальных (рисунк 2б).

3. Методика статистического анализа

Традиционно выделяют три этапа статистического исследования [9, 10]:

- ♦ сбор и обработка первичных данных;
- ♦ статистическая сводка и группировка обработанной информации;
- ♦ постановка статистических гипотез и интерпретация результатов.

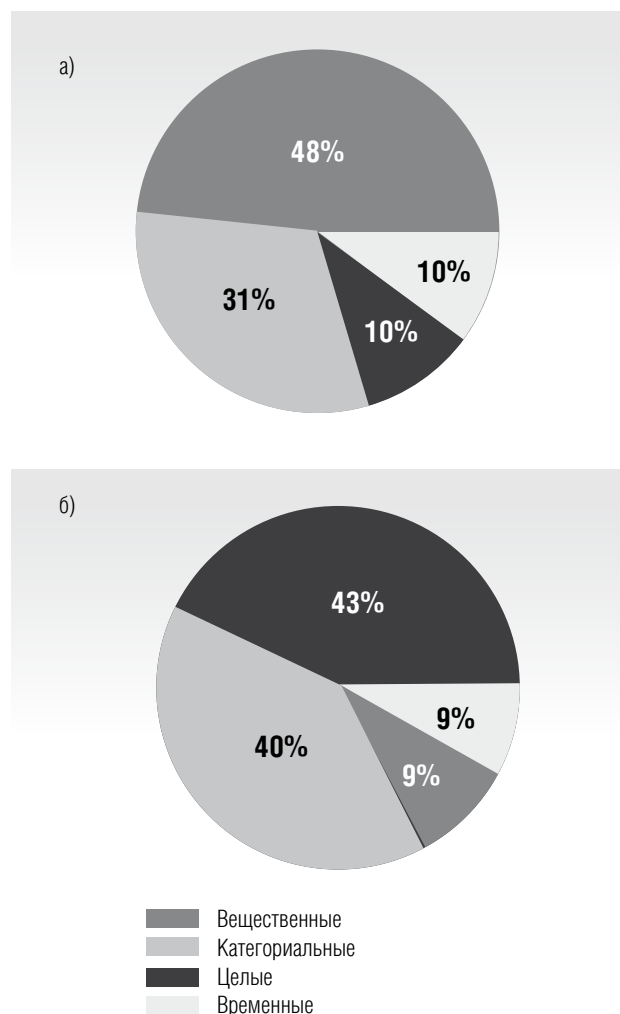


Рис. 2. Соотношение типов признаков:
а) до преобразования; б) после преобразования

♦ *Таблица 1* детализирует основные этапы исследования с помощью подходов, предлагаемых методами разведки данных [11, 12] и машинного обучения [13, 14].

Таблица 1.

Этапы статистического исследования

1.	Сбор и обработка первичных данных	• Аудит данных, обработка пропусков и выбросов
		• Типизация и кодирование признаков
		• Синтез временных и географических признаков
		• Построение облака тегов
2.	Сводка и группировка обработанной информации	• Профилирование признаков
		• Подбор вида и параметров распределений признаков
		• Отбор слабокоррелируемых признаков
		• Группировка данных
3.	Гипотезы и интерпретация результатов	• Постановка статистической гипотезы
		• Моделирование
		• Интерпретация результатов

Ниже представлены основные результаты применения детализированной методики статистического анализа для решения поставленной задачи.

4. Этап 1:

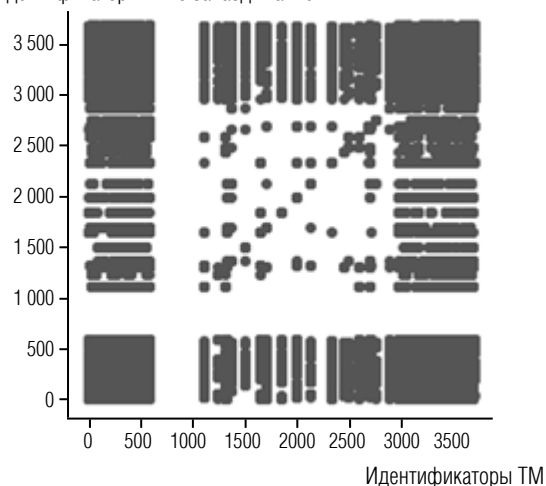
Сбор и обработка первичных данных

4.1. Аудит данных

Моделирование временных рядов предполагает исследование связи значений признаков во времени. С помощью разновидности точечного графика — диаграммы запаздывания [15] изучены автокорреляции двух признаков идентификаторы ТМ и идентификаторы активностей (*рисунок 3*).

Большее число точек в области диагоналей предполагает более сильную автокорреляционную связь. Точки, сосредоточенные в середине или распространенные по всей площади рисунка, предполагают слабые связи. Неопределяемая хаотичная структура точек диаграммы указывает на то, что данные случайны.

а) Идентификаторы ТМ с запаздыванием



б) Идентификаторы активностей с запаздыванием

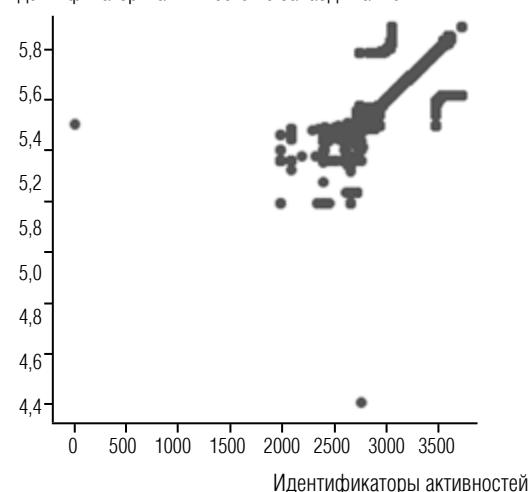


Рис. 3. Неслучайность данных признаков:
а) идентификаторы ТМ, запаздывание 30 наблюдений;
б) идентификаторы активностей, запаздывание 50 наблюдений

Диаграммы показывают наличие структуры у обоих категориальных признаков, что говорит о неслучайности данных. Существование автокорреляционных связей подчеркивается второй диагональю, проходящей через верхний правый и нижний левый углы. Установлено, что для больших данных такой тип графика строится намного быстрее, чем классический автокорреляционный вариант.

4.2. Синтез временных и географических признаков

По временным признакам, отражающим моменты начала и окончания презентации, синтезированы целый признак (порядковый день в году) и категориальные признаки (день недели, сезон года и период



Рис. 4. Карта активностей двух бизнес-отделов

суток, когда проведена активность). По географическим признакам широты и долготы в среде Tableau¹ построена карта активностей бизнес-отделов (рисунок 4), а также сформированы синтетические признаки (почтовый индекс, адрес и регион) [16, 17].

На основании картографических данных можно заключить, что, например, большую часть активностей проводит бизнес-отдел ОТС. Он же эксклюзивно работает на территории Сахалина и Калининградской области.

4.3. Построение облака тегов

Для анализа значений 12 категориальных и временных признаков, преобразованных в категориальные, с помощью библиотеки WordCloud² языка Python построено облако тегов (рисунок 5).



Рис. 5. Облако тегов категориальных признаков

С помощью построенного облака тегов выделены:

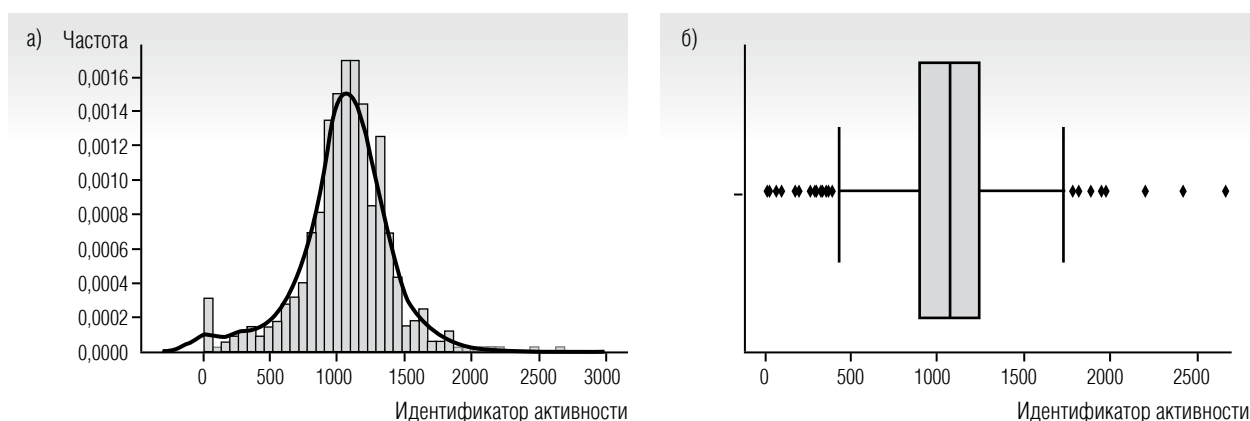
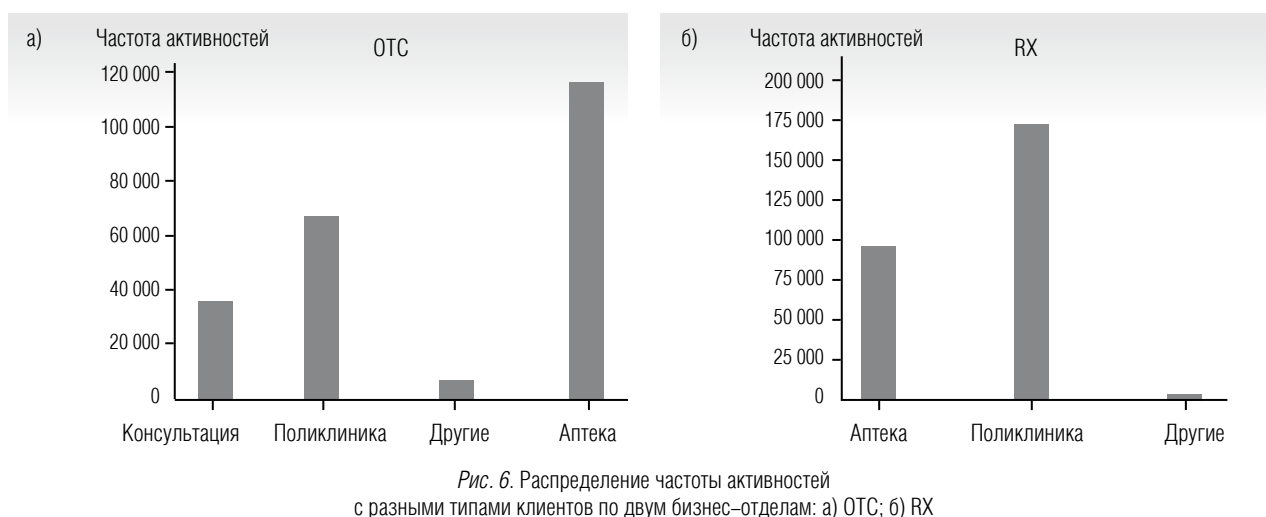
- ◆ наиболее популярный сезон для проведения рекламных кампаний — зима (осенний и весенний сезоны идут со значительным отставанием);
- ◆ преимущественный интервал времени суток для встреч с клиентами — день (на втором месте — утро);
- ◆ наиболее продуктивный бизнес-отдел по количеству активностей — РХ;
- ◆ преимущественный тип общения с клиентом — визит (на втором месте — консультация),
- ◆ дни недели, на которые приходится наибольшее количество контактов с клиентами — вторник и четверг (на втором месте — среда и пятница). Установлено наличие значительного количества записей о проведении встреч в воскресенье;
- ◆ наиболее частыми клиентами являются поликлиники и аптеки.

5. Статистическая сводка и группировка обработанной информации

С помощью библиотеки pandas-profiling оценены взаимосвязи и построены гистограммы распределений признаков распределенной базы данных [18–20]. На рисунке 6 представлены гистограммы распределений активностей двух бизнес-отделов дистрибьюторской компании по типам клиентов.

¹ <http://elearning.tableau.com/>

² <https://python-graph-gallery.com/wordcloud/>



Наиболее интересным представляется близкое к нормальному распределению признака, характеризующего активность ТМ (рисунк 7а). Эта случайная величина проходит комбинированный тест на нормальность “normaltest” библиотеки SciPy, сочетающий тесты Д’Агостино и Пирсона на эксцесс и асимметрию [21], если уменьшить хвосты, убрав выбросы (рисунк 7б).

Преобразуем нормализованное распределение признака X «идентификатор активности ТМ» в стандартное нормальное распределение X_n по формуле:

$$X_n \sim \text{Norm}(0;1) = \frac{X - m_x}{\sigma_x}, \quad (1)$$

где m_x — математическое ожидание признака идентификатор активности ТМ;

σ_x — стандартное отклонение признака идентификатор активности ТМ.

Распределение признака «идентификатор активности ТМ» позволило сформулировать статистическую гипотезу об оценке уровня искажения параметров активностей.

6. Гипотезы и интерпретация результатов

Для моделирования уровня искажения параметров активностей используем вероятностный подход [22–24]. Пусть гипотеза H_1 — активность проведена, а альтернативная гипотеза H_2 — активность не проведена. Пусть событие A — попадание параметров проведенной или не проведенной активности ТМ в базу данных. Тогда по формуле полной вероятности вероятность события A вычисляется следующим образом:

$$P(A) = P(H_1)P(A|H_1) + P(H_2)P(A|H_2) \quad (2)$$

Пусть уровень нормированного идентификатора активности X_n у определенного ТМ принимает значение p . Обозначим вероятность того, что ТМ внес параметры несостоявшейся активности в базу данных, через P_m . Тогда, учитывая (1), перепишем (2) в следующем виде:

$$P(A) = p \cdot 1 + (1 - p) P_m \quad (3)$$

Поскольку многие ТМ вводят информацию о встречах в распределенную базу данных, мы имеем дело с потоком информации. Для исходных настроек модели желательно знать портрет среднего ТМ, а именно – уровень его идентификатора активности p . Допустим, что наиболее распространенной является ситуация, когда нормированный идентификатор активности ТМ составляет 0,5. Пусть нормально распределенная величина $p \sim N(0,5; 0,1)$ моделирует входной поток. Ясно, что ТМ не может кардинально менять параметры активностей, иначе они станут выбросами. Пусть ТМ изменяет нормированный идентификатор активности в s раз, $s \in [0; 1]$ по отношению к среднему значению, повышая его до p' :

$$p' = p + (1 - p)s. \quad (4)$$

В результате с вероятностью $P_m = (1 - p)s$ ТМ искажает данные, и с вероятностью $1 - P_m = p$ вводит неискаженные данные. *Рисунок 8* показывает результаты моделирования в случае, если ТМ искажают информацию на 10 %.

Дальнейший анализ направлен на подтверждение гипотезы о том, что на основе исходных данных представляется возможным выявить ТМ, на-

блюдения по которым выбиваются из имеющейся выборки. Отметим, что по сформированному набору данных с учетом временного признака также возможно выполнение прогнозирования по известным моделям [25].

7. Дискуссия

Исходные признаки сгруппированы по идентификатору ТМ, таким образом, мы рассматриваем все наблюдения, которые относятся к конкретному менеджеру. При этом было выделено несколько паттернов для генерации признаков в соответствии с их смысловой сущностью [26, 27]: числовые признаки, обозначающие количество, были просуммированы, также по ним были выделены среднее и медиана. Среди таких признаков – длительность показа презентации, признак договоренности по бренду, время определения координат ТМ. По признакам, которые являются идентификаторами, сгенерирован признак количества уникальных значений, которые встречались среди наблюдений по ТМ [28].

Таким образом, получены новые данные, для которых можно выделить ТМ с суммами числовых признаков, являющихся выбросами (*рисунок 9*).

Необходимо отметить, что предложенный подход, основанный на группировке данных и выполнении статистического теста, наиболее эффективен для отсева сильно искаженных параметров и значительно менее эффективен для выявления слабо искаженных параметров. Поэтому на данном этапе исследования (до разработки системы

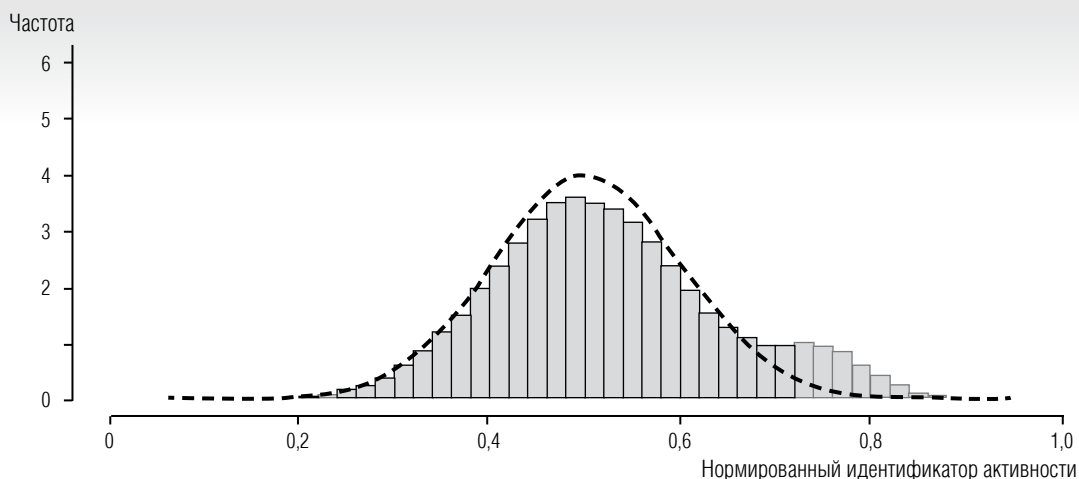


Рис 8. Результат искажения идентификатора активности на 10%

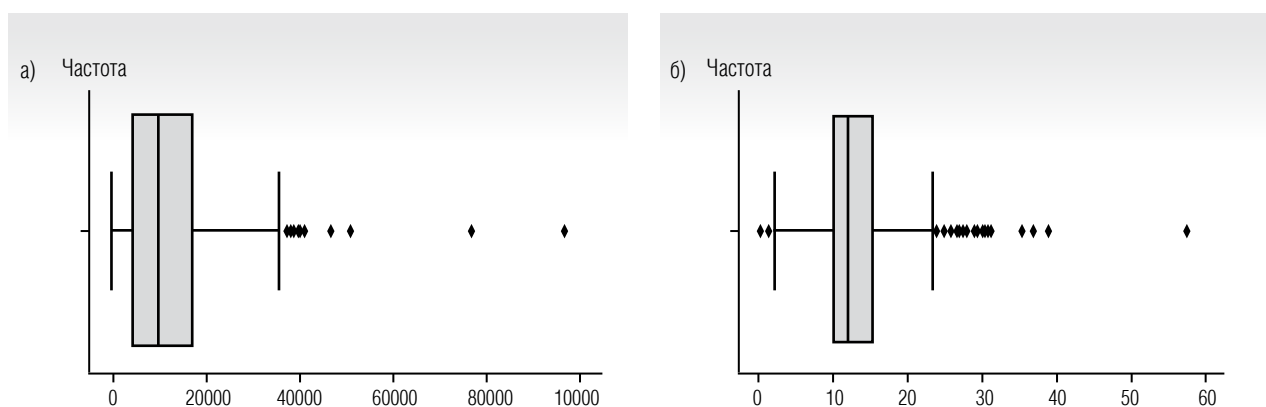


Рис. 9. Выбросы признака:
а) договоренность по бренду, усл. ед.; б) длительность активности, дни

статистических тестов или отдельной математической модели выявления слабо искаженных параметров) предлагается оценивать ключевые показатели эффективности ТМ по интегральной характеристике, учитывающей как результаты, полученные в соответствии с предложенным подходом, так и экспертные оценки. Использование комбинации статистических и экспертных (например, двойные визиты) оценок в рамках пилотного проекта позволит разметить имеющиеся данные с учетом слабо искаженных параметров и уточнить методику.

Заключение

В результате проведенной разведки данных представлена статистическая гипотеза о возможности выявления ТМ, искажающих количество и

параметры встреч. Для выявления скрытых взаимосвязей создан набор синтетических целых, действительных и категориальных переменных. Выявлены сомнительные данные (например, работа в выходные дни или ночью). Полученный обобщенный набор данных сгруппирован по признаку идентификатор активности территориального менеджера и построено распределение признака. Проведено вероятностное моделирование активности территориальных менеджеров для оценки уровня искажения информации. По каждому менеджеру просуммированы целые и действительные признаки и выявлены выбросы, характеризующие неэффективную работу или искажение данных. Для снижения ошибки второго рода предложено при разметке имеющихся данных использовать комбинацию статистических и экспертных оценок. ■

Литература

1. Bode C., Herzog C., Hook D., McGrath R. Dimensions Report. Cambridge, MA: Digital Science, 2018.
2. Димитриади Н.А. Эффективность предпринимательского проекта: аудит систем управления продажами // Учет и статистика. 2007. № 2 (10). С. 142–147.
3. Баева О.Н., Хомякова С.Г. Управление удаленными работниками: опыт фармацевтических компаний // Baikal Research Journal. 2015. Т. 6. № 5. С. 7. DOI: 10.17150/2411-6262.2015.6(5).18.
4. Баранов Р.А. Интеллектуальное планирование работы медицинских представителей // Цифровая экономика. 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/116565/2018-12-10/intellektualnoe-planirovanie-raboty-medicinskih-predstaviteley> (дата обращения: 22.11.2020).
5. Iljashenko O., Bagaeva I., Levina A. Strategy for establishment of personnel KPI at health care organization digital transformation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. No 497. Article ID 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/497/1/012029.
6. Sarker A., Shamim S.M., Zaman Md.S., Rahman Md.M. Employee's performance analysis and prediction using k-means clustering & decision tree algorithm // Global Journal of Computer Science and Technology: Software and Data Engineering. 2018. Vol. 18. No 1. P. 1–6.

7. Pentland A., Liu A. Modeling and prediction of human behavior // *Neural Computation*. 1999. Vol. 11. No 1. P. 229–242.
8. Roubtsova E., Michell V. A method for modeling of KPIs enabling validation of their properties // *Proceedings of the 5th ACM SIGCHI Annual International Workshop on Behaviour Modelling – Foundations and Applications*. Montpellier, France, 2 July 2013. Article ID 3. DOI: 10.1145/2492437.2492440.
9. Calixto N., Ferreira J. Salespeople performance evaluation with predictive analytics in B2B // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. No 11. Article ID 4036. DOI: 10.3390/app10114036.
10. Влагова А.Ю. Кластерный анализ изменений пространственного положения трубных секций магистрального нефтепровода по данным внутритрубных обследований // *Безопасность труда в промышленности*. 2018. № 1. С. 22–25.
11. Larose D.T., Larose C.D. *Data mining and predictive analytics*. Wiley, 2015.
12. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. *Mining of massive datasets*. Stanford, CA: Stanford InfoLab, 2014.
13. VanderPlas J. *Python data science handbook*. O'Reilly Media, 2016.
14. Joshi P. *Artificial intelligence with Python*. Packt, 2017.
15. Brownlee J. *Introduction to time series forecasting with Python: how to prepare data and develop models to predict the future*. Machine Learning Mastery, 2017.
16. Ko I., Chang H. Interactive visualization of healthcare data using Tableau // *Healthcare Informatics Research*. 2017. Vol. 23. No 4. P. 349–354. DOI: 10.4258/hir.2017.23.4.349.
17. Audric S., De Bellefon M.-P., Durieux E. Descriptive spatial analysis / *Handbook of spatial analysis. Theory and practical application with R* // *Insee Methodes*. 2018. No 131. P. 3–30.
18. Brink H., Richards J.W., Fetherolf M. *Real-world machine learning*. Manning, 2016.
19. Ismail A. How to use Pandas-Profiling on Google Colab / *Python in Plain English*, 2020. [Электронный ресурс]: <https://python.plainenglish.io/how-to-use-pandas-profiling-on-google-colab-e34f34ff1c9f> (дата обращения 31.10.2020).
20. Skiena S.S. *The data science design manual*. Springer, 2017.
21. Вадзинский Р. *Статистические вычисления в среде Excel*. СПб: Питер, 2008.
22. Brownlee J. *Statistical methods for machine learning*. Machine Learning Mastery, 2020.
23. Денежкина И.Е., Задаев С.А. Проверка статистических гипотез с использованием средств визуализации в среде RStudio // *Системный анализ в экономике – 2018. Сборник трудов V Международной научно-практической конференции-биеннале*. Москва, 21–23 ноября 2018 г. Под общ. ред. Г.Б. Клейнера, С.Е. Щепетовой. С. 181–184.
24. Соловьев В.И. *Анализ данных в экономике: теория вероятностей, прикладная статистика, обработка и визуализация данных в Microsoft Excel*. М.: КноРус, 2019.
25. Лукашин Ю.П. *Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов*. М.: Финансы и статистика, 2003.
26. Flach P. *Machine learning: The art and science of algorithms that make sense of data*. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
27. McKinney W. *Python for data analysis: Data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. O'Reilly Media, 2012.
28. Влагова А.Ю., Влагов Ю.Р. Диджитализация маркетинговых кампаний // *Материалы 2-й Международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация промышленности: тенденции, управление, стратегии – 2020»*. Екатеринбург, 27 ноября 2020 г. С. 67–74.

Об авторах

Влагова Алла Юрьевна

доктор технических наук;

ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65;

профессор департамента математики, Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, 125993, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 49;

E-mail: ayvladova@fa.ru

ORCID: 0000-0002-8556-3798

Шек Елена Дмитриевна

студентка, Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, 117997, г. Москва, Стремянный переулок, д. 36;

E-mail: 1399selena@gmail.com

Data preprocessing for machine analysis of sales representatives' key performance indicators

Alla Yu. Vladova^{a,b}

E-mail: ayvladova@fa.ru

Elena D. Shek^c

E-mail: 1399selena@gmail.com

^a V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences
Address: 65, Profsoyuznaya Street, Moscow 117997, Russia

^b Financial University under the Government of the Russian Federation
Address: 49, Leningradsky Prospect, Moscow 125993, Russia

^c Plekhanov Russian University of Economics
Address: 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia

Abstract

Significant transformation of the operational activity of product and service distributors is driven by changes in data-receiving and processing technology. At present, the work of these companies' representatives is digitized to a large extent: for example, the road time, the number and places of meetings with customers are automatically recorded. At the same time, the productivity of managers who do not make direct sales is usually evaluated with the help of surveys, experts and costly double visits, although the existence of large data samples makes possible the use of statistical analysis to identify both insufficient and inflated values of performance indicators. Source data: a relational database that accumulates information about 28 categorical, quantitative, geolocation and temporal parameters of sale representatives' activities for the last year. Based on available data, we created synthetic features (the latitude and longitude features produced the index, region, street, and house features; based upon identifiers we calculated the sum of activities of sales representatives; according to temporary features we defined the season of the year, the day of the week and the period of day features). The methodology for statistical analysis consists of three main stages: collection and processing of primary data; summary and grouping processed information; setting statistical hypotheses and interpreting the results. A probabilistic approach was used to model the level of distortion of sale representatives' activities. As a result, with the built tag cloud we highlighted: the most popular season for advertising campaigns; the most productive departments and sale representatives; days of the week with the largest number of contacts to customers. We established a significant number of records about meetings with clients at the weekends. As a result of the data mining, we made a statistical hypothesis about the possibility of identifying the sale representatives who distort the number and parameters of meetings. A set of synthetic integer, real and categorical features was created to identify hidden relationships. Doubtful data (such as working at weekends or at night) were revealed. The resulting aggregated dataset is grouped by a sale representative's activity ID and the distribution of this feature is plotted. For each sale representative, integer and real features are summarized and outliers that characterize inefficient performance or distortion of data have been detected. Thus, the presence of a large sample of data on the history of movements and activities allowed us to evaluate the productivity of the distribution company's sales representatives based upon indirect features.

Key words: machine learning; key performance indicator; database; time series; geolocation; unsupervised learning; sales representative; b2b.

Citation: Vladova A.Yu., Shek E.D. (2021) Data preprocessing for machine analysis of sales representatives' key performance indicators. *Business Informatics*, vol. 15, no 3, pp. 48–59. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.48.59

References

1. Bode C., Herzog, C., Hook D., McGrath R. (2018) *Dimensions Report*. Cambridge, MA: Digital Science.
2. Dimitriadis N.A. (2007) Efficiency of an entrepreneurial project: audit of sales management systems. *Accounting and Statistics*, no 2, pp. 142–147 (in Russian).

3. Baeva O.N., Khomyakova S.G. (2015) Managing remote workers: the experience of pharmaceutical companies. *Baikal Research Journal*, vol. 6, no 5, pp. 7. DOI: 10.17150/2411-6262.2015.6(5).18 (in Russian).
4. Baranov R.A. (2018) Intelligent planning of the work of medical representatives. *Digital Economy*. Available at: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/116565/2018-12-10/intellektualnoe-planirovanie-raboty-medicinskih-predstaviteley> (accessed 22 November 2020) (in Russian).
5. Iljashenko O., Bagaeva I., Levina A. (2019) Strategy for establishment of personnel KPI at health care organization digital transformation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no 497, article ID 012029. DOI: 10.1088/1757-899X/497/1/012029.
6. Sarker A., Shamim S.M., Zaman Md.S., Rahman Md.M. (2018) Employee's performance analysis and prediction using k-means clustering & decision tree algorithm. *Global Journal of Computer Science and Technology: Software and Data Engineering*, vol. 18, no 1, pp. 1–6.
7. Pentland A., Liu A. (1999) Modeling and prediction of human behavior. *Neural Computation*, vol. 11, no 1, pp. 229–242.
8. Roubtsova E., Michell V. (2013) A method for modeling of KPIs enabling validation of their properties. Proceedings of the *5th ACM SIGCHI Annual International Workshop on Behaviour Modelling – Foundations and Applications*. Montpellier, France, 2 July 2013, article ID 3. DOI: 10.1145/2492437.2492440.
9. Calixto N., Ferreira J. (2020) Salespeople performance evaluation with predictive analytics in B2B. *Applied Sciences*, vol. 10, no 11, article ID 4036. DOI: 10.3390/app10114036.
10. Vladova A.Yu. (2018) Clustering analysis of changes in the spatial position of the trunk oil pipeline sections based on the in-line inspection datasets. *Occupational Safety in Industry*, no 1, pp. 22–25 (in Russian).
11. Larose D.T., Larose C.D. (2015) *Data mining and predictive analytics*. Wiley.
12. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. (2014) *Mining of massive datasets*. Stanford, CA: Stanford InfoLab.
13. VanderPlas J. (2016) *Python data science handbook*. O'Reilly Media.
14. Joshi P. (2017) *Artificial intelligence with Python*. Packt.
15. Brownlee J. (2017) *Introduction to time series forecasting with Python: how to prepare data and develop models to predict the future*. Machine Learning Mastery.
16. Ko I., Chang H. (2017) Interactive visualization of healthcare data using Tableau. *Healthcare Informatics Research*, vol. 23, no 4, pp. 349–354. DOI: 10.4258/hir.2017.23.4.349.
17. Audric S., De Bellefon M.-P., Durieux E. (2018) Descriptive spatial analysis. *Handbook of spatial analysis. Theory and practical application with R*. Insee Methodes, no 131, pp. 3–30.
18. Brink H., Richards J.W., Fetherolf M. (2016) *Real-world machine learning*. Manning.
19. Ismail A. (2020) How to use Pandas-Profiling on Google Colab. *Python in Plain English*. Available at: <https://python.plainenglish.io/how-to-use-pandas-profiling-on-google-colab-e34f34ff1c9f> (accessed 31 October 2020).
20. Skiena S.S. (2017) *The data science design manual*. Springer.
21. Vadzinsky R. (2018) *Statistical calculations in the Excel environment*. Saint Petersburg: Piter (in Russian).
22. Brownlee J. (2020) *Statistical methods for machine learning*. Machine Learning Mastery.
23. Denezhkina I.E., Zadadaev S.A. (2018) Testing statistical hypotheses using visualization tools in the R Studio environment. Proceedings of the *V International Scientific and Practical Conference "System Analysis in Economics"*. Moscow, Russia, 21–23 November 2018, pp. 181–184 (in Russian).
24. Soloviev V.I. (2019) *Data analysis in economics: probability theory, applied statistics, data processing and visualization in Microsoft Excel*. Moscow: KnoRus (in Russian).
25. Lukashin Yu.P. (2003) *Adaptive methods of short-term time series forecasting*. Moscow: Finance and Statistics (in Russian).
26. Flach P. (2012) *Machine learning: The art and science of algorithms that make sense of data*. Cambridge: Cambridge University Press.
27. McKinney W. (2012) *Python for data analysis: Data wrangling with Pandas, NumPy, and IPython*. O'Reilly Media.
28. Vladova A.Yu., Vladov Yu.R. (2020) Digitalization of marketing campaigns. Proceedings of the *2-nd International Scientific and Practical Conference "Digital Transformation of Industry: Trends, Management, Strategies – 2020"*. Ekaterinburg, Russia, 27 November 2020, pp. 67–74 (in Russian).

About the authors

Alla Yu. Vladova

Dr. Sci. (Tech.);

Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, 65, Profsoyuznaya Street, Moscow 117997, Russia;

Professor, Department of Mathematics, Financial University under the Government of the Russian Federation, 49, Leningradsky Prospect, Moscow 125993, Russia;

E-mail: ayvladova@fa.ru

ORCID: 0000-0002-8556-3798

Elena D. Shek

Student, Plekhanov Russian University of Economics, 36, Stremyanny Lane, Moscow 117997, Russia;

E-mail: 1399selen@gmail.com

Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия*

Р.С. Рогулин 

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса

Адрес: 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41

Дальневосточный федеральный университет

Адрес: 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10

Аннотация

Формирование цепей поставок сырья тесно связано с проблемами производства, касающимися определения цен на реализуемые товары. Часто возникает вопрос о необходимости изучения источников поступления сырья и о методологии ценообразования произведенных товаров, с учетом большего числа внешних аспектов рынка. Зачастую в литературе рассматриваются лишь частные подходы к решению проблем производства, однако методы решения комплексной задачи формирования цепей поставок сырья и ценообразования слабо проработаны. В данной работе представлена математическая модель, позволяющая оценить целесообразность взаимодействия предприятия лесопромышленной отрасли с товарно-сырьевой биржей, с ежедневным формированием вектора цен на всем горизонте планирования. Рассматривается двухэтапный алгоритм поиска субоптимального решения, который на первом этапе основывается на линейной оптимизации, а на втором — на градиентном спуске с применением штрафных функций. Модель апробирована на данных товарно-сырьевой биржи России и одного из предприятий Приморского края. Результатом тестирования явились объемы производства каждого типа товара на всем горизонте планирования, объемы доставки сырья из регионов на предприятия, а также способы доставки товаров до потребителя и политика формирования цен. Показано, что почти все товары должны вырасти в цене за счет сокращения избыточного объема заявок (спроса) на всем горизонте планирования, за исключением продукции двух типов. Отмечено, что биржа может обеспечить необходимым объемом сырья производства большой мощности, что демонстрирует возможность при необходимости нарастить объемы закупок сырья. Показано, какие товары будут чаще других входить в план выпуска при оптимизации вектора цен. Проанализированы пути доставки конечных типов продукции. Приведены недостатки и положительные стороны математической модели и алгоритма.

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

Ключевые слова: ценовая политика; оптимизация производства; транспортная задача; лесная промышленность; товарно-сырьевая биржа; цепь поставок; выпуск продукции.

Цитирование: Рогулин Р.С. Математическая модель формирования ценовой политики и плана производственно-транспортной системы лесопромышленного предприятия // Бизнес-информатика. 2021. Т. 15. № 3. С. 60–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.60.77

Введение

С о времен промышленной революции XVIII–XIX веков возросла значимость оптимального управления производством. До этого предприятия, как правило, выпускали продукцию и покрывали ею лишь территориально незначительные объемы рынка. Это, в свою очередь требовало несущественных вычислительных и логических усилий, с чем предприятия легко справлялись. После промышленной революции предприятия стали задаваться вопросом о расширении рынков сбыта и об увеличении производственных мощностей, чтобы максимизировать свою прибыль. Однако при выходе предприятий на новые рынки, они начали сталкиваться с конкуренцией в других регионах. При решении задачи повышения конкурентоспособности предприятий возросла роль принятия решений в отношении выхода на новые рынки, определения объемов производства и способах получения более дешевого сырья. Эти три основных фактора играют значительную роль в менеджменте каждого предприятия и сегодня, в XXI веке [1, 2].

Среди самых острых проблем, с которыми сталкивается предприятие — комплексный вопрос об объемах производства, способе доставки и источнике сырья, способе транспортировки конечного вида продукции до заказчика, а также о формировании цен на конечную продукцию. Первые три проблемы в комплексе представляют собой задачу формирования устойчивых цепей поставок сырья (supply chain). Следует отметить, что вопросы о формировании цепей поставок и о ценовой политике предприятия являются не только краеугольными в процессе деятельности предприятия, но и взаимосвязанными и взаимозависимыми [1]. Трудно решать вышеописанную общую проблему путем последовательного решения каждой из вышеупомянутых четырех задач в отдельности [2]. Последняя проблема особенно сложна, т.к. она требует глубокого анализа рынков, структуры производства и процесса переработки сырья [1].

Формирование оптимальных планов производства, в отличие от формирования ценовой политики предприятия, — это серьезно проработанная в мировой и отечественной литературе проблема. Однако случайные процессы, возникающие в ходе производства, делают большую часть таких планов неприменимыми на практике [2].

Решение проблемы цепей поставок получило серьезное развитие с ростом вычислительных мощностей компьютеров. Однако общепринятый подход к решению данной задачи отсутствует, известны лишь частные случаи решения некоторых задач [1]. В то же время реалии XXI века заставляют менеджмент предприятий задумываться о том, как правильно решать эту задачу исключительно в комплексе с другими, поскольку именно в таком сочетании достигается глобальный экстремум значения прибыли. Необходимость комплексного подхода значительно усложняет и без того очень нетривиальную проблему.

Методы и алгоритмы решения транспортных задач появились несколько раньше, чем способы решения задач, связанных с цепями поставок. Однако проблемы транспортных потоков, равновесий и т.п. до сих пор слабо изучены и не дают общего понимания того, как следует решать ту или иную задачу [2].

Формирование ценовой политики производства — очень сложный и трудоемкий процесс, поскольку здесь для принятия решений необходима серьезная подготовительная деятельность, которая зачастую представляется нереализуемой в ограниченные сроки.

Кроме того, нельзя забывать о невыпуклости допустимого множества решений и стохастичности таких моделей, что также порождает множество проблем при поиске решений [3, 4].

Многие параметры рассматриваемой задачи являются вероятностными, что не позволяет находить оптимальное решение, однако существует возможность поиска субоптимального решения задачи.

Разница между субоптимальным и оптимальным решениями заключается в том, что оптимальное существует лишь для детерминированного случая, в то время как субоптимальное решение доставляет такое значение целевой функции, что для любого вероятностного исхода это значение будет приемлемым и относительно неплохим [3–5]. Однако и в случае поиска субоптимального решения есть ряд трудноразрешимых проблем. Невыпуклость задачи не позволяет находить решения общепризнанными методами и всегда требует модификации известных алгоритмов и схем действий [6].

1. Обзор литературы

Один из основных вопросов при проектировании цепи поставок заключается в выборе метода инвестирования [7]. Эта перспектива в проектировании цепи поставок требует понимания взаимосвязей между затратами, факторами риска цепи поставок (в том числе в условиях глобальных кризисных явлений) и инвестициями в возможности цепи поставок. В статье [7] предлагается многоцелевая стохастическая модель для проектирования цепи поставок в условиях неопределенности. Источники риска моделируются как набор сценариев, а цель состоит в том, чтобы изучить компромиссы между инвестициями в улучшение возможностей цепи поставок и снижение рисков цепи поставок, а также минимизировать стоимость сбоев цепи поставок. Результаты работы [7] показывают, что расширение возможностей цепи поставок можно рассматривать как стратегию смягчения, которая позволяет компании снизить общую ожидаемую стоимость цепи поставок, подверженной сбоям, в том числе в связи с пандемией COVID-19.

Проблеме оптимального принятия решений в цепи поставок, выбору между централизованными и децентрализованными решениями производителей и ритейлеров посвящена работа [8]. Организация и координация цепи поставок рассматривается в условиях налога на выбросы углерода. Приводится оптимизация цепи поставок в трех постановках: при рассмотрении контракта обратной покупки, политики субсидирования и совместной стратегии обратной покупки и субсидии в условиях ограничения налога на выбросы углерода.

В работе [9] рассматривается задача о поставках сырья с товарно-сырьевой биржи до предприятий. Особенности данной работы является поддерж-

ка минимального количества сырья на складе, учет предложения сырья на бирже, прогноз предложения и цен на рынке, розыгрыш пройденного расстояния по железной дороге каждым лотом после его покупки. Для достижения цели работы была разработана модель нелинейного стохастического программирования и алгоритм для поиска субоптимальных решений.

Исследование [10] посвящено анализу управления цепями гуманитарных поставок на примере Индии в обычной рыночной ситуации, не осложненной кризисами в цепях поставок во время пандемии. Авторы подчеркивают важность информационных и коммуникационных технологий (ИКТ). Результаты показывают, что стратегическое и упреждающее планирование имеет важное значение для расширения использования ИКТ в управлении цепями гуманитарных поставок. Авторы отмечают, что это может мотивировать участников внедрять образовательные программы для повышения осведомленности о важности ИКТ. Эти результаты также подтверждают мнение о том, что роль правительства имеет решающее значение для расширения использования ИКТ. Как утверждается в работе [10], эффективная, прозрачная политика рабочих процессов, связанная с использованием системы управления знаниями, позволит максимизировать преимущества ИКТ и еще больше повысить эффективность цепей поставок.

В настоящий момент большое внимание приковано к работам в области цепей поставок, где спрос описывается как случайная величина, значение которой со временем может меняться [11, 12]. Для учета этой особенности авторы работы [13] разработали нелинейную модель, позволяющую обеим сторонам сделки принимать решения, отвечающие всем ограничениям (с обеих сторон), и находить оптимальное решение в сложившейся ситуации.

Однако не всегда можно представить проблему сторон как единую математическую модель, в связи с чем на передний план выходят многопериодные модели. Так, авторы работы [14] разработали двухэтапную производственно-транспортную распределительную сеть, которая отличается возможностью учета неопределенности спроса на конечную продукцию. Цель такой модели заключается в определении минимальных значений сразу двух параметров: совокупной стоимости цепи поставок и времени на обслуживание. Для решения поставленной задачи был использован L-образный алгоритм. Авторы работы [15] расширили многопе-

риодную трехэшелонную логистическую сеть прямого и обратного действия в условиях различных неопределенностей, включая спрос. Целью работы было отыскать такое распределение, при котором значение прибыли было бы максимально. Для достижения цели работы использовались эшелоны прямого и обратного распределения товаров.

В работе [16] разработана двухэтапная стохастическая модель по решению проблемы цепи поставок на краткосрочном горизонте планирования, в условиях неопределенности спроса. Авторы искали эффективное распределение товаров по потребителям, исходя из стохастического спроса, с целью максимизировать конечное значение прибыли. Как показано в работе [17], особую роль в задачах, связанных с цепями поставок, играет одновременная оптимизация разнородных и несоизмеримых параметров. Авторская модель является многопродуктовой и многопериодной, она имеет сложную ступенчатую архитектуру, позволяющую решать задачу производства со случайными рыночными и организационными запросами покупателей и ценами на товары.

Стохастический характер спроса очень точно описывает ситуацию типа «продавец — покупатель» и играет большую роль в оценке степени эффективности полученной цепи поставок.

В работе [18] была спроектирована многопродуктовая сеть поставок, позволяющая учитывать вероятностные сценарии развития событий. В качестве алгоритма поиска решений авторы остановились на алгоритме ветвления и привязки. В работе [19] была решена проблема размещения и распределения подзадач со случайным спросом, чтобы иметь возможность принимать решения на различных уровнях. Цель задачи заключалась в достижении максимального значения прибыли. В качестве алгоритма использовался модифицированный генетический алгоритм. В статье [20] сформулирована новая двухцелевая смешанно-целочисленная задача управления цепями поставок, которую удалось решить тремя классическими способами, а полученные решения носили характер Парето-оптимальных.

Таким образом, можно считать, что рассматриваемая тема в рамках задачи управления цепями поставок актуальна и довольно широко отражена

в литературе. Однако отметим некоторые важные особенности приведенного обзора литературы:

- ◆ недостаточно внимания уделено проблемам цепей поставок и экономической политике как комплексной проблеме, для любого типа производства;
- ◆ недостаточно проработана тема взаимодействия предприятий лесопромышленной отрасли с товарно-сырьевыми биржами.

2. Цели, задачи и гипотеза исследования

Рассмотрим деятельность предприятий лесопромышленной отрасли. Здесь задействованы три наиболее важных процесса производства: доставка и объемы закупок сырья с биржи, объемы производства каждого типа продукта (исходя из имеющихся запасов сырья) и метод доставки конечной продукции потребителю.

Для определенности необходимо отметить источники поступления сырья на биржу. Биржа заключает договоры с арендаторами делян из регионов о том, что они могут пользоваться площадкой для торгов. После совершения сделки между предприятием по переработке сырья (лесопромышленным комплексом — заказчиком) и деляной (продавцом) заявленный в договоре¹ объем сырья отправляется заказчику.

Как правило, предприятия получают заявки от заказчиков заблаговременно. В связи с этим представляется возможным сделать предположение о том, что для планирования своей деятельности предприятие может применять большие горизонты планирования. Здесь следует отметить, что спрос на товары лесопромышленной отрасли имеет сезонный характер, что усложняет планирование деятельности компании.

Цель работы заключается в решении задачи принятия решения об оптимальном объеме выпуска товаров, об объемах покупки сырья, о доставке готовой продукции до конечного потребителя и о формировании ценовой политики предприятия на всем горизонте планирования для оценки целесообразности взаимодействия предприятия с лесной товарно-сырьевой биржей.

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

Для достижения цели работы поставлены следующие задачи исследования:

1. Построение экономико-математической двух-этапной модели:
 - а. для формирования субоптимального вектора производства продукции по дням на заданном горизонте планирования цепей поставок сырья и вектора объемов транспортировки сырья до конечного потребителя;
 - б. для поиска эффективного вектора цен реализации произведенной продукции.
2. Составление согласованного решения для пп. (а) и (б) списка задач;
3. Анализ результатов тестирования модели.

Сформулируем гипотезу исследования. Она состоит в том, что за счет увеличения цены и, как следствие, сокращения объемов заявок можно добиться увеличения прибыли от реализации продукции лесопромышленной отрасли на рынках сбыта, при взаимодействии с товарно-сырьевыми биржами как источниками сырья.

3. Математическая модель

Любое производство, в том числе лесопромышленное, не способно функционировать без сырьевой базы. Для ее обеспечения необходимо определить деляны, откуда будет осуществляться доставка сырья. Для этого воспользуемся услугами Санкт-Петербургской Международной Товарно-сырьевой Биржи (СПБМТСБ)². 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 товару. На бирже представлены многие регионы, откуда потенциально может поступать сырье.

После поступления достаточного объема сырья на склад производства предприятие должно принять решение об оптимальном векторе производства конечной продукции, с ориентацией на спрос. После реализации планов производства необходимо доставить товары покупателям в соответствии с их спросом, с использованием известных транспортных узлов.

Для решения задачи введем следующие переменные и обозначения [21]:

- k – вид производимой продукции, $k = 1, \dots, K$;
- l – вид сырья для производства продукции, $l = 1, \dots, L$;
- m – номер дня в рамках рассматриваемого горизонта планирования, $m = 1, \dots, M$;
- w – номер недели в рамках рассматриваемого горизонта планирования (определяется в зависимости от номера дня), $w = 1, \dots, W$;
- s – номер месяца в рамках рассматриваемого горизонта планирования, $s = 1, \dots, S$;
- c_{ilrm} – цена покупки заявки i сырья типа l в регионе r в день m (руб.), включая стоимость доставки;
- V_{ilrm} – объем сырья типа l в заявке i из региона r в день m (м³);
- v_{ilrm} – покупаемый объем сырья типа l в заявке i из региона r в день m (м³);
- u_{lm} – запас на складе сырья типа l в день m (м³);
- $u_m^{\max}$ – максимальная вместимость склада в день m (м³);
- $u_m^{\min}$ – уровень неприкосновенного (страхового) запаса сырья типа l на складе в любой из дней на всем горизонте планирования (м³);
- v'_{ilr} – объем сырья типа l , купленный в предыдущем периоде, про который известно, что он поступит на склад в день m (м³);
- A_{lk}^s – объем затрат ресурса l на производство единицы продукции k в месяце s (м³);
- p_{km} – цена продажи продукции типа k в день m (руб.);
- N – количество независимых имитационных итераций;
- FC_n – фиксированные издержки для имитационной итерации n (руб.), $n = 1, \dots, N$;
- x_{km} – объем производства товаров типа k в день m (шт.);
- z_{ijkw} – объем продукции k , перевозимой между пунктами i и j в неделю w (шт.);
- Z_{ijw} – пропускная способность дуги между пунктами i и j на неделе w (шт.);
- $\tilde{z}_{ijw}$ – индикатор использования дороги из пункта i в пункт j на неделе w в графе-решении транспортной подзадачи;
- c_{ijw} – затраты на транспортировку из пункта i в пункт j в неделю w (руб.);
- I – количество заявок, которые были выкуплены предприятием в предыдущий период (до момента $m = 0$) и для которых даты прихода на склад известны;
- R – количество регионов, из которых поступают заявки;

² <https://spimex.com/>

T_r – норма временных затрат (в днях) на доставку любого объема сырья из региона r по железной дороге, $r = 1, \dots, R$;

Q_{j^*kw} – спрос розничной компании j^* на продукцию k в неделю w ;

$\bar{Q}_{j^*kw}$ – математическое ожидание объема спроса розничной компании j^* на продукцию k в неделю w ;

M_1 – количество дней текущего периода, для которых закупленные заявки поступят на склад в течение следующего периода;

J – множество вершин в транспортном графе;

J^{out} – множество вершин, инцидентных пункту производства;

J^* – множество розничных торговцев (конечных пунктов назначения произведенной продукции);

B_0 – бюджет предприятия, отведенный для ведения торгов, по состоянию на момент начала работы модели;

x_{km1} – гипотетический объем производства продукции типа k в день $m = M + 1, \dots, M_1$, который определяется следующим образом:

$$\dot{x}_{km1} = \left[\frac{1}{2} \left(\max_{m^* \in [m-t, m]} (x_{km^*}, x_{k(m^*-1)l}) + \min_{m^* \in [m-t, m]} (x_{km^*}, \dot{x}_{k(m^*-1)l}) \right) \right],$$

где t – количество дней, за которые выбираются максимальные и минимальные значения x_{km^*} в введенных ниже ограничениях.

Значения параметров u_{l0} и B_0 задаются и соответствуют последнему дню предыдущего периода.

В качестве целевой функции будем рассматривать доналоговую прибыль предприятия на горизонте планирования M . Тогда математическая запись задачи оптимизации приобретает следующий вид:

$$\max_p \max_{x, v, z, \tilde{z}} \sum_m \left(\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} c_{ijw} \tilde{z}_{ijw} \right) \quad (1)$$

$$u_{lm} = u_{l(m-1)} + \sum_{i,r} v_{ilr(m-T_r)} + \sum_{i,r} v'_{ilr(m-T_r)} - \sum_k A_{lk}^s x_{km}; \quad l = 1, \dots, L; m = 1, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_l u_{lm} \leq u_m^{max}; m = 1, \dots, M + M_1 \quad (3)$$

$$u_{lm} \geq u_l^{min}; l = 1, \dots, L; m = 1, \dots, M + M_1 \quad (4)$$

$$\sum_k A_{lk}^s x_{km} \leq u_{lm}; l = 1, \dots, L; m = 1, \dots, M \quad (5)$$

$$B_0 + \sum_{m=1}^{m^*} \left(\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} c_{ijw} \tilde{z}_{ijw} - FC_n \right) \geq 0; \quad m^* = 1, \dots, M \quad (6)$$

$$0 \leq v_{ilrm} \leq V_{ilrm} \quad (7)$$

$$\sum_j z_{ijkw} = \sum_i z_{ijkw}; k = 1, \dots, K; w = 1, \dots, W; i, j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J^{out}} z_{1jkw} = \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} x_{km}; k = 1, \dots, K; w = 1, \dots, W \quad (9)$$

$$\sum_i z_{ij^*kw} \leq Q_{j^*kw}; j^* \in J^*; k = 1, \dots, K; w = 1, \dots, W \quad (10)$$

$$\sum_k z_{ijkw} \leq \tilde{z}_{ijw} Z_{ijw}; i, j \in J; w = 1, \dots, W \quad (11)$$

$$B_0 = \text{const} \quad (12)$$

$$u_{l0} = \text{const} \quad (13)$$

$$u_{lm}, x_{km}, v_{ilrm} \in Z^+ \quad (14)$$

$$z_{ijkw} \geq 0 \quad (15)$$

$$\tilde{z}_{ijw} \in \{0; 1\} \quad (16)$$

$$u_{lm} = u_{l(m-1)} + \sum_{i,r} v_{ilr(m-T_r)} + \sum_{i,r} v'_{ilr(m-T_r)} - \sum_k A_{lk}^s x_{km1}; \quad l = 1, \dots, L; m = M + 1, \dots, M_1 \quad (17)$$

$$p_{km} = \text{const}; m = 1, \dots, 7; k = 1, \dots, K \quad (18)$$

$$\left| \frac{p_{k(m+1)} - p_{km}}{p_{km}} \right| \leq \gamma; m > 7; k = 1, \dots, K \quad (19)$$

$$A_{lk}^{s+1} = \max \left(0, \min \left(A_{lk}^s, A_{lk}^s + \varepsilon_{lk}^{(1)} \right) \right); \varepsilon_{lk}^{(1)} \in \left[-\alpha^{(1)}, \beta^{(1)} \right] \quad (20)$$

$$u_{m+1}^{max} = \max \left(u_m^{max}, u_m^{max} + \varepsilon_m^{(2)} \right); \varepsilon_m^{(2)} \in \left[-\alpha^{(2)}, \beta^{(2)} \right] \quad (21)$$

$$Q_{nkw} = \left(\bar{Q}_{nkw} + \varepsilon_{nkw}^{(4)} \right) \cdot \rho_{nkw}; \varepsilon_{nkw}^{(4)} \in \left[-\alpha^{(4)}, \beta^{(4)} \right] \quad (22)$$

$$\rho_{nkw} = \begin{cases} \frac{c^{(2)}}{\left(1 + \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} \frac{(p_{k(m+7)} - p_{km})}{7 \cdot p_{km}} \right)^{c^{(1)}}}, \\ \text{если } \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} \frac{(p_{k(m+7)} - p_{km})}{p_{km}} \geq 0 \\ c^{(2)} \left(1 + \left| \sum_{m=(w-1) \cdot 7 + 1}^{w \cdot 7} \frac{(p_{k(m+7)} - p_{km})}{7 \cdot p_{km}} \right| \right)^{c^{(1)}}, \text{ иначе} \end{cases} \quad (23)$$

$$FC_n \in [\alpha^{(3)}, \beta^{(3)}] \quad (24)$$

$$Z_{ijw} \in [\alpha^{(5)}, \beta^{(5)}] \quad (25)$$

$$c_{ijw} \in [\alpha^{(6)}, \beta^{(6)}] \quad (26)$$

где $\varepsilon_{lk}^{(1)}$, $\varepsilon_m^{(2)}$, FC_n , Z_{ijw} , c_{ijw} — равномерно распределенные случайные величины³;

$\varepsilon_{j^*kw}^{(4)}$ — компонента шума⁴ случайной величины $\bar{Q}_{nkw}$ на момент начала недели w на товар k для розничного продавца j^* ;

$$\alpha^g, \beta^g \geq 0; g = 1, \dots, 6;$$

$$\alpha^g, \beta^g \in Z^+; g = 1, \dots, 3.$$

Рассмотрим подробнее выражения (1–26). Цель задачи (1) — найти такое комбинаторное распределение p , x , v , z , $\tilde{z}$ чтобы значение прибыли было максимально. Мониторинг объемов сырья на складе ведется каждый день (2). Любой склад обладает своей максимальной вместительностью (3), и объем поступающего сырья не может его превышать. Поскольку любое производство сопряжено с определенным риском того, что сырье может дойти до склада несколько позже, чем ожидается, введем понятие неприкосновенного (страхового) запаса сырья каждого вида (4). Ограничение (5) утверждает, что объем производства продукции ограничен объемом сырья, имеющегося на складе. Из ограничения (6) следует, что объем накопленной прибыли за каждый день производства не может принимать отрицательное значение. Ограничение (7) говорит о том, что из каждой заявки нельзя купить сырья больше, чем заявлено. Объем входного потока готовой продукции равен выходному потоку (8), иначе говоря, на промежуточных пунктах транспортировки готовой продукции не может оставаться никаких товаров. На граф подается тот объем готовой продукции, который был произведен за рабочую неделю (9). Объем входящего потока готовой продукции в вершины с потребителем не может превосходить его объем спроса (10). Ограничение (11) позволяет отслеживать использование разных дуг графа, по которым ведется транспортировка готовой продукции. Формулы (12) и (13) утверждают, что начальные бюджет компании и объем сырья на складе изначально даны. Формулы (14–16) отражают характер оптимизационных пере-

менных. Ограничение (17) позволяет продолжить формирование вектора закупок сырья, вектора производства, вектора способа доставки товаров с учетом небольшого добавочного периода, если модель будет использоваться в течение нескольких периодов. Формула (18) отражает то, что цены фиксированы на первый день работы предприятия. Формула (19) показывает, что за день цена может меняться не более, чем на $100 \cdot \gamma$ %. Формулы (20–26) отражают стохастический характер изменений, иначе говоря, для каждой реализации таких случайных величин будет определяться оптимальное или субоптимальное решение системы.

Как следует из формул (1–26), модель является нелинейной и стохастической. Полученную задачу, согласно работе [22], можно классифицировать как задачу стохастического программирования с детерминированной целевой функцией и стохастическими ограничениями. Поиск оптимального решения в задачах стохастического программирования нетривиален и всегда требует частного подхода, особенно если целевая функция или ограничения нелинейны [22].

Рассмотрим подходы к решению задачи. Наиболее широко известны такие методы, как метод детерминированного эквивалента (МДЭ), доверительный метод (ДМ) (более известный, как обобщенный минимаксный подход [22–24]) и некоторые другие. МДЭ позволяет уйти от стохастических ограничений к ограничениям детерминированного характера и свести исходную задачу стохастического программирования к задаче «детерминированной» оптимизации, что позволяет расширить инструментарий для решения проблемы. Однако этот метод не всегда можно применить, поскольку основные утверждения, свойственные этому методу, предъявляют достаточно жесткие требования к структуре функции потерь и распределению вектора случайных параметров. В некоторых случаях получается успешно оценить реальное значение функции квантили с помощью некоторой верхней границы доверительной оценки. Поскольку такая оценка представляет собой функцию максимума на соответствующем доверительном множестве, задачу минимизации функции квантили можно заменить на минимаксную задачу, решение которой можно получить численно или аналитически [22, 25].

³ Поскольку природа этих величин неизвестна, делается допущение, что они распределены равномерно

⁴ Под шумом обычно понимается некоторое случайное отклонение

В работе [26] предложена постановка двухэтапной задачи линейного стохастического программирования. Новизна постановки в данной статье состоит в том, что ограничения задачи второго этапа представляют собой линейную задачу дополнительно с детерминированной матрицей компенсации. Введение таких ограничений позволяет получать компенсацию плана на «пределе разрешимости», что обеспечивается условиями дополняющей нежесткости задачи дополнительности.

Исходя из краткого обзора существующих работ, отметим, что задачу (1–26) можно свести к двухэтапной модели, где на первом шаге разыгрываются значения стохастических параметров, фиксируется вектор цен и решается классическая задача смешанно-целочисленного программирования (1–16), а на втором шаге применяются штрафные функции и метод градиентного спуска для изменения вектора цен реализации товаров.

Для решения задачи (1–26) будем проводить итерационный поиск субоптимального решения с использованием двух подзадач – этапов (поиск оптимального плана производства, доставки сырья и товаров и поиск субоптимального вектора цен для реализации товаров).

Этап 1. Решить задачу (2–16) с целевой функцией вида (27):

$$\max_{x, v, z, \tilde{z}} \sum_m \left(\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} c_{ijw} \tilde{z}_{ijw} \right), \quad (27)$$

где $x = \{x_{km}\}_{km}$, $v = \{v_{ilrm}\}_{ilrm}$, $z = \{z_{ijkw}\}_{ijkw}$, $\tilde{z} = \{\tilde{z}_{ijw}\}_{ijw}$.

На первой итерации вектор $p = p\{p_{km}\}_{km}$ генерируется случайным образом с заданным начальным условием (18). Значение спроса рассчитывается с использованием (18, 19, 23) (при повторном применении этапа 1 на следующей итерации будут использоваться значения цен, полученные на предыдущей итерации этапа 2). Значения из выражений (20–26) разыгрываются каждую итерацию. Поиск решения задачи осуществляется с использованием алгоритма Гомори, включенного в систему MathWorks⁵.

Этап 2. Для фиксированных значений x_{km} , v_{ilrm} , z_{ijkw} , $\tilde{z}_{ijw}$, полученных на этапе 1, следует решить оптимизационную задачу (10, 22, 23, 28, 29):

$$\max_p \sum_m \left(\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} c_{ijw} \tilde{z}_{ijw} \right) \quad (28)$$

$$p_{km^*} \cdot (1 - \gamma) \leq p_{k1+m^*} \leq p_{km^*} \cdot (1 + \gamma);$$

$$m^* = 1, \dots, M - 1 \quad (29)$$

Этап 3. После этапа 2 необходимо проверить значение разности значений прибыли. Повторять последовательно этапы 1 и 2 до тех пор, пока значение прибыли g итераций подряд начнет меняться меньше чем на значение ϵ , выйти из алгоритма.

Как можно заметить, на этапе 1 осуществляется линейная оптимизация: решается задача смешанно-целочисленного линейного программирования. Однако второй этап представляет собой оптимизацию нелинейного функционала. Для поиска оптимального решения воспользуемся градиентным спуском [27, 28] и штрафными функциями [29–31]. Тогда задача (10, 18, 22, 23, 28, 29) примет вид (18, 22, 23, 30–34, 36) с правилом итерирования:

$$F(p) = \sum_m \left(\sum_k p_{km} x_{km} - \sum_{i,l,r} c_{ilrm} v_{ilrm} - \sum_{i,j} c_{ijw} \tilde{z}_{ijw} \right) +$$

$$+ \frac{\lambda^1}{2} [G_1]_-^2 - \lambda^2 G_2 \rightarrow \max_p \quad (30)$$

$$G_1(p, j^*, k, m) = \sum_i z_{ij^*kw} - \left(\bar{Q}_{nkw} + \varepsilon_{j^*kw}^{(4)} \right) \cdot \rho_{nkw}(p) \quad (31)$$

$$G_2(p, k, m) = \frac{(p_{k1+m} - p_{km})_+^2}{2} + \frac{(p_{km} - p_{k1+m})_+^2}{2} \geq 0 \quad (32)$$

$$(p_{k1+m} - p_{km})_+^2 = \begin{cases} (p_{k1+m} - p_{km})^2, \\ \text{если } p_{k1+m} - p_{km} \cdot (1 - \gamma) \leq 0 \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \quad (33)$$

$$(p_{km} - p_{k1+m})_+^2 = \begin{cases} (p_{km} - p_{k1+m})^2, \\ \text{если } p_{km} \cdot (1 + \gamma) - p_{k1+m} \leq 0 \\ 0, \text{ иначе} \end{cases} \quad (34)$$

$$p^{(k+1)} = p^{(k)} - h \nabla F(p^{(k)}) \quad (35)$$

$$[G_1(p, j^*, k, m)]_-^2 = \min \left(0, \left(\sum_i z_{ij^*kw} - \left(\bar{Q}_{nkw} + \varepsilon_{j^*kw}^{(4)} \right) \cdot \rho_{nkw}(p) \right) \right)^2 \quad (36)$$

⁵ MathWorks. Documentation. Mixed-Integer Linear Programming Algorithms: <https://it.mathworks.com/help/optim/ug/mixed-integer-linear-programming-algorithms.html>

где $m = 1, \dots, M$;

$p^{(k)}$ – вектор цен на итерации k ;

h – величина шага;

$\lambda^1 = (\lambda_{j^* km}^1)_{j^* km}$ и $\lambda^2 = (\lambda_{km}^2)_{km}$ – векторы, элементами которых являются большие числа.

Критерием останова будем считать достижение такого значения k , чтобы выполнялось неравенство

$$\nabla F(p^{(k+1)}) - \nabla F(p^{(k)}) \leq \varepsilon.$$

Рассмотрим формулы (30–35) подробнее. Формула (30) – целевая функция со штрафами

$$\frac{\lambda^1}{2} [G_1]_-^2, \lambda^2 G_2.$$

Ограничение (31) отражает разность между доставленным до заказчика объемом продукции и значением спроса того же заказчика. Если значение цены выходит за рамки ограничений (32–34, 36), то целевая функция получает штраф. Формула (35) – правило подсчета вектора цен.

Решение будет стремиться к такому состоянию, когда цены будут удовлетворять ограничениям, а объем заявок на товары будет стремиться к объему доставленной продукции. Последнее позволит увеличить цену до максимума и сократить количество заявок⁶ и издержки при производстве и доставке готовых товаров, что также увеличит значение прибыли до субоптимального значения.

4. Апробация модели

Для апробации модели было выбрано одно из ведущих лесопромышленных предприятий Приморского края. Компания стремится извлечь максимум прибыли из своей деятельности и работать с соблюдением действующего законодательства, поэтому предприятие рассматривает возможность сотрудничества лишь с биржей. Поскольку предприятие пытается только оценить целесообразность сотрудничества с биржей, воспользуемся уже опубликованными данными биржи за весь период. Однако мы сфокусируем внимание на интервале с 01.02.2020

по 31.11.2020, т.к. на нем наблюдается сезонный спад спроса на товары и предложения на рынке сырья. За рассматриваемый период было опубликовано 1509 сделок (заявок). В наибольшей степени на бирже представлены предприятия из четырех регионов: Иркутская область ($r = 1$), Республика Удмуртия ($r = 2$), Московская область ($r = 3$) и Пермский край ($r = 4$). 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.

С официального сайта биржи за указанный период был собран массив следующих данных: цены предлагаемых заявок c_{irm} , объемы заявок v_{ilm} , цены реализации конечных товаров p_{k1} , количество заявок по каждому типу сырья. Кроме того, на основе анализа статистики продаж предприятия будем считать заданным на рассматриваемом горизонте планирования ежедневный спрос каждого вида товара $\sum_n Q_{nkm}^8$.

Для решения транспортного блока и составления матрицы смежности транспортных промежуточных и конечных пунктов воспользуемся картой международных транспортных коридоров железных дорог Евразии⁹. Для оценки пропускной способности воспользуемся данными предприятия.

Основные исходные данные, характеризующие предприятие, представлены в *таблицах 1–3*.

Рассмотрим требования к вычислительной мощности компьютера, с помощью которого предстоит найти решение задачи, и отметим некоторые особенности.

Количество ограничений и переменных составило 10189 и 49779 соответственно. Это позволяет утверждать, что матрица ограничений слабо разрежена, что, в свою очередь, увеличивает время поиска решения. Ввиду этого максимальное количество вершин полиэдрального допустимого множества решений было ограничено 1500 единицами, что крайне мало (но даже для такого числа вершин поиск решений будет весьма долгим).

⁶ Отметим, что мы не можем утверждать об истинности метода расчета коэффициента ρ_{nkv} , хотя он отвечает основным экономическим предположениям о поведении спроса в зависимости от цены. Для прояснения этого вопроса требуются дополнительные исследования

⁷ Причины того, почему лесоперерабатывающие компании часто работают с нарушением законодательства, рассмотрены в работе [19]

⁸ Для будущих исследований в области моделирования процессов производства из области цепей поставок планируется прогнозировать спрос на продукцию производителя на основе данных, имеющихся у предприятия. Что касается данной работы, то здесь был использован зашумленный автором объем спроса за 2020 год и проводилась оценка значений цен по реализации конечных товаров

⁹ <http://www.expresskt.ru/wp-content/uploads/2017/08/Evroaziatskie-transportnye-koridory.pdf>

Таблица 1.

**Основные исходные
параметры предприятия**

Параметры	Значения параметров
$u^{max}, \text{м}^3$	7750
$u_l^{min}, \forall l, \text{м}^3$	50
$u_{l0}, \text{м}^3$	(2250; 2250)
$p_{kl}, k = 1, \dots, 9, \text{тыс. руб.}$	(35; 52,89; 73,4; 83,54; 87,125; 97,47; 111,72; 121,97; 143,4)
$T_r, \text{дни}$	(3; 5; 6; 5)
$B_0, \text{руб}$	20 000 000
h	$\max(150; 1000 - 25 k)$
ρ	1e-02
g	2
λ_{jkm}^1	1e+04
λ_{km}^2	1e+04
c^1	0,5
c^2	1
γ	0,006

Таблица 2.

**Затраты сырья на производство
единицы продукции**

Тип сырья (l) \ номер товара (k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\sum_k A_{lk}$
1	3	4	5	4	5	5	7	5	9	47
2	2	4	4	6	6	7	6	9	7	51

Таблица 3.

**Диапазоны значения некоторых
случайных величин**

Параметры	Значения	Параметры	Значения
$\alpha^{(1)}$	0,1	$\beta^{(1)}$	10
$\alpha^{(2)}$	100	$\beta^{(2)}$	100
$\alpha^{(3)}$	2 000 000	$\beta^{(3)}$	2 820 000

Для ускорения поиска решения воспользуемся 12-поточным процессором Ryzen 2600x и оперативной памятью объемом 64 Гб, а также методикой параллельного программирования. Поиск решения для каждой задачи на этапе 1 будут вычисляться параллельно, и именно для этого требуется большой объем оперативной памяти. Уточним, что такой объем оперативной памяти требуется лишь на шаге формирования матриц ограничений и целевых функций для разных итераций.

Для вычислений воспользуемся высокоуровневым языком программирования Matlab¹⁰ и функцией из пакета расширения intlinprog для поиска решений задач линейной оптимизации. Для того, чтобы ускорить процесс поиска решений мы специально не накладывали целочисленное ограничение на переменные z . Это не повлияет на корректность решения задачи, т.к. в теории транспортной задачи доказывается, что решение такой подзадачи всегда является целочисленным [21].

5. Обсуждение

Рассмотрим поведение прибыли на всем горизонте планирования (рисунок 1). Как видно из рисунка, значение прибыли изменялось немонотонно. Это связано с тем, что на каждом шаге разыгрывались случайные величины (20, 21, 24–26) и $\varepsilon_{jkw}^{(4)}$ – компонента шума спроса на товары. Последний элемент особенно сильно влиял на конечное значение объема спроса на товары, что, в свою очередь, отражалось на показателе прибыли.



Рис. 1. Визуализация изменения показателя прибыли в зависимости от значения цены $p^{(k)}$ на итерации k

¹⁰ <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/intlinprog.html>

Последнее значение прибыли (после срабатывания критерия останова) было разыграно четыре раза, чтобы понять примерный разброс этого значения в зависимости от реализаций случайных величин.

При тестировании финального решения удалось заметить следующее. Поведение накопленной прибыли в трех из четырех случаев стабилизируется (особенно хорошо это можно наблюдать при анализе поведения прибыли по дням). Сложным с точки зрения принятия решения является промежуток между первым и восьмидесятым днями горизонта планирования. Сложность заключается в том, чтобы подобрать такие значения векторов p , x , v , z , $\tilde{z}$, чтобы значения прибыли были положительными.

Отметим, что по коммерческим причинам мы не можем отразить спрос $\dot{Q}_{j^{*}kw}$, однако, можно заметить, что спрос имеет убывающую к лету тенденцию, а после лета — тенденцию к росту.

Также заметим, что выдвинутая гипотеза о повышении значения прибыли за счет увеличения цены и, как следствие, сокращения объемов поступивших заявок на товары при взаимодействии с товарно-сырьевой биржей как источником сырья для производства, подтверждается.

Аналогичная тенденция наблюдается и в части предложения сырья типов 1 и 2 на бирже. Это связано с тем, что летом многие места добычи сырья труднодоступны ввиду заболоченности и сложной проходимости [21]. Однако, значения предложения сырья не сильно различаются по месяцам, что связано с нарушением законодательства в области лесопользования [21]. Можно сделать вывод, что объем покупок на бирже незначителен относительно предложения, что, в свою очередь, не приводит к резкому росту цен и нехватке сырья для производства. Иначе говоря, биржа может полностью обеспечить предприятие всеми необходимыми видами и объемами сырья без особой дополнительной нагрузки.

Падение спроса на товары и предложения сырья ведет к сложной управленческой ситуации на производстве — нет четкого понимания, как действовать так, чтобы выполнялось условие о положительном значении накопленной прибыли за каждый день в течение всего горизонта планирования. Если данное условие не будет выполняться, то необходимо ставить вопрос о привлечении инвестиций, что значительно усложняет исходную задачу.

Рассмотрим объемы закупок сырья по регионам. Несмотря на транспортную близость Иркутской области к Приморскому краю, где находится предприятие, и несмотря на максимальный объем предложения на бирже сырья из Иркутской области, предпочтение было отдано закупкам из Республики Удмуртия ($\approx 40\%$) и Московской области ($\approx 30\%$). Это сильно отличается от результатов закупок, показанных в работе [21], где Иркутская область доминирует в поставках сырья. Это связано с тем, что в текущей работе дополнительно принимаются во внимание факторы изменения цен на конечную продукцию, решается транспортная подзадача и предусматривается возможность выбора объема сырья из заявки с биржи¹¹. Влияние этих трех факторов на изменение объемов закупок предполагается рассмотреть в последующих работах.

Рассмотрим объемы производства отдельных видов продукции. Товар типа 9 является наиболее ходовым. Кроме того, для этого товара можно наблюдать отличие от общей тенденции: чем ближе к лету, тем выше спрос. Вероятно, это можно объяснить тем, что цена на этот товар наибольшая, а отношение затрат к выручке наименьшая по сравнению с аналогичными показателями других видов продукции.

Что касается товара 8, то его производство с февраля по апрель растет, а после апреля падает.

Сложную динамику изменения объемов производства демонстрирует товар 7. До сентября месяца сложно утверждать о характере изменения объемов производства этого товара, но можно с уверенностью сказать, что этот тип товара должен производиться в значительных объемах в сентябре и октябре, после выхода из сезонного спада спроса.

С высокой долей уверенности можно утверждать, что целесообразность его производства товара 6 крайне мала.

Также сложную для анализа динамику изменения объемов производства демонстрируют товары 1–5. Несмотря на то, что они часто производятся, их объемы на общем фоне производства других товаров незначительны.

Рассмотрим ситуацию, которая происходила на складе за время производства. Введем оператор $ave(X)$, результатом которого является среднее

¹¹ В работе [19] рассмотрен другой метод игры на бирже, когда заявку можно выкупить только целиком

значение X на всех итерациях. Здесь можно заметить, что амплитуда запасов сырья на складе значительная для каждой итерации. Это позволяет утверждать, что степень сложности процесса планирования производства существенно зависит от процедуры пополнения склада сырьем. Здесь стоит отметить, что в среднем результаты работы модели показывают, что степень наполненности склада выше 50%. Это связано с тем, что летом стоимость сырья растет, а ближе к холодным периодам (зима, поздняя осень и ранняя весна) падает. Результаты моделирования показывают, что для того, чтобы не закупать сырье летом по завышенной цене, им следует запастись несколько раньше.

В середине апреля и июня можно наблюдать, что в среднем объем запаса сырья на складе достигает своего пика u_m^{max} , и что почти каждый день (97%) на всем горизонте планирования ведется закупка и поступления сырья на склад, что в совокупности также осложняет процесс планирования запасов.

Рассмотрим транспортную подзадачу (рисунок 2). Здесь черным цветом обозначены те маршруты, по которым отношение количества транспортируемых товаров к пропускной способности дуги превышает 66,67%. Для маршрутов, выделенных серым и пунктиром, эти коэффициенты выше 33,33% и ниже 66,67%.

Главные пути лежат через пункты $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6$ в пункт 10, а также из пункта 1 в пункт 8: $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 8$. Для случая с вершиной 9 ситуация несколько иная. Тут два потока сливаются в один: это часть вышеупомянутого потока $1 \rightarrow 2 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 9$ и $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 9$, где в среднем на второй поток приходится 65,71% грузооборота для вершины 9.

Однако есть и другие маршруты, которые используются реже ($2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 3$, $6 \rightarrow 7$, $5 \rightarrow 6$, $5 \rightarrow 4$). Эти маршруты используются очень редко, их средняя степень заполняемости не превосходит 0,56%. Это в основном связано с тем, что эти маршруты не находятся на пути к конечному покупателю. Отметим, что существует и более существенные по степени заполняемости маршруты. Среди них стоит рассмотреть $6 \rightarrow 5$, $5 \rightarrow 7$, $7 \rightarrow 10$. Здесь дуги графа используются ввиду того, что основные маршруты не справляются с потоком грузов.

Главной задачей данного исследования является выявление того, как будет меняться цена на каждый вид товара из расчета, чтобы при решении задачи (1–16) финальное значение прибыли было максимальным. Для этого рассмотрим рисунки из онлайн-приложения¹².

Для товара любого типа, кроме первого и девятого, характерен стабильный рост цены, что в контексте (22, 23) означает, что за счет повышения

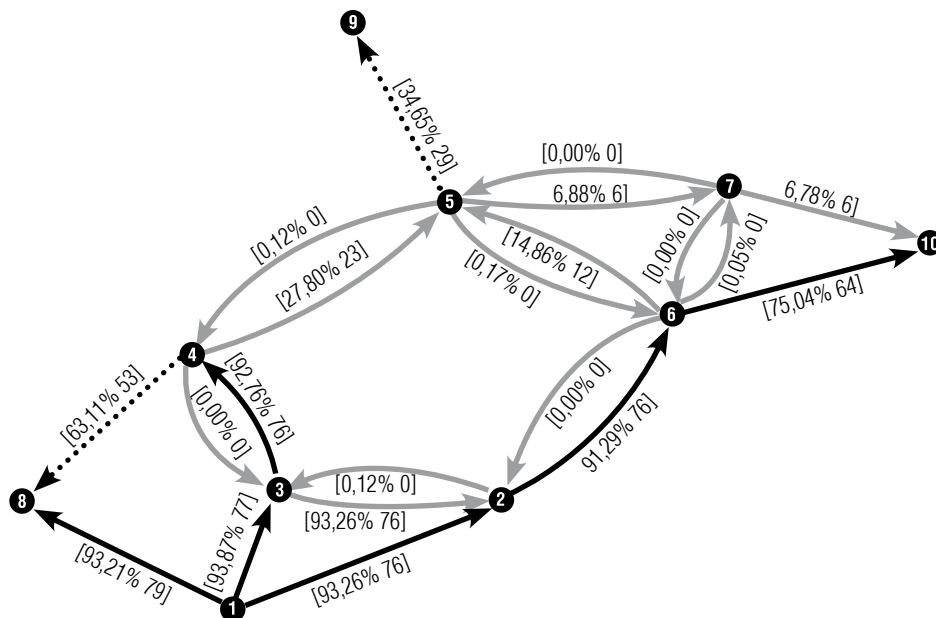


Рис. 2. Визуализация графа железнодорожных маршрутов с пометками о средней степени «наполненности» дуг на всем горизонте планирования

¹² <https://drive.google.com/drive/folders/1DM2YsxBHPOZLvaTHjbmP8GK3cVaDfDa5?usp=sharing>

цены достигается уменьшение избыточного объема спроса на товары и, как следствие, увеличивается значение конечной прибыли. Для товаров первого и девятого типов ситуация несколько иная. Для первого типа товара объем спроса уменьшается на всем летнем промежутке ввиду явного роста цен, а для девятого наблюдается рост цены, который стабилизируется по мере приближения к зимнему периоду. Природу этих выпадающих из правила наблюдений предполагается изучить дополнительно.

Рассмотрим положительные и отрицательные стороны модели и двухэтапной схемы оптимизации.

К положительным сторонам модели можно отнести относительную концептуальную простоту исследования в части моделирования и этапов оптимизации. Все алгоритмы и методы, применяемые на этих этапах, достаточно хорошо исследованы. В литературе также описаны многие модификации их вариантов, что имеет большое значение для дальнейших исследований, направленных на сокращение времени расчета и повышения точности полученных решений.

Также отметим, что данная модель комплексно охватывает довольно большой перечень проблем предприятия, что позволяет находить решения более близкие к истинному оптимальному.

К отрицательным сторонам модели отнесем несколько моментов. Сложно утверждать о скорости сходимости данного метода при больших выборках и большой размерности задачи. Вероятно, для больших выборок или для большей размерности задачи потребуются воспользоваться численными или эвристическими алгоритмами.

Высокие требования к компьютеру в совокупности с вычислительной сложностью задачи делает нетривиальным процесс отладки программ в случае слабой компьютерной базы и значительно повышает барьер практического внедрения результатов исследования.

Исходя из ограничений и положительных сторон результатов исследования, рассмотрим направления совершенствования модели и метода поиска решений.

На шаге 1 двухэтапной оптимизации имеет смысл пользоваться робастным смешано-целочисленным линейным программированием [24] ввиду стохастичности многих переменных, что должно позволить ускорить поиск решения. Идея этого метода

заключается в том, чтобы выявить общие для всех итераций ограничения (детерминированные ограничения) и, в сочетании с некоторыми преобразованиями всех оставшихся линейных стохастических ограничений, найти решение задачи за малое число итераций. Это позволит значительно сократить время на поиск решения и объем используемой оперативной памяти.

Выдвинутые нами предположения о том, какие товары должны в будущем входить в том или ином объеме в план производства (исходя из рисунка 2) необходимо в дальнейшем тестировать с применением разработанной схемы поиска решения.

Необходимо заменить процесс разыгрывания случайных величин на дифференциальные или другие виды выражений, т.к. в противном случае это потребует большого объема вычислений, что в свою очередь скажется на времени генерации матриц ограничений и целевых функций для каждой итерации. После такой замены будет необходимо воспользоваться или эвристикой, или численными методами. Как скажется такой вид замены на задачах большой размерности утверждать сложно, необходимо проводить дополнительные исследования.

Имеет смысл подключить другие виды производственных процессов к модели оценки целесообразности взаимодействия предприятия с лесной товарно-сырьевой биржей для получения более точных результатов.

Следует отметить, что транспортировка готовой продукции и сырья по железной дороге в реальности не носит детерминированный характер. Это особенно ярко проявляется по мере приближения к зимнему периоду, когда пропускная способность падает ввиду повышения спроса на перевозки других товаров и типов сырья (например, топлива). В будущем имеет смысл добавить случайные величины, описывающие пройденное расстояние в течение какого-либо периода для получения более точного решения. Однако рассмотрение дополнительных факторов транспортировки повлечет увеличение времени расчетов и неопределенности в алгоритме поиска решений.

Данную модель представляется возможным использовать и для планирования производства на перспективу, но в таком случае необходимо задуматься о качественном проведении прогноза ситуации на рынке или на бирже сырьевой направленности. Для получения более точных решений также

имеет смысл рассмотреть возможность применения глубокого обучения нейронных сетей (или обучения с подкреплением) на стадии закупки сырья, в зависимости от того, как будет складываться ситуация на рынке сырья.

Заключение

В работе представлена модель решения задачи формирования устойчивых цепей поставок и ценовой политики предприятия лесопромышленной отрасли. Модель позволяет максимизировать значение доналоговой прибыли и представляет собой задачу математического программирования, отличающуюся комплексной возможностью одновременного учета производственных норм потребления сырья для выпуска конечной продукции, формирования вектора закупок сырья на товарно-сырьевой бирже, формирования вектора объемов транспортировки готовой продукции по транспортному графу и формирования ценовой политики предприятия. Результаты реализации модели включают структуру производства, последовательность закупки производством сырья на товарно-сырьевой бирже, последовательность транспортировки конечной продукции покупателям, а также значение прибыли за каждый день работы предприятия и вектор цен на рассматриваемом горизонте планирования. Процесс поиска субоптимального решения задачи усложняет ее большая размерность, целочисленные ограничения и быстро растущая нагрузка на оперативную память.

Для решения такой задачи была разработана двухэтапная схема оптимизации, состоящая из шагов с линейной оптимизацией и градиентным спуском. В работе реализован двухступенчатый метод Гомори на первом шаге двухэтапной оптимизации. С практической точки зрения модель представляет собой инструмент, позволяющий сформировать субоптимальный план производства на основе производственных факторов и объемов предложений сырья на товарно-сырьевой бирже, а также план транспортировки конечной продукции покупателям на всем горизонте планирования. В услови-

ях отсутствия возможности привлечения капитала модель позволяет находить субоптимальное решение, позволяющее предприятию избегать кассового разрыва.

Апробация модели проведена на примере лесоперерабатывающего комплекса из Приморского края. На основе проведенных расчетов и найденного решения сформулированы рекомендации для управляющего звена 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 Удмуртия. Это объясняется двумя причинами: достаточный потенциалом в части добываемого сырья и более приемлемой ценовой политикой лесодобывающих предприятий. Проведен краткий анализ возможных объемов производства продукции каждого типа. Из анализа следует, что производство большинства типов товаров не является целесообразным. В целом расчеты позволяют сделать вывод о возможности рациональных закупок сырья на товарно-сырьевой бирже России.

Для анализа качественно более сложных бизнес-процессов предприятия представляется целесообразной модификация модели путем введения вероятностных экономико-производственных факторов. Однако в этом случае остается открытым вопрос о методе решения усложненной задачи. Также имеет смысл рассмотреть возможности ускорения поиска решений. ■

Благодарности

Автор выражает благодарность Образовательному центру НТУ «Сириус» за возможность использования компьютерной базы для проведения апробации модели, а также доценту Московского физико-технического института (МФТИ), профессору НИУ ВШЭ, д.ф.-м.н. Гасникову Александру Владимировичу ценные рекомендации в области численной оптимизации.

Литература

1. Pessoa M.V.P., Becker J.M.J. Smart design engineering: a literature review of the impact of the 4th industrial revolution on product design and development // *Research in Engineering Design*. 2020. No 31. P. 175–195. DOI: 10.1007/s00163-020-00330-z.
2. Park S.H., Shin W.S., Park Y.H., Lee Y. Building a new culture for quality management in the era of the Fourth Industrial Revolution // *Total Quality Management & Business Excellence*. 2017. Vol. 28. No 9–10. P. 934–945. DOI: 10.1080/14783363.2017.1310703.

3. Optimization in supply chain management, the current state and future directions: A systematic review and bibliometric analysis / M. Movahedipour [et al.] // *Journal of Industrial Engineering and Management*. 2016. Vol. 9. No 4. P. 933–963. DOI: 10.3926/jiem.2035.
4. Bibliometric and visualized analysis of energy research / D. Chen [et al.] // *Ecological Engineering*. 2016. Vol. 90. P. 285–293. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.026.
5. Fahimnia B., Sarkis J., Davarzani H. Green supply chain management: A review and bibliometric analysis // *International Journal of Production Economics*. 2015. Vol. 162. No 101–114. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.01.003.
6. Economic and environmental assessment of reusable plastic containers: A food catering supply chain case study / R. Accorsi [et al.] // *International Journal of Production Economics*. 2014. Vol. 152. P. 88–101. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.12.014.
7. Nooraie S.V., Parast M.M. Mitigating supply chain disruptions through the assessment of trade-offs among risks, costs and investments in capabilities // *International Journal of Production Economics*. 2016. Vol. 171. Part 1. P. 8–21. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.10.018.
8. Research on intelligent decision of low carbon supply chain based on carbon tax constraints in human-driven edge computing / Z. Liu [et al.] // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 48264–48273. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978911.
9. Рогулин Р.С., Мазелис Л.С. Алгоритм и математическая модель формирования устойчивых цепочек поставок древесного сырья из регионов России: сравнение и анализ // *Вестник Пермского университета. Сер. «Экономика»*. 2020. Т. 15. № 3. С. 385–404. DOI: 10.17072/1994-9960-2020-3-385-404.
10. A stakeholder oriented approach to the optimization of transports of people with disabilities / O. Tellez [et al.] // *Supply Chain Forum: An International Journal*. 2020. Vol. 21. No 2. P. 93–102. DOI: 10.1080/16258312.2020.1768435.
11. Scavarda L.F., Reichhart A., Hamacher S., Holweg M. Managing product variety in emerging markets // *International Journal of Operations and Production Management*. 2010. Vol. 30. No 2. P. 205–224.
12. Billal M., Hossain M. Multi-objective optimization for multi-product multi-period four echelon supply chain problems under uncertainty // *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2020. Vol. 13. No 1. P. 1–17. DOI: 10.22094/JOIE.2018.555578.1529.
13. Optimization of emergy sustainability index for bio diesel supply network design / J. Ren [et al.] // *Energy Conversion and Management*. 2015. Vol. 92. P. 312–321. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.066.
14. Cardona-Valdés Y., Alvarez A., Ozdemir D. A bi-objective supply chain design problem with uncertainty // *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*. 2011. Vol. 19. No 5. P. 821–832. DOI: 10.1016/j.trc.2010.04.003.
15. El-Sayed M., Afia N., El-Kharbotly A. A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk // *Computer & Industrial Engineering*. 2010. Vol. 58. P. 423–431. DOI: 10.1016/j.cie.2008.09.040.
16. Schutz P., Tomasgard A., Ahmed S. Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition // *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 199. No 2. P. 409–419.
17. Chen C.-L., Lee W.C. Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices // *Computers and Chemical Engineering*. 2004. Vol. 28. No 6–7. P. 1131–1144. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.014.
18. Georgiadis M.C., Tsiakis P., Longinidis P., Sofioglou M.K. Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations // *Omega*. 2011. Vol. 39. No 3. P. 254–272.
19. Wang K.-J., Makond B., Liu S.-Y. Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand – A genetic-algorithm based solution // *Expert Systems with Application*. 2011. Vol. 38. No 5. P. 6125–6131. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11.008.
20. Olivares-Benitez E., González-Velarde J.L., Ríos-Mercado R.Z. A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices // *TOP*. 2012. No 20. P. 729–753. DOI: 10.1007/s11750-010-0162-8.
21. Rogulin R.S. A model for optimizing plans for procurement of raw materials from regions of Russia in a timber-processing enterprise // *Business Informatics*. 2020. Vol. 14. No 4. P. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35.
22. Кан Ю.С., Кибзун А.И. Задачи стохастического программирования с вероятностными критериями. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
23. Кибзун А.И., Лебедев А.А., Малышев В.В. О сведениях задачи с вероятностными ограничениями к эквивалентной минимаксной // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. 1984. № 4. С. 73–80.
24. Кибзун А.И., Малышев В.В. Обобщенный минимаксный подход к решению задач с вероятностными ограничениями // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. 1984. № 1. С. 20–29.
25. Федоров В.В. Численные методы максимина. М.: Наука, 1979.
26. Канаева О.Н. Двухэтапная задача нелинейного стохастического программирования с детерминированной матрицей компенсации // *Математические структуры и моделирование*. 2004. № 14. С. 25–33.
27. Ozturk M.M., Cankaya I.A., Ipekci D. Optimizing echo state network through a novel Fisher maximization based stochastic gradient descent // *Neurocomputing*. 2020. Vol. 415. P. 215–224. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.07.034.
28. Kennedy R.K.L., Khoshgoftaar T.M., Villanustre F., Humphrey T. A parallel and distributed stochastic gradient descent implementation using commodity clusters // *Journal of Big Data*. 2019. Vol. 6. Article no 16. DOI: 10.1186/s40537-019-0179-2.
29. Hassan M., Baharum A., Ali M.K.M. Logarithmic penalty function method for invex multi-objective fractional programming problems // *Journal of Taibah University for Science*. 2020. Vol. 14. No 1. P. 211–216. DOI: 10.1080/16583655.2020.1715051.
30. Price C.J. Direct search nonsmooth constrained optimization via rounded l_1 penalty functions // *Optimization Methods and Software*. 2020. DOI: 10.1080/10556788.2020.1746961.
31. Huang S., Li G., Ben-Awuah E., Afum B.O., Hu N. A robust mixed integer linear programming framework for underground cut-and-fill mining production scheduling // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2020. Vol. 34. No 6. P. 397–414. DOI: 10.1080/17480930.2019.1576576.

Об авторе**Рогулин Родион Сергеевич**

аспирант кафедры математики и моделирования, Владивостокский государственный университет экономики и сервиса, 690014, г. Владивосток, ул. Гоголя, д. 41;

ассистент кафедры прикладной математики, механики, управления и программного обеспечения, Дальневосточный федеральный университет, 690922, Приморский край, остров Русский, п. Аякс, д. 10;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

A mathematical model for the formation of the pricing policy and the plan of the production and transport system in a timber-processing enterprise

Rodion S. Rogulin

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

Vladivostok State University of Economics and Service

Address: 41, Gogolya Street, Vladivostok 690014, Russia

Far Eastern Federal University

Address: 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922, Russia

Abstract

The formation of supply chains for raw materials is closely related to production problems involving the determination of prices for sold goods. The question often arises about the need to study the sources of raw materials and the methodology for pricing the goods produced, taking into account a large number of external aspects of the market. Often, only particular approaches to solving production problems are considered in the literature, and methods for solving the complex problem of forming supply chains for raw materials and pricing are poorly developed. This paper presents a mathematical model that makes it possible to assess the feasibility of interaction between a timber industry enterprise and a commodity exchange, with the daily formation of a price vector over the entire planning horizon. A two-stage algorithm for finding a suboptimal solution is considered, which at the first stage is based on linear optimization, and at the second, on gradient descent with the use of penalty functions. The model was tested on the data of the commodity and raw materials exchange of Russia and one of the enterprises of the Primorsky Territory. The result of testing was the volume of production of each type of product over the entire planning horizon, the volume of delivery of raw materials from regions to enterprises, as well as the methods of delivery of goods to the consumer and the policy of pricing. It is shown that almost all goods should increase in price due to a reduction in the excess volume of applications (demand) over the entire planning horizon, with the exception of two types of products. It is noted that the exchange can provide the necessary volume of raw materials for high-capacity production, which demonstrates the possibility, if necessary, to increase the volume of raw materials purchases. It is shown which goods will be included in the release plan more often than others when optimizing the price vector. The ways of delivery of final types of products are analyzed. The disadvantages and advantages of the mathematical model and algorithm are presented.

Key words: price policy; optimization of production; transport task; timber industry; commodity and raw materials exchange; supply chain; output.

Citation: Rogulin R. (2021) A mathematical model for the formation of the pricing policy and the plan of the production and transport system in a timber-processing enterprise. *Business Informatics*, vol. 15, no 3, pp. 60–77. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.60.77

References

1. Pessoa M.V.P., Becker J.M.J. (2020) Smart design engineering: a literature review of the impact of the 4th industrial revolution on product design and development. *Research in Engineering Design*, no 31, pp. 175–195. DOI: 10.1007/s00163-020-00330-z.
2. Park S.H., Shin W.S., Park Y.H., Lee Y. (2017) Building a new culture for quality management in the era of the Fourth Industrial Revolution. *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 28, no 9–10, pp. 934–945. DOI: 10.1080/14783363.2017.1310703.
3. Movahedipour M., Yang M., Zeng J., Wu X., Salam S. (2016) Optimization in supply chain management, the current state and future directions: A systematic review and bibliometric analysis. *Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 9, no 4, pp. 933–963. DOI: 10.3926/jiem.2035.
4. Chen D., Liu Z., Luo Z., Webber M., Chen J. (2016). Bibliometric and visualized analysis of energy research. *Ecological Engineering*, vol. 90, pp. 285–293. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.01.026.
5. Fahimnia B., Sarkis J., Davarzani H. (2015) Green supply chain management: A review and bibliometric analysis. *International Journal of Production Economics*, vol. 162, no 101–114. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.01.003.
6. Accorsi R., Cascini A., Cholette S., Manzini R., Mora C. (2014) Economic and environmental assessment of reusable plastic containers: A food catering supply chain case study. *International Journal of Production Economics*, vol. 152, pp. 88–101. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.12.014.
7. Nooraie S.V., Parast M.M. (2016) Mitigating supply chain disruptions through the assessment of trade-offs among risks, costs and investments in capabilities. *International Journal of Production Economics*, vol. 171, part 1, pp. 8–21. DOI: 10.1016/j.ijpe.2015.10.018.
8. Liu Z., Hu B., Zhao Y., Lang L., Guo H., Florence K., Zhang S. (2020) Research on intelligent decision of low carbon supply chain based on carbon tax constraints in human-driven edge computing. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 48264–48273. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978911.
9. Rogulin R.S., Mazelis L.S. (2020) Algorithm and mathematical model of supply chain management for raw wood from the regions in Russia: comparison and analysis. *Perm University Herald. Economy*, vol. 15, no 3, pp. 385–404 (in Russian). DOI: 10.17072/1994-9960-2020-3-385-404.
10. Tellez O., Daguet L., Lehuédé F., Monteiro T., Montoya G.O., Péton O., Vercraene S. (2020) A stakeholder oriented approach to the optimization of transports of people with disabilities. *Supply Chain Forum: An International Journal*, vol. 21, no 2, pp. 93–102. DOI: 10.1080/16258312.2020.1768435.
11. Scavarda L.F., Reichhart A., Hamacher S., Holweg M. (2010) Managing product variety in emerging markets. *International Journal of Operations and Production Management*, vol. 30, no 2, pp. 205–224.
12. Billal M., Hossain M. (2020) Multi-objective optimization for multi-product multi-period four echelon supply chain problems under uncertainty. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, vol. 13, no 1, pp. 1–17. DOI: 10.22094/JOIE.2018.555578.1529.
13. Ren J., Tan S., Yang L., Goodsite M.E., Pang C., Dong L. (2015) Optimization of emergy sustainability index for bio diesel supply network design. *Energy Conversion and Management*, vol. 92, pp. 312–321. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.12.066.
14. Cardona-Valdés Y., Alvarez A., Ozdemir D. (2011) A bi-objective supply chain design problem with uncertainty. *Transportation Research. Part C: Emerging Technologies*, vol. 19, no 5, pp. 821–832. DOI: 10.1016/j.trc.2010.04.003.
15. El-Sayed M., Afia N., El-Kharbotly A. (2010) A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computer & Industrial Engineering*, vol. 58, pp. 423–431. DOI: 10.1016/j.cie.2008.09.040.
16. Schutz P., Tomasgard A., Ahmed S. (2009) Supply chain design under uncertainty using sample average approximation and dual decomposition. *European Journal of Operational Research*, vol. 199, no 2, pp. 409–419.
17. Chen C.-L., Lee W.C. (2004) Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. *Computers and Chemical Engineering*, vol. 28, no 6–7, pp. 1131–1144. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2003.09.014.
18. Georgiadis M.C., Tsiakis P., Longinidis P., Sofioglou M.K. (2011) Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. *Omega*, vol. 39, no 3, pp. 254–272.
19. Wang K.-J., Makond B., Liu S.-Y. (2011) Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand – A genetic-algorithm based solution. *Expert Systems with Application*, vol. 38, no 5, pp. 6125–6131. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.11.008.
20. Olivares-Benitez E., González-Velarde J.L., Ríos-Mercado R.Z. (2012) A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices. *TOP*, no 20, pp. 729–753. DOI: 10.1007/s11750-010-0162-8.
21. Rogulin R.S. (2020) A model for optimizing plans for procurement of raw materials from regions of Russia in a timber-processing enterprise. *Business Informatics*, vol. 14, no 4, pp. 19–35. DOI: 10.17323/2587-814X.2020.4.19.35.
22. Kan Yu.S., Kibzun A.I. (2009) *Stochastic programming problems with probabilistic criteria*. Moscow: FIZMATLIT (in Russian).
23. Kibzun A.I., Lebedev A.A., Malyshev V.V. (1984) On reducing a problem with probabilistic constraints to an equivalent minimax. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Engineering Cybernetics*, no 4, pp. 73–80 (in Russian).
24. Kibzun A.I., Malyshev V.V. (1984) Generalized minimax approach to solving problems with probabilistic constraints. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Engineering Cybernetics*, no 1, pp. 20–29 (in Russian).
25. Fedorov V.V. (1979) *Numerical methods of maximin*. Moscow: Nauka (in Russian).

26. Kanaeva O.N. (2004) A two-stage nonlinear stochastic programming problem with a deterministic compensation matrix. *Mathematical Structures and Modeling*, no 14, pp. 25–33 (in Russian).
27. Ozturk M.M., Cankaya I.A., Ipekci D. (2020) Optimizing echo state network through a novel Fisher maximization based stochastic gradient descent. *Neurocomputing*, vol. 415, pp. 215–224. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.07.034.
28. Kennedy R.K.L., Khoshgoftaar T.M., Villanustre F., Humphrey T. (2019) A parallel and distributed stochastic gradient descent implementation using commodity clusters. *Journal of Big Data*, vol. 6, article no 16. DOI: 10.1186/s40537-019-0179-2.
29. Hassan M., Baharum A., Ali M.K.M. (2020) Logarithmic penalty function method for invex multi-objective fractional programming problems. *Journal of Taibah University for Science*, vol. 14, no 1, pp. 211–216, DOI: 10.1080/16583655.2020.1715051.
30. Price C.J. (2020) Direct search nonsmooth constrained optimization via rounded l_1 penalty functions. *Optimization Methods and Software*. DOI: 10.1080/10556788.2020.1746961.
31. Huang S., Li G., Ben-Awuah E., Afum B.O., Hu N. (2020) A robust mixed integer linear programming framework for underground cut-and-fill mining production scheduling. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, vol. 34, no 6, pp. 397–414. DOI: 10.1080/17480930.2019.1576576.

About the author

Rodion S. Rogulin

Doctoral Student, Department of Mathematics and Modeling, Vladivostok State University of Economics and Service, 41, Gogolya Street, Vladivostok 690014, Russia;

Assistant Professor, Department of Applied Mathematics, Mechanics, Control and Software, Far Eastern Federal University, 10, Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok 690922, Russia;

E-mail: rafassiaofusa@mail.ru

ORCID: 0000-0002-3235-6429

Efficiency of Green Supply Chain in the presence of non-discretionary and undesirable factors, using Data Envelopment Analysis

Mehdi Shoja^a 

E-mail: mmsh.bim@gmail.com

Farhad Hosseinzadeh Lotfi^b 

E-mail: farhad@hosseinzadeh.ir

Amir Gholam Abri^{c*} 

E-mail: amirgholamabri@gmail.com

Alireza Rashidi Komijan^c 

E-mail: rashidi@azad.ac.ir

^a Roodehen Branch, Islamic Azad University

Address: No 4, Shahid Ahmadi Alley, Valiasr Town, Firoozkooh, Tehran 3981838183, Iran

^b Science and Research Branch, Islamic Azad University

Address: Shohada Hesarak Blv, University Square, End of Shahid Sattari Highway, Tehran 1477893855, Iran

^c Firoozkooh Branch, Islamic Azad University

Address: First of Valiasr Town, 45 Meters Street, Firoozkooh, Tehran 3981838381, Iran

Abstract

A new approach that has dominated the production operations management field in recent years is supply chain management. A supply chain includes all the facilities, tasks and activities involved in manufacturing a product from suppliers to customers. Its various elements are planning, supply and demand management, procurement of raw materials, production scheduling, distribution and delivery of products to the customer. Special structures in the supply chain have been less studied in previous research. In this paper, the supply chain and its performance evaluation are examined in the presence of non-discretionary, undesirable and negative data. For this purpose, another model of the network DEA is presented which evaluates performance of the chain in the presence of non-discretionary inputs and outputs, undesirable outputs and negative outputs even in its internal structure. The efficiency of the chain stages is also calculated using a dual model. Subsequently, 42 cement companies listed on the Tehran stock exchange were evaluated, each of which has a chain of four stages including suppliers, manufacturers, distributors and customers. Based on the implementation of the model, six companies were found to be efficient and the rest were introduced as inefficient. Moreover, 25 cement companies in the Supplier sector, 18 companies in the manufacturing sector, seven companies in the distribution sector and finally 17 companies in the customer service sector were found to be efficient.

* Corresponding author

Key words: supply chain efficiency; cement industry; network DEA; non-discretionary factors; undesirable outputs; negative data.

Citation: Shoja M., Lotfi F.H., Abri A.G., Komijan A.R. (2021) Efficiency of Green Supply Chain in the presence of non-discretionary and undesirable factors, using Data Envelopment Analysis. *Business Informatics*, vol. 15, no 3, pp. 78–96. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.78.96

Introduction

In recent years, a relatively suitable approach has been presented in the intellectual, cultural and social fields on performance and productivity evaluation. In fact, today productivity is not strange for the thinking and beliefs of the community. Different applications of the supply chain in various sciences have attracted many researchers. The network supply chain consists of four parts: supplier, manufacturer, distributor and customer. The supply chain structure varies in terms of size and complexity, from a simple chain that represents independent decision-making, to the behaviors and interactions of complex companies. Therefore, proper supply chain performance evaluation is necessary to consider the network characteristics of the chain and its interactions. Generally, the larger and more complex the supply chain is, the more difficult it will be to evaluate.

Among the evaluation methods, data envelopment analysis (DEA) is widely used to evaluate the relative performance of a set of production processes called decision-making units (DMUs). This non-parametric method evaluates DMUs by presenting different models that produce multiple outputs using multiple inputs. DEA is a very important method in supply chain management literature.

Classical DEA models do not have any theory regarding the intermediate activities of DMUs and consider them as a black box, so that just the inputs consumed and the final outputs produced are considered in calculating efficiency. This view, which does not consider intermediate activities and products of the supply chain, is suitable for a simple production process, however it doesn't have proper application in a complex network system.

To identify inefficiencies and their causes in the intermediate parts, many researchers have tried to reject the black box model and consider its internal structure in DEA models. These models are called 'network DEA' in the literature. The supply chain is one of the most important and most practical states of network DEA. Planned production of raw materials, designing and producing appropriate products, optimal distribution and delivery,

and ultimately serving customers and their satisfaction in the form of supply chain management, are of great interest. In supply chain management, all efficiency measurements seek to achieve two ultimate goals of reducing costs and increasing profits.

The important thing to consider in these situations is that, sometimes changing some inputs and outputs of the supply chain are not entirely available to the manager. These are called non-discretionary or partly-discretionary factors. In addition to non-discretionary factors, in some cases, there may be undesirable indicators within middle activities of the supply chain. Dealing with these indicators in classical DEA models has been discussed, however non-discretionary inputs and outputs, undesirable outputs and negative outputs are less discussed in previous studies performed on supply chains. Therefore, in this study, we have tried to examine these conditions in the full supply chain. In other words, the aim of this paper, is to present a model based on DEA, with a network structure to evaluate the total efficiency and performance of supply chain steps in the presence of non-discretionary inputs and outputs, undesirable and negative outputs.

As we know, recently the application of data envelopment analysis has attracted a lot of attention in various sciences, and many studies have been carried out in the field of data envelopment analysis with a network structure, all of which attempts to analyze different states of a network. In this regard, one of the first studies was presented about twenty years ago by Färe and Grosskopf [1, 2]. They considered the production possibility set with original standard principles in the variable returns-to-scale scheme for the general structure of a network, and then created the production possibility set of the supply chain by combining the sets of production possibilities for its internal parts. Tone and Tsutsui [3] showed that these assumptions need more discussion. For example, if we consider labor, raw materials and capital as inputs, the same decrease in all of them may not be possible. Therefore, they suggested a network DEA model that used a slack-based measurement method to evaluate the efficiency of different parts.

Xu et al. [4] evaluated the supply chain performance of furniture manufacturing industries in southwestern China by presenting a rough DEA model. They identified the main uncertainty factors that affect the evaluation process, and then, these cases formed a model and were analyzed using rough DEA (RDEA) models.

As we know, a proper measurement of the supply chain efficiency must take into account both the network properties of the chain and the relationship among supplier, manufacturer, distributor, and customer. Taking into account these considerations, Saranja and Moser [5], and Chen and Yan [6] presented various models with different supply chain structures.

Azadeh and Alem [7] presented three models of supplier selection in the supply chain in certainty, uncertainty and probabilistic circumstances. These models include data envelopment analysis (DEA), fuzzy data envelopment analysis (FDEA), and chance constrained data envelopment analysis (CCDEA). Babazadeh et al. [8] designed a network supply chain for organizing a biodiesel fuel type in Iran using a combined model of data envelopment analysis and mathematical programming model. Badiezadeh et al. [9] discussed the supply chain in the presence of big data and undesirable outputs. Boudaghi and Saen [10] provided a combined model of data envelopment analysis and discriminant analysis (DEA-DA) to predict group membership of suppliers in the sustainable supply chain. The proposed model could predict this, considering the nature of factors, such as inputs, outputs and performance of each supplier. Fathi and Saen [11] presented a model of bidirectional network DEA in assessing the sustainability of distribution supply chains, to rank Iran's transportation companies and propose improvement solutions. Goodarzi and Saen [12] also considered undesirable outputs by developing the SBM model in network DEA. Grigoroudis et al. [13] presented a recursive DEA algorithm (RDEA) that introduces a different method to design a supply chain network. Huang [14] examined the tourism industry in the framework of supply chain and calculated the efficiency of each sector as well as overall efficiency. One of the characteristics that distinguishes this research from other research is the division of model inputs into variable and semi-variables and using it in mathematical programming. Izadikhah and Saen [15] evaluated the stability of supply chains with a two-stage model in the presence of negative data. Izadikhah et al. [16] developed conventional DEA models to a method to assess the sustainability of suppliers in the presence of internal and fuzzy data. Kalantari and Saen [17] examined the sustainability of supply chains with a model of reverse

dynamic network DEA. Khodakarami et al. [18] analyzed the evaluation of 27 Iranian companies in the context of supply chain management sustainability based on the development of a two-stage model. Mirhedayatian et al. [19] assessed green supply chain management in the presence of undesirable outputs and fuzzy data. Sarah and Khalili-Damghani [20] evaluated the natural gas supply chain with the fuzzy type-II De-Novo program for allocating resources and setting the target in network DEA. Shafiee et al. [21] used a combination of network DEA and balanced scorecard approach to evaluate supply chain performance. In this method, the combination of Balanced Scorecard (BSC) and DEMATEL method was used for network structure. Then the structure of this network was expressed in the form of DEA, and was evaluated in this structure. Tajbakhsh and Hassini [22] provided a method for evaluating the sustainability of supply chain networks. Their focus was on three issues: to maximize economic return, to minimize environmental impact and to achieve social expectations. They applied the proposed model to evaluate two case studies, one in the manufacturing sector and the other in the banking sector.

Tavana et al. [23] presented a two-stage methodology for assessing the performance of the three-part supply chain, including supplier, manufacturer and distributor.

Tavana et al. [24] evaluated the supply chain performance by providing a network epsilon – based measure (NEBM) and emphasized the radial and non-radial (hybrid) simultaneous changes in inputs and outputs in the network. Tavassoli and Saen [25] evaluated the prediction of membership in a sustainable supplier group using the DEA and Discriminant Analysis. Yousefi et al. [26] presented improvement ways and optimal solutions, using a combination model of goal programming and data envelopment analysis with network structure. Zhai et al. [27] measured the efficiency of energy supply chains with business plan, by presenting a two-stage frontier-shift DEA model.

In this research, the application of data envelopment analysis is examined for evaluating supply chain management in the presence of non-discretionary, undesirable and negative data. A model is presented with the inclusion of the above particular circumstances, according to which the performance of listed cement companies in the stock exchange is calculated. Therefore, the innovations of this research are as follows:

- ◆ development of network models in the data envelopment analysis with undesirable intermediate and final outputs, and negative outputs;

- ◆ development of network models in data envelopment analysis with non-discretionary and partly-discretionary factors;
- ◆ application of the models so developed in the cement industry, taking into account the specific conditions of the indicators.

The rest of this paper includes the following sections: reviewing basic concepts, presenting a suitable model in the presence of non-discretionary, undesirable and negative indicators, presenting a case study in the field of the cement industry with the structure of the proposed model. Finally, the results are investigated.

1. Basic concepts

Suppose that there are n decision-making units so that $Y_j = (y_{1j}, \dots, y_{sj})^t$, $X_j = (x_{1j}, \dots, x_{mj})^t$ are DMU_j input and output vectors respectively, and $X_j \geq 0$, $X_j \neq 0$, $Y_j \geq 0$, $Y_j \neq 0$.

By accepting the principles of Inclusion of observations, fixed-scale returns, convexity, feasibility, and the minimum of interpolation, the Production Possibility Set is as follows:

$$T_c = \left\{ \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \middle| X \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j; Y \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j; \lambda_j \geq 0; j=1, 2, \dots, n \right\}. \quad (1)$$

By eliminating the assumption of constant returns-to-scale from the above assumptions, the Production Possibility Set turns into below for which its returns-to-scale is variable:

$$T_v = \left\{ \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} \middle| X \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j X_j; Y \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j Y_j; \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1; \lambda_j \geq 0; j=1, 2, \dots, n \right\}. \quad (2)$$

The following input-oriented model, should be solved in order to evaluate DMU_o :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} &\leq \theta x_{io}, i=1, 2, \dots, m; \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} &\geq y_{ro}, r=1, 2, \dots, s; \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1; \lambda_j \geq 0, j=1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (3)$$

Model (3) that is called an input-oriented BCC model, is introduced by Banker, Charnes and Cooper [28].

It's clear that DMU_o is Pareto efficient if and only if $\theta^* = 1$ and the value of all auxiliary variables is zero, in each optimal solution of the model (3).

Definition 1: Let (X, Y) be input and output vector corresponding any DMU . (X', Y') is the transformed form of this unit with respect to constant values of α_i , $i=1, 2, \dots, m$ and β_r , $r=1, 2, \dots, s$, if:

$$\begin{aligned} x'_{ij} &= x_{ij} + \alpha_i, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n; \\ y'_{rj} &= y_{rj} + \beta_r, r=1, 2, \dots, s, j=1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (4)$$

Definition 2: A DEA model is called stable to transmission if the efficiency of the DMU_s (the value of model objective function) when transforming inputs and outputs of them is not changed.

Theorem 1: The input-oriented BCC model is stable with respect to the output transmission [29].

The above theorem indicates that if the outputs are transmitted in the input-oriented BCC model, its objective function or efficiency score will not change.

A centralized control model was developed by Chen and Yan [6] to evaluate the performance of the two-stage supply chain. For simplicity, they assumed a supplier-manufacturer chain, as in *Figure 1*.

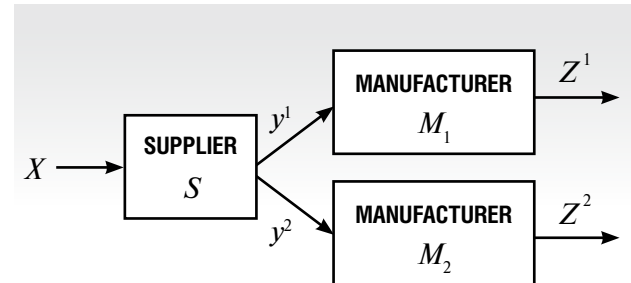


Fig. 1. Two-stage supply chain

Where, S is supplier, M_1 and M_2 represent first and second manufacturers, respectively. $X = (x_1, \dots, x_m)$ is input vector of supplier S and $Y^1 = (y_1^1, \dots, y_k^1)$, $Y^2 = (y_1^2, \dots, y_k^2)$ are output vectors of it which are also input vectors of manufacturers M_1 and M_2 . $Z^1 = (z_1^1, \dots, z_s^1)$ and $Z^2 = (z_1^2, \dots, z_s^2)$ are output vectors corresponding to M_1 and M_2 respectively.

Suppose that $DMU_1, DMU_2, \dots, DMU_n$ are decision-making units corresponding to the 1-st chain, 2-nd chain, ..., n -th chain, respectively. The model presented by Chen and Yan for measuring overall efficiency of corresponding chain of DMU_o with constant returns to scale assumption is as follows:

min θ ;

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij} &\leq \theta x_{i0}, i = 1, 2, \dots, m; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{tj} &\geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 y_{tj}^1, t = 1, 2, \dots, k; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{t'j}^2 &\geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 y_{t'j}^2, t' = 1, 2, \dots, k'; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 Z_{rj}^1 &\geq Z_{r0}^1, r = 1, 2, \dots, s; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 Z_{r'j}^2 &\geq Z_{r'0}^2, r' = 1, 2, \dots, s'; \\
 \lambda_j^1, \lambda_j^2, \lambda_j^3 &\geq 0, j = 1, 2, \dots, n.
 \end{aligned} \quad (5)$$

The main discussion of model (5) is how to evaluate the supply chain with regard to intermediate products in DEA models. Using the above model, the supply chain being evaluated is efficient if and only if $\theta^* = 1$.

2. Methodology

Examining supply chain performance in industries is considered a sample of multi-stage and network decision-making units that should include intermediate products and the relationship between activities within the various parts of its system. In these systems, the outputs of a stage (process) are considered as inputs of the next stage, which is called intermediate data [30, 31]. Moreover, in each stage there may be independent inputs for that stage which should be considered. Managers must try to identify the factors affecting supply chain performance by developing appropriate methods, use them to measure the overall efficiency and performance of various sectors. Some of these effective factors are non-discretionary inputs and outputs, undesirable outputs and negative outputs that need to be identified and considered in developing the model for evaluation. In this research, the supply chain of the cement industry is evaluated in the presence of non-discretionary, undesirable and negative factors. It will have the following structure:

In the above chain:

♦ S_1, S_2, S_3 and S_4 represent supplier, manufacturer, distributor and costumer, respectively;

$$\diamond X_j^f = \begin{pmatrix} x_{ij}^f, i \in D^f \\ x_{ij}^f, i \in ND^f \end{pmatrix} \text{ for } f = 1, 2, 3, 4, \text{ is input}$$

vector of DMU_j including discretionary and non-discretionary inputs to stage S_f ;

$$\diamond Z_j^{k_1, k_1+1} = \begin{pmatrix} z_{lj}^{k_1, k_1+1}, l \in D^{k_1, k_1+1} \\ z_{lj}^{k_1, k_1+1}, l \in ND^{k_1, k_1+1} \end{pmatrix} \text{ for } k_1 = 1, 2, 3 \text{ are}$$

intermediate data from stage S_{k_1} to stage S_{k_1+1} of j -th unit which includes discretionary and non-discretionary data, or in other words represents the output vector of stage S_{k_1} of j -th unit, including discretionary and non-discretionary outputs which also are the input of stage S_{k_1+1} for that unit;

♦ $Y^{k_2} = (y_{rj}^{k_2}; r \in R^{k_2})$ for $k_2 = 1, 2, 3$ are the undesirable output of stage S_{k_2} ;

♦ $Y = (y_1, y_2, \dots, y_s)$ is the output vector of stage S_4 ;

♦ D^f and ND^f for $f = 1, 2, 3, 4$ are set of discretionary and non-discretionary input indices, respectively;

♦ D^{k_1, k_1+1} and ND^{k_1, k_1+1} for $k_1 = 1, 2, 3$ are a set of discretionary and non-discretionary indicators indices, respectively;

♦ R^{k_2} for $k_2 = 1, 2, 3$ show a set of undesirable output indices for level S_{k_2} .

Consider n identical supply chains similar to chains in Figure 2 that are called n decision-making units in the data envelopment analysis literature which are denoted as $DMU_1, DMU_2, \dots, DMU_n$. A network DEA model with series structure is required to calculate their performance. The BCC model can't specifically identify the function of the corresponding black box of the supply chain in Figure 2, because it only takes into account the inputs and outputs of the supply chain and ignores the intermediate products resulting from supply chain pro-

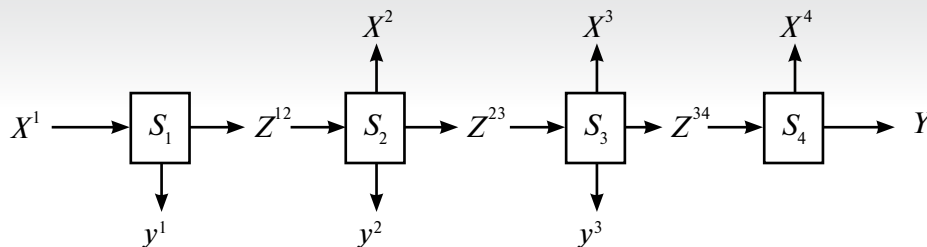


Fig. 2. Four-stage supply chain

cesses and factors affecting its performance. Therefore, a suitable model is required to be developed for evaluating the above supply chain.

By accepting the principles of Inclusion of observations, convexity, feasibility (except for non-discretionary intermediate products) and the minimum of interpolation, PPS for stages and total PPS for the supply chain of Figure 2 are as follows:

$$\begin{aligned}
 T_v^1 &= \left\{ \begin{pmatrix} X^{1D} \\ X^{1ND} \\ Z^{12D} \\ Z^{12ND} \\ Y^1 \end{pmatrix} ; \begin{aligned} &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_j^{1D} \leq X^{1D}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_j^{1ND} \leq X^{1ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_j^{12D} \geq Z^{12D}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_j^{12ND} = Z^{12ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_j^1 \leq Y^1; \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 = 1; \lambda_j^1 \geq 0 \end{aligned} \right\}; \\
 T_v^2 &= \left\{ \begin{pmatrix} X^{2D} \\ X^{2ND} \\ Z^{12D} \\ Z^{12ND} \\ Z^{23D} \\ Z^{23ND} \\ Y^2 \end{pmatrix} ; \begin{aligned} &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 x_j^{2D} \leq X^{2D}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 x_j^{2ND} \leq X^{2ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_j^{12D} \leq Z^{12D}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_j^{23D} \geq Z^{23D}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_j^{12ND} = Z^{12ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_j^{23ND} = Z^{23ND}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 y_j^2 \leq Y^2; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 = 1; \lambda_j^2 \geq 0 \end{aligned} \right\}; \\
 T_v^3 &= \left\{ \begin{pmatrix} X^{3D} \\ X^{3ND} \\ Z^{23D} \\ Z^{23ND} \\ Z^{34D} \\ Z^{34ND} \\ Y^3 \end{pmatrix} ; \begin{aligned} &\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 x_j^{3D} \leq X^{3D}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 x_j^{3ND} \leq X^{3ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_j^{23D} \leq Z^{23D}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_j^{34D} \geq Z^{34D}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_j^{23ND} = Z^{23ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_j^{34ND} = Z^{34ND}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 y_j^3 \leq Y^3; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 = 1, \lambda_j^3 \geq 0 \end{aligned} \right\}; \\
 T_v^4 &= \left\{ \begin{pmatrix} X^{4D} \\ X^{4ND} \\ Z^{34D} \\ Z^{34ND} \\ Y \end{pmatrix} ; \begin{aligned} &\sum_{j=1}^n \lambda_j^4 x_j^{4D} \leq X^{4D}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 x_j^{4ND} \leq X^{4ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^4 z_j^{34D} \leq Z^{34D}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^4 z_j^{34ND} = Z^{34ND}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 y_j \geq Y; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^4 = 1; \lambda_j^4 \geq 0 \end{aligned} \right\};
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_v = \left\{ \begin{pmatrix} X^{kD} \\ X^{kND} \\ Z^{k(k+1)D} \\ Z^{k(k+1)ND} \\ Y^k \\ X^{4D} \\ X^{4ND} \\ Y \end{pmatrix} ; \begin{aligned} &\sum_{j=1}^n \lambda_j^k x_j^{kD} \leq X^{kD}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^k x_j^{kND} \leq X^{kND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^k z_j^{k(k+1)D} \geq Z^{k(k+1)D}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^k z_j^{k(k+1)ND} = Z^{k(k+1)ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^k y_j^k \leq Y^k; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^{k+1} z_j^{k(k+1)D} \leq Z^{k(k+1)D}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^{k+1} z_j^{k(k+1)ND} = Z^{k(k+1)ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^4 x_j^{4D} \leq X^{4D}; \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 x_j^{4ND} \leq X^{4ND}; \\ &\sum_{j=1}^n \lambda_j^4 y_j \geq Y; \sum_{j=1}^n \lambda_j^k = 1; \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 = 1; \\ &\lambda_j^k \geq 0; \lambda_j^4 \geq 0; k = 1, 2, 3 \end{aligned} \right\}.$$

To evaluate the performance of DMU_o , the following input-oriented radial network model is suggested that is written according to total PPS:

$$\begin{aligned}
 &\min \theta; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^1 \leq \theta x_{io}^1, i \in D^1; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 x_{ij}^1 \leq x_{io}^1, i \in ND^1; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{lj}^{12} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_{lj}^{12}, l \in D^{12}; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 z_{lj}^{12} = z_{lo}^{12}, l \in ND^{12}; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_{lj}^{12} = z_{lo}^{12}, l \in ND^{12}; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^1 y_{rj}^1 \leq y_{ro}^1, r \in R^1; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 x_{ij}^2 \leq \theta x_{io}^2, i \in D^2; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 x_{ij}^2 \leq x_{io}^2, i \in ND^2; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_{lj}^{23} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_{lj}^{23}, l \in D^{23}; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^2 z_{lj}^{23} = z_{lo}^{23}, l \in ND^{23}; \\
 &\sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_{lj}^{23} = z_{lo}^{23}, l \in ND^{23};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 y_{rj}^2 &\leq y_{ro}^2, \quad r \in R^2; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 x_{ij}^3 &\leq \theta x_{io}^3, \quad i \in D^3; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 x_{ij}^3 &\leq x_{io}^3, \quad i \in ND^3; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_{lj}^{34} &\geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 z_{lj}^{34}, \quad l \in D^{34}; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_{lj}^{34} &= z_{lo}^{34}, \quad l \in ND^{34}; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 z_{lj}^{34} &= z_{lo}^{34}, \quad l \in ND^{34}; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 z_{lj}^{34} &= z_{lo}^{34}, \quad l \in ND^{34}; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 y_{rj}^3 &\leq y_{ro}^3, \quad r \in R^3; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 x_{ij}^4 &\leq \theta x_{io}^4, \quad i \in D^4; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 x_{ij}^4 &\leq x_{io}^4, \quad i \in ND^4; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 y_{rj} &\geq y_{ro}, \quad r=1, 2, \dots, s; \\
 \sum_{j=1}^n \lambda_j^1 &= 1; \sum_{j=1}^n \lambda_j^2 = 1; \sum_{j=1}^n \lambda_j^3 = 1; \sum_{j=1}^n \lambda_j^4 = 1; \\
 \lambda_j^1, \lambda_j^2, \lambda_j^3, \lambda_j^4 &\geq 0, \quad j=1, \dots, n, \quad \theta: \text{free}.
 \end{aligned} \tag{7}$$

where:

1. For $f=1, 2, 3, 4$, constraints

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^f x_{ij}^f \leq \theta x_{io}^f, \quad i \in D^f$$

are written corresponding to discretionary inputs and constraints

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^f x_{ij}^f \leq x_{io}^f, \quad i \in ND^f$$

are written corresponding to non-discretionary inputs of stage S_j .

2. For $k_1=1, 2, 3$, constraints

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^{k_1} z_{lj}^{k_1, k_1+1} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j^{k_1+1} z_{lj}^{k_1, k_1+1}, \quad l \in D^{k_1, k_1+1}$$

are written corresponding to Discretionary outputs stage S_{k_1} which shows that convex composition of these outputs as inputs of stage S_{k_1+1} must be equal to or less than product of stage S_{k_1} .

3. For $k_1=1, 2, 3$, constraints

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^{k_1} z_{lj}^{k_1, k_1+1} = \sum_{j=1}^n \lambda_j^{k_1+1} z_{lj}^{k_1, k_1+1} = z_{lo}^{k_1, k_1+1}, \quad l \in ND^{k_1, k_1+1}$$

are written corresponding to non-discretionary outputs of stage S_{k_1} and shows that the product of stage S_{k_1} as non-discretionary output, must be equal to input of stage S_{k_1+1} and non-discretionary output of DMU_o in stage S_{k_1} .

4. For $\alpha=1, 2, 3$ and $r \in R^\alpha$, constraints

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^\alpha y_{rj}^\alpha \leq y_{ro}^\alpha$$

are written corresponding to undesirable outputs of stage S_α and shows that for $r \in R^\alpha$, convex composition of undesirable output of DMU_s in stage S_α must be equal to or less than r -th output of DMU_o in this stage S_{k_1} .

5. For $r=1, 2, \dots, s$, constraints

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j^4 y_{rj} \geq y_{ro}$$

are written corresponding to final outputs.

Theorem 2: Model (7) is always feasible.

Argument: Since the solution below is a feasible solution to the model (7), so this model will be feasible:

$\theta=1$;

$\lambda_j^1 = (\lambda_1^1, \dots, \lambda_o^1, \dots, \lambda_n^1) = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$;

$\lambda_j^2 = (\lambda_1^2, \dots, \lambda_o^2, \dots, \lambda_n^2) = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$;

$\lambda_j^3 = (\lambda_1^3, \dots, \lambda_o^3, \dots, \lambda_n^3) = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$;

$\lambda_j^4 = (\lambda_1^4, \dots, \lambda_o^4, \dots, \lambda_n^4) = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$;

Definition 3: The corresponding supply chain DMU_o is efficient in evaluating with model (7), if $\theta^* = 1$.

In the following, measuring efficiency of the stages and the relationship between the efficiency of each stage with the overall efficiency are discussed. In order to evaluate the efficiency of each stage in the supply chain, we consider the dual form of model (7) as follows:

$$\begin{aligned}
 \max Z_o = & - \sum_{i \in ND^1} \bar{v}_{i1} x_{io}^1 + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2} Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3} Z_{lo}^{12} - \\
 & - \sum_{r \in R^1} u_{r1} y_{ro}^1 - \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2} x_{io}^2 + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l2} Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3} Z_{lo}^{23} - \\
 & - \sum_{r \in R^2} u_{r2} y_{ro}^2 - \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3} x_{io}^3 + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2} Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l3} Z_{lo}^{34} - \\
 & - \sum_{r \in R^3} u_{r3} y_{ro}^3 - \sum_{i \in ND^4} \bar{v}_{i4} x_{io}^4 + \sum_{r=1}^s w_r y_{ro} + u_{1o} + u_{2o} + u_{3o} + u_{4o}; \\
 & - \sum_{i \in D^1} v_{i1} x_{ij}^1 - \sum_{i \in ND^1} \bar{v}_{i1} x_{ij}^1 + \sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1} Z_{lj}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2} Z_{lj}^{12} - \\
 & - \sum_{r \in R^1} u_{r1} y_{rj}^1 + u_{1o} \leq 0, \quad j=1, 2, \dots, n; \\
 & - \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1} Z_{lj}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3} Z_{lj}^{23} - \sum_{i \in D^3} v_{i3} x_{ij}^3 - \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3} x_{ij}^3 +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{E \in D^{34}} p_{l1} Z_{lj}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2} Z_{lj}^{34} - \sum_{r \in R^3} u_{r3} y_{rj}^3 + u_{30} \leq 0, \\
 & j = 1, 2, \dots, n; \\
 & - \sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1} Z_{lj}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3} Z_{lj}^{12} - \sum_{i \in D^2} v_{i2} x_{ij}^2 - \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2} x_{ij}^2 + \\
 & + \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1} Z_{lj}^{23} + \sum_{l \in ND^3} \mu_{l2} Z_{lj}^{23} - \sum_{r \in R^2} u_{r2} y_{rj}^2 + u_{20} \leq 0, \\
 & j = 1, 2, \dots, n; \\
 & - \sum_{l \in D^{34}} p_{l1} Z_{lj}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l3} Z_{lj}^{34} - \sum_{i \in D^4} v_{i4} x_{ij}^4 - \sum_{i \in ND^4} \bar{v}_{i4} x_{ij}^4 + \\
 & + \sum_{r=1}^s w_r y_{rj} + u_{40} \leq 0, j = 1, 2, \dots, n; \\
 & \sum_{i \in D^1} v_{i1} x_{io}^1 + \sum_{i \in D^2} v_{i2} x_{io}^2 + \sum_{i \in D^3} v_{i3} x_{io}^3 + \sum_{i \in D^4} v_{i4} x_{io}^4 = 1;
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 & v_{if} \geq 0, i \in D^f, f = 1, 2, 3, 4; \\
 & \bar{v}_{if} \geq 0, i \in ND^f, f = 1, 2, 3, 4; \\
 & \varphi_{l1} \geq 0, l \in D^{12}; \\
 & \mu_{l1} \geq 0, l \in D^{23}; \\
 & p_{l1} \geq 0, l \in D^{34}; \\
 & u_{rh} \geq 0, r \in R^h, h = 1, 2, 3; \\
 & w_r \geq 0, r = 1, 2, \dots, s; \\
 & \varphi_{l2}, \varphi_{l3} : \text{free}, l \in ND^{12}; \\
 & \mu_{l2}, \mu_{l3} : \text{free}, l \in ND^{23}; \\
 & p_{l2}, p_{l3} : \text{free}, l \in ND^{34}; \\
 & p_{l2}, p_{l3} : \text{free}, l \in ND^{34}; \\
 & u_{t0} : \text{free}, t = 1, 2, 3, 4.
 \end{aligned}$$

Suppose that Z_o^* is the value of objective function in model (9) for each optimal solution. In this case, overall efficiency of supply chain corresponding to DMU_o is equal to:

$$\begin{aligned}
 Z_o^* = & - \sum_{i \in ND^1} \bar{v}_{i1} x_{io}^1 + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2} Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3} Z_{lo}^{12} - \\
 & - \sum_{r \in R^1} u_{r1} y_{ro}^1 - \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2} x_{io}^2 + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l2} Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3} Z_{lo}^{23} - \\
 & - \sum_{r \in R^2} u_{r2} y_{ro}^2 - \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3} x_{io}^3 + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2} Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l3} Z_{lo}^{34} - \\
 & - \sum_{r \in R^3} u_{r3} y_{ro}^3 - \sum_{i \in ND^4} \bar{v}_{i4} x_{io}^4 + \sum_{r=1}^s w_r y_{ro} + \\
 & + u_{10}^* + u_{20}^* + u_{30}^* + u_{40}^*.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Definition 4: If $Z_o^* = 1$ then DMU_o or the chain corresponding to it, is efficient, otherwise it will be inefficient.

It is concluded from the series of first, second, third and fourth constraints in model (9) and the last constraint that for the optimal solution and for $j = 0$:

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{i \in D^1} v_{i1}^* x_{io}^1 - \sum_{i \in ND^1} \bar{v}_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \\
 & + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2}^* Z_{lo}^{12} - \sum_{r \in R^1} u_{r1}^* y_{ro}^1 + u_{10}^* \leq 0;
 \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3}^* Z_{lo}^{12} - \sum_{i \in D^2} v_{i2}^* x_{io}^2 - \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2}^* x_{io}^2 + \\
 & + \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^3} \mu_{l2}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{r \in R^2} u_{r2}^* y_{ro}^2 + u_{20}^* \leq 0;
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{i \in D^3} v_{i3}^* x_{io}^3 - \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3}^* x_{io}^3 + \\
 & + \sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2}^* Z_{lo}^{34} - \sum_{r \in R^3} u_{r3}^* y_{ro}^3 + u_{30}^* \leq 0;
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l3}^* Z_{lo}^{34} - \sum_{i \in D^4} v_{i4}^* x_{io}^4 - \\
 & - \sum_{i \in ND^4} \bar{v}_{i4}^* x_{io}^4 + \sum_{r=1}^s w_r^* y_{ro} + u_{40}^* \leq 0;
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\sum_{i \in D^1} v_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{i \in D^2} v_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{i \in D^3} v_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{i \in D^4} v_{i4}^* x_{io}^4 = 1. \tag{15}$$

From inequalities (11), (12), (13) and (14), it resulted that:

$$\frac{\sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2}^* Z_{lo}^{12} + u_{10}^*}{\sum_{i \in D^1} v_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{i \in ND^1} \bar{v}_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{r \in R^1} u_{r1}^* y_{ro}^1} \leq 1; \tag{16}$$

$$\frac{\sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^3} \mu_{l2}^* Z_{lo}^{23} + u_{20}^*}{\sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{i \in D^2} v_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{r \in R^2} u_{r2}^* y_{ro}^2} \leq 1; \tag{17}$$

$$\frac{\sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2}^* Z_{lo}^{34} + u_{30}^*}{\sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{i \in D^3} v_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{r \in R^3} u_{r3}^* y_{ro}^3} \leq 1; \tag{18}$$

$$\frac{\sum_{l \in ND^{34}} p_{l3}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{r=1}^s w_r^* y_{ro} + u_{40}^*}{\sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{i \in D^4} v_{i4}^* x_{io}^4 + \sum_{i \in ND^4} \bar{v}_{i4}^* x_{io}^4} \leq 1; \tag{19}$$

The deduction of the first side of the inequality (16), (17), (18) and (19), will respectively determine the efficiency of stages S_1, S_2, S_3 and S_4 of chain corresponding to DMU_o which are represented by symbols $Z_{10}^*, Z_{20}^*, Z_{30}^*$ and Z_{40}^* .

Definition 5: If Z_{io}^* , then the chain corresponding to DMU_o , is efficient in stage S_i .

Theorem 3: DMU_o or the chain corresponding to it, is efficient if and only if $Z_{1o}^* = 1$, $Z_{2o}^* = 1$, $Z_{3o}^* = 1$ and $Z_{4o}^* = 1$.

Argument:

Suppose that $Z_o^* = 1$.

Assume for proof by contradiction that $Z_{1o}^* < 1$, or $Z_{2o}^* < 1$, or $Z_{3o}^* < 1$, or $Z_{4o}^* < 1$.

Without loss of the generality of the argument, assume that $Z_{1o}^* < 1$, or $Z_{2o}^* \leq 1$, or $Z_{3o}^* \leq 1$, or $Z_{4o}^* \leq 1$.

Hence, with respect to equations (16), (17), (18) and (19) we have:

$$-\sum_{i \in D^1} v_{i1}^* x_{io}^1 - \sum_{i \in ND^1} \bar{v}_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2}^* Z_{lo}^{12} - \sum_{r \in R^1} u_{r1}^* y_{ro}^1 + u_{1o}^* < 0; \quad (20)$$

$$-\sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3}^* Z_{lo}^{12} - \sum_{i \in D^2} v_{i2}^* x_{io}^2 - \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l2}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{r \in R^2} u_{r2}^* y_{ro}^2 + u_{2o}^* \leq 0; \quad (21)$$

$$-\sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{i \in D^3} v_{i3}^* x_{io}^3 - \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2}^* Z_{lo}^{34} - \sum_{r \in R^3} u_{r3}^* y_{ro}^3 + u_{3o}^* \leq 0 \quad (22)$$

$$-\sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l3}^* Z_{lo}^{34} - \sum_{i \in D^4} v_{i4}^* x_{io}^4 - \sum_{i \in ND^4} \bar{v}_{i4}^* x_{io}^4 + \sum_{r=1}^s w_r^* y_{ro} + u_{4o}^* \leq 0. \quad (23)$$

Now by summing the sides of the four inequalities and the equation

$$\sum_{i \in D^1} v_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{i \in D^2} v_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{i \in D^3} v_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{i \in D^4} v_{i4}^* x_{io}^4 = 1$$

we have:

$$-\sum_{i \in D^1} \bar{v}_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3}^* Z_{lo}^{12} - \sum_{r \in R^1} u_{r1}^* y_{ro}^1 - \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l2}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{r \in R^2} u_{r2}^* y_{ro}^2 - \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2}^* Z_{lo}^{34}. \quad (24)$$

So we have $Z_o^* < 1$ which is against the original assumption, therefore $Z_{1o}^* = Z_{2o}^* = Z_{3o}^* = Z_{4o}^* = 1$.

Now inversely suppose that $Z_{1l}^* = Z_{2l}^* = Z_{3l}^* = Z_{4l}^* = 1$.

From equations (16), (17), (18) and (19) we have:

$$-\sum_{i \in D^1} v_{i1}^* x_{io}^1 - \sum_{i \in ND^1} \bar{v}_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l2}^* Z_{lo}^{12} - \sum_{r \in R^1} u_{r1}^* y_{ro}^1 + u_{1o}^* = 0; \quad (25)$$

$$-\sum_{l \in D^{12}} \varphi_{l1}^* Z_{lo}^{12} + \sum_{l \in ND^{12}} \varphi_{l3}^* Z_{lo}^{12} - \sum_{i \in D^2} v_{i2}^* x_{io}^2 - \sum_{i \in ND^2} \bar{v}_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l2}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{r \in R^2} u_{r2}^* y_{ro}^2 + u_{2o}^* = 0; \quad (26)$$

$$-\sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l3}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{i \in D^3} v_{i3}^* x_{io}^3 - \sum_{i \in ND^3} \bar{v}_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l2}^* Z_{lo}^{34} - \sum_{r \in R^3} u_{r3}^* y_{ro}^3 + u_{3o}^* = 0; \quad (27)$$

$$-\sum_{l \in D^{34}} p_{l1}^* Z_{lo}^{34} + \sum_{l \in ND^{34}} p_{l3}^* Z_{lo}^{34} - \sum_{i \in D^4} v_{i4}^* x_{io}^4 - \sum_{i \in ND^4} \bar{v}_{i4}^* x_{io}^4 + \sum_{l \in D^{23}} \mu_{l1}^* Z_{lo}^{23} + \sum_{l \in ND^{23}} \mu_{l2}^* Z_{lo}^{23} - \sum_{r \in R^2} u_{r2}^* y_{ro}^2 + u_{2o}^* = 0; \quad (28)$$

By summing sides of the four above equations and

$$\sum_{i \in D^1} v_{i1}^* x_{io}^1 + \sum_{i \in D^2} v_{i2}^* x_{io}^2 + \sum_{i \in D^3} v_{i3}^* x_{io}^3 + \sum_{i \in D^4} v_{i4}^* x_{io}^4 = 1,$$

we conclude that $Z_o^* = 1$, so DMU_o or the corresponding chain, is efficient.

In order to provide an expert opinion for some of the indicators preference over each other and the influence of this approach on the efficiency of the supply chain, we attempted to determine the weights for the indicators using the fuzzy decision-making technique and expert opinion survey. We add the considered weight constraints (equations 29) to the model (9) to help more accurately estimate the supply chain efficiency:

$$\begin{aligned} u_{11} &\geq (0.165 / 0.132) \cdot \varphi_{31}; \\ \varphi_{31} &\geq (0.132 / 0.116) \cdot \varphi_{51}; \\ \varphi_{51} &\geq (0.116 / 0.103) \cdot \bar{v}_{12}; \\ p_{21} &\geq (0.147 / 0.146) \cdot p_{11}; \\ p_{11} &\geq (0.146 / 0.140) \cdot p_{41}; \\ p_{41} &\geq (0.140 / 0.122) \cdot v_{24}; \\ \bar{v}_{11} &\geq (0.185 / 0.132) \cdot v_{51}. \end{aligned} \quad (29)$$

3. Case study

Green supply chain management is one of the critical issues in organizations that managers need to design appropriate models for performance evaluation. In this regard, in some cases, we may encounter undesirable outputs such as environmental pollutants. In addition to special indicators, undesirable and environmental factors must be considered for correct evaluation of Cement companies in the framework of the supply chain.

The evaluation of cement factories in the country in the form of complete supply chains and attention to

these undesirable and negative factors, as well as Non-Discretionary factors that are partly or fully out of management control, was one incentive to perform this research. For this purpose, according to the opinion of experts and based on theoretical studies conducted in previous research and methods for selecting the indicators, suitable indicators for the Iranian cement industry were determined in accordance with the following tables (Tables 1–4). Also, among these performance indicators, special indicators such as non-discretionary inputs and outputs, undesirable outputs and negative outputs have been specified.

Table 1.

**Introducing indicators and their definition
for j -th decision-making unit in inputs and intermediate data**

Symbols		Discretionary or non-discretionary indicators	Indicator classification	Indicator title
X_{ij}^1	X_{1j}^1	D	Original input of chain	Total current or operational costs
	X_{2j}^1			Total initial investment in mine exploitation and plant process
	X_{3j}^1			Total debt of the factory
	X_{4j}^1			Total financial expenses
	X_{5j}^1			Total amount of salary
	X_{6j}^1	ND		Quality of suppliers in terms of sustainability in the supply of minerals and consumables
Z_{lj}^{12}	Z_{1j}^{12}	D	Intermediate data (output of stage 1 and input of stage 2)	Total mineral resources available
	Z_{2j}^{12}			Total tonnage of raw materials harvested from mines, which should be consumed in the production process
	Z_{3j}^{12}			The tonnage of other chemical and mineral substances consumed in the process of production
	Z_{4j}^{12}			Total mineral raw materials stored for use in cold season
	Z_{5j}^{12}			Total R&D expenses
	Z_{6j}^{12}	ND		Real industry capacity
Z_{lj}^{23}	Z_{1j}^{23}	D	Intermediate data (output of stage 2 and input of stage 3)	Total clinker production capacity
	Z_{2j}^{23}			Total cement production capacity
Z_{lj}^{34}	Z_{1j}^{34}	ND	Intermediate data (output of stage 3 and input of stage 4)	Total value of assets and inventories ready for sale
	Z_{2j}^{34}			Total tonnage of packaged and bulk cement sales in the domestic market and exports
	Z_{3j}^{34}			Total clinker sales tonnage
	Z_{4j}^{34}			The cost of the product

Table 2.

**Introducing indicators and their definition
for j -th decision-making unit in final output**

Symbols		Status of indicator	Indicator classification	Indicator title
Y_{rj}	y_{1j}	Non–negative	Final output	Total current assets
	y_{2j}			Brand competitiveness and globalization
	y_{3j}			Customer satisfaction
	y_{4j}	Total profit		
	y_{5j}	Annual growth rate based on performance		
	y_{6j}	Equity return		
		Negative or non–negative		

Table 3.

**Introducing indicators and their definition
for j -th decision-making unit in independent inputs of each stage**

Symbols		Discretionary or non-discretionary indicators	Indicator classification	Indicator title
X_{ij}^2	X_{1j}^2	ND	Independent inputs of Stage 2	Total cost of energy payment
X_{ij}^3	X_{1j}^3	D	Independent inputs of Stage 3	Total cost for increasing reliability in the supply chain
X_{ij}^4	X_{1j}^4	D	Independent inputs of Stage 4	Cost of environmentally friendly design
	X_{2j}^4			Total marketing fee

Table 4.

**Introducing indicators and their definition
for j -th decision-making unit in undesirable outputs**

Symbols		Status of indicators	Indicator classification	Indicator title
Y_{ij}^1	y_{1j}^1	$U.D$	Undesirable outputs of Stage1	Causing destructive environmental effects in harvesting of mines
Y_{ij}^2	y_{1j}^2	$U.D$	Undesirable outputs of Stage2	Total produced dust particles (mg / m ³)
	y_{2j}^2			Average annual emissions of NO _x
	y_{3j}^2			Average annual emissions of CO ₂
	y_{4j}^2			Average annual emissions of SO ₂
	y_{5j}^2			Effect of total water and sewage intake in groundwater
	y_{6j}^2			Impact of factory performance on the creation of negative conditions in the ecosystem

To illustrate the application of the proposed method, we consider the actual data of the 42 cement companies listed on the Tehran stock exchange during one year with the inputs, outputs, and intermediate data in accordance with the above tables. We ran the model (9) by defining weight constraints for some of the indicators based on the

expert opinion and by considering theorem 1 for the negative outputs of the fourth stage. By applying this model, the efficiency of each company was determined as well as the efficiency of each stage of their corresponding chains based on the explanations given in the previous sections. The results are shown in Table 5.

Table 5.

**Efficiency of all companies and efficiency
of each chain stages corresponding to them**

Number	Company	Total efficiency	Supplier stage efficiency	Manufacturer stage efficiency	Distributor stage efficiency	Customer stage efficiency
1	Abadeh	0.8679	1.00	0.98	0.95	0.55
2	Abbey	0.8955	1.00	1.00	0.85	1.00
3	Darab	0.7090	0.80	0.96	0.89	0.57
4	Ardebil	0.8308	1.00	0.93	0.87	0.68
5	Oroumijeh	0.6781	1.00	0.95	0.83	0.46
6	Saveh	0.7078	1.00	1.00	0.95	0.29
7	Bagheran	0.6810	0.77	0.97	0.80	0.50
8	Bojnourd	0.8716	0.91	0.97	0.87	1.00
9	Sabzevar Lar	0.9452	1.00	1.00	0.97	1.00
10	Behbahan	0.9494	1.00	0.93	1.00	1.00
11	Sepahan	0.5352	1.00	0.93	0.87	0.38
12	Tehran	1	1.00	1.00	1.00	1.00
13	West Asia Complex	0.6978	1.00	1.00	0.76	0.33
14	Khash	0.8124	0.95	0.95	0.91	0.75
15	Khorramabad	0.6981	0.89	0.97	0.88	0.27
16	Khazar	0.8304	0.94	1.00	0.84	0.60
17	Majd Khaf	1	1.00	1.00	1.00	1.00
18	Khoozestan	1	1.00	1.00	1.00	1.00
19	Dashtestan Ce	0.9697	1.00	1.00	0.99	1.00
20	Doroud	0.7840	1.00	1.00	0.80	0.36
21	Shahrud	0.7381	0.85	1.00	0.84	0.54
22	Shargh	0.8456	1.00	1.00	0.89	0.67
23	Shomal	0.8522	0.92	0.96	0.88	1.00
24	Isfahan	0.6949	0.84	0.95	0.89	0.53
25	Soufian	0.7976	0.92	0.99	0.82	0.76
26	Gharb	0.7947	0.91	0.98	0.85	0.69
27	Fars Cement	0.8577	1.00	0.98	0.88	0.64
28	Faraz Firozkouh	0.8291	0.93	0.97	0.88	0.70
29	Urmia White	0.9405	1.00	0.96	0.97	0.86
30	Siman Fars Noe	0.8854	0.92	0.98	0.94	1.00
31	Firozkouh	0.8395	1.00	0.97	0.87	0.79
32	Qayen	1	1.00	1.00	1.00	1.00
33	Karoon	0.9064	1.00	1.00	0.88	0.72
34	Kordestan Ce. Co	0.5810	0.81	0.98	0.84	0.15

Number	Company	Total efficiency	Supplier stage efficiency	Manufacturer stage efficiency	Distributor stage efficiency	Customer stage efficiency
35	Kerman	0.9603	1.00	0.98	0.95	1.00
36	Larestan	1	1.00	1.00	1.00	1.00
37	Mazandaran	0.9383	1.00	1.00	0.85	1.00
38	Momtazan kerman	0.9011	0.89	0.94	0.94	1.00
39	Neiriz	1	1.00	1.00	1.00	1.00
40	Hormozgan	0.9314	1.00	1.00	0.89	1.00
41	Hegmatan	0.7213	0.93	0.98	0.83	0.45
42	Ilam	0.6458	0.85	0.97	0.80	0.27

As can be seen, six companies have a total efficiency score of 1 and are considered to be efficient factories and the rest of the factories have an efficiency score below 1 and are considered inefficient. Also, nine cement companies have a total efficiency score above 0.9, indicating that they have a relatively good efficiency. The results show that a company has a total performance of 1 that is efficient at all stages or has an efficiency score of 1 in all stages. Among the companies studied, Sepahan Cement has the poorest efficiency, with a score of 0.5352.

In the supplier sector, 25 companies, i.e. more than half of the companies, achieved an efficiency score of 1. In this case, the performance of the suppliers of most companies is evaluated as desirable. At the manufacturer stage, 18 companies are identified as efficient and the rest of the companies achieved a performance score above 0.93. This indicates that almost all companies perform relatively well in planning for cement production, however companies with a performance score between 0.93 and 1 ($0.93 \leq \theta^* < 1$), at this stage need to have more precise planning for producing cement to achieve their desired performance. At the Distributor stage, the performance of most DMUs is not desirable and only seven cement factories have achieved an efficiency score of 1. At this point, the factors that reduce the efficiency of factories should be considered and appropriate measures must be taken to overcome them. Finally at the customer stage, there are 17 efficient companies and the rest of the companies have a low performance score, with Kordestan Cement having the weakest performance score of 0.15.

Data related to the distance of each company to the center of the province in which it is located and their distance to the soil mine related to them, are collected and listed in *Table 6*.

We calculate the efficiency correlation coefficient of each company with its distance to the center of the soil mine (silica) and its distance to the center of the province. *Tables 7* and *8* show this correlation coefficient.

Also, the variance of the total efficiency and the efficiency of each stage are calculated for companies and are presented in *Table 9*.

The efficiency correlation coefficient of the supplier stage with the distance from the company to the soil mine is equal to 0.261, which is greater than the correlation coefficient of the efficiency of other stages and the total efficiency with the distance to the mine. This shows that this stage has the highest relationship with the distance between companies and the mine compared to other stages. The low correlation coefficient of customer stage efficiency (-0.011) with the distance to the mine shows that there is no significant relationship between this stage and the distance of companies to the mine.

The high correlation coefficient of the efficiency of the distributor stage with the distance of companies to the center of the province (0.385) indicates that for the distribution of the product, the distance from the factory to the center of the province is very important and there is a significant relationship between the distributor stage and this distance. There is no significant relationship between the supplier stage and the distance between the factories and the center of the province because the correlation coefficient of this stage is the lowest value, 0.063.

The variance of the manufacturer stage is 0.0005. The difference between the maximum and minimum values of the efficiencies at this stage is a small number of 0.07 ($1 - 0.93 = 0.07$). Therefore, all companies in cement production have similar performance and there is no significant difference between their efficiency at this stage.

Table 6.

Distance of factory to center of province and soil mine (silica)

Num-ber	Company	Distance to soil mine (silica) (Km)	Distance to center of province (Km)	Num-ber	Company	Distance to soil mine (silica) (Km)	Distance to center of province (Km)
1	Abadeh Cement	10	228	22	Shargh Cement	6	259
2	Abik Cement	4	68	23	Shomal Cement	5	119
3	Darab Cement	5	350	24	Esfahan Cement	10	135
4	Ardebil Cement	14	169	25	Soufian Cement	9	150
5	Urumia Cement	10	201	26	Gharb Cement	8	126
6	Saveh Cement	9	145	27	Fars Cement	10	155
7	Bagheran Cement	8	494	28	Faraz Firouzkouh Cement	5	120
8	Bojnourd Cement	6	208	29	Urumia Cement	6	178
9	Lar Sabzavar Cement	8	355	30	Farsno Cement	4	202
10	Behbahan Cement	9	239	31	Firouzkouh Cement	5	120
11	Sepahan Cement	10	132	32	Qaen Cement	9	356
12	Tehran Cement	15	81	33	Karoun Cement	7	296
13	West Asia Cement Complex	10	316	34	Kordestan Cement	6	152
14	Khash Cement	8	515	35	Kerman Cement	8	281
15	Khoramabad Cement	6	203	36	Larestan Cement	9	406
16	Khazar Cement	10	121	37	Mazandaran Cement	5	153
17	Majd Khaf Cement	7	264	38	Momtazan Kerman Cement	8	283
18	Khouzestan Cement	15	272	39	Sefid Neyriz Cement	6	341
19	Dashdestan Cement	16	178	40	Hormozgan Cement	9	416
20	Doroud Cement	8	171	41	Hegmatan Cement	10	178
21	Shahroud Cement	7	254	42	Ilam Cement	9	132

Table 7.

Efficiency correlation coefficient with its distance to the center of the soil mine (silica)

Efficiency	Total	Supplier stage	Manufacturer stage	Distributor stage	Customer stage
Correlation coefficient	0.099	0.261	0.023	0.212	-0.011

Table 8.

Efficiency correlation coefficient with its distance to the center of the province

Efficiency	Total	Supplier stage	Manufacturer stage	Distributor stage	Customer stage
Correlation coefficient	0.197	0.063	0.236	0.385	0.096

Table 9.

Efficiency variance

Efficiency	Total	Supplier stage	Manufacturer stage	Distributor stage	Customer stage
Variance	0.0153	0.0045	0.0005	0.0046	0.0733

The efficiency variance of cement companies in the customer stage (0.0733) is greater than the efficiency variance of other stages and the total efficiency variance. This indicates that the efficiency dispersion of the units is high at this stage. The value of variance for the supplier and distributor stages shows that the performance of the chains in these two stages is close to each other and the value of variance of total efficiency (0.0153) indicates that the dispersion of total efficiency of 42 supply chains is relatively high.

Conclusion

In this study, the status of the green supply chain including four stages of supplier, manufacturer, distributor and customer is investigated. In addition, the authors have attempted to evaluate the efficiency of this chain with inputs and outputs that have a specific structure, including non-discretionary inputs and outputs, undesirable outputs, and negative outputs which are investigated. The results show that among 42 green supply chains with this structure, there are six efficient and 36 inefficient chains. In addition, chains that have been fully efficient and have achieved an efficiency score of 1 are efficient in all four stages. Inefficient chains are inefficient at least in one stage, which also confirms the stated proposition. The most inefficient supply chain relates to the Sepahan factory (Unit 11) whose efficiency score is $\theta^* = 0.5362$. As can be seen, this unit is only efficient

in the supplier stage and it is inefficient in the other three stages, as it has very poor performance in the fourth stage. The efficiency score of all companies in the manufacturer stage is between 1 and 0.93. Therefore, at this stage, all companies have similar performance and there is no significant difference between their efficiencies.

The efficiency correlation coefficient of the supplier stage with the distance to the center of the mine shows that the highest relationship is between the supplier and the distance to the mine, which means that the performance of suppliers will be higher due to closer proximity to the mine. Since most suppliers were at a short distance from the mine, the efficiency of all cement companies was high at the supplier stage. The efficiency correlation coefficient of the distributor stage with the distance of the company to the center of the province where it is located indicates that the highest relationship is between the distributor and the distance to the center of the province. Therefore, the distance of companies to the geographical location of cement sales will have a significant impact on the performance of the distributor stage.

The authors focus in this study was to provide a radial model to evaluate the performance of green supply chain with inputs and outputs having a specific structure. Therefore, the authors suggest research to investigate the following: (1) provide non-radial models with this structure and (2) provide a model to determine the cause of supply chain inefficiency and provide solutions to improve their efficiency. ■

References

1. Färe R., Grosskopf S. (1997) Intertemporal production frontiers: with dynamic DEA. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no 6, pp. 656–656. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600779.
2. Färe R., Grosskopf S. (2000) Network DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 34, no 1, pp. 35–49. DOI: 10.1016/S0038-0121(99)00012-9.
3. Tone K., Tsutsui M. (2009) Network DEA: A slacks-based measure approach. *European Journal of Operational Research*, vol. 197, no 1, pp. 243–252. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.027.
4. Xu J., Li B., Wu D. (2009) Rough data envelopment analysis and its application to supply chain performance evaluation. *International Journal of Production Economics*, vol. 122, no 2, pp. 628–638. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.06.026.
5. Saranga H., Moser R. (2010) Performance evaluation of purchasing and supply management using value chain DEA approach. *European Journal of Operational Research*, vol. 207, no 1, pp. 197–205. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.04.023.
6. Chen C., Yan H. (2011) Network DEA model for supply chain performance evaluation. *European Journal of Operational Research*, vol. 213, no 1, pp. 147–155. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.03.010.
7. Azadeh A., Alem S.M. (2010) A flexible deterministic, stochastic and fuzzy Data Envelopment Analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: Simulation analysis. *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no 12, pp. 7438–7448. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.04.022.
8. Babazadeh R., Razmi J., Rabbani M., Pishvae M.S. (2017) An integrated data envelopment analysis—mathematical programming approach to strategic biodiesel supply chain network design problem. *Journal of Cleaner Production*, no 147, pp. 694–707. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.038.
9. Badiezadeh T., Saen R.F., Samavati T. (2018) Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach. *Computers & Operations Research*, no 98, pp. 284–290. DOI: 10.1016/j.cor.2017.06.003.
10. Boudaghi E., Saen R.F. (2018) Developing a novel model of data envelopment analysis—discriminant analysis for predicting group membership of suppliers in sustainable supply chain. *Computers & Operations Research*, no 89, pp. 348–359. DOI: 10.1016/j.cor.2017.01.006.
11. Fathi A., Saen R.F. (2018) A novel bidirectional network data envelopment analysis model for evaluating sustainability of distributive supply chains of transport companies. *Journal of Cleaner Production*, no 184, pp. 696–708. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.256.

12. Goodarzi M., Saen R.F. (2020) How to measure bullwhip effect by network data envelopment analysis? *Computers & Industrial Engineering*, no 139, article no 105431. DOI: 10.1016/j.cie.2018.09.046.
13. Grigoroudis E., Petridis K., Arabatzis G. (2014) RDEA: A recursive DEA based algorithm for the optimal design of biomass supply chain networks. *Renewable Energy*, no 71, pp. 113–122. DOI: 10.1016/j.renene.2014.05.001.
14. Huang C.-W. (2018) Assessing the performance of tourism supply chains by using the hybrid network data envelopment analysis model, *Tourism Management*, no 65, pp. 303–316. DOI: 10.1016/j.tourman.2017.10.013.
15. Izadikhah M., Saen, R.F. (2016) Evaluating sustainability of supply chains by two-stage range directional measure in the presence of negative data. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, no 49, pp. 110–126. DOI: 10.1016/j.trd.2016.09.003.
16. Izadikhah M., Saen, R.F., Ahmadi K. (2017) How to assess sustainability of suppliers in volume discount context? A new data envelopment analysis approach. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, no 51, pp. 102–121. DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.030.
17. Kalantary M., Saen R.F. (2019) Assessing sustainability of supply chains: An inverse network dynamic DEA model. *Computers & Industrial Engineering*, no 135, pp. 1224–1238. DOI: 10.1016/j.cie.2018.11.009.
18. Khodakarami M., Shabani A., Saen R.F., Azadi M. (2015) Developing distinctive two-stage data envelopment analysis models: An application in evaluating the sustainability of supply chain management. *Measurement*, no 70, pp. 62–74. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.03.024.
19. Mirhedayatian S.M., Azadi M., Saen R.F. (2014) A novel network data envelopment analysis model for evaluating green supply chain management. *International Journal of Production Economics*, no 147, pp. 544–554. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.02.009.
20. Sarah J., Khalili-Damghani K. (2019) Fuzzy type-II De-Novo programming for resource allocation and target setting in network data envelopment analysis: a natural gas supply chain. *Expert Systems with Applications*, no 117, pp. 312–329. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.09.046.
21. Shafiee M., Lotfi F.H., Saleh H. (2014) Supply chain performance evaluation with data envelopment analysis and balanced scorecard approach. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, no 21–22, pp. 5092–5112. DOI: 10.1016/j.apm.2014.03.023.
22. Tajbakhsh A., Hassini E. (2015) A data envelopment analysis approach to evaluate sustainability in supply chain networks. *Journal of Cleaner Production*, no 105, pp. 74–85. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.054.
23. Tavana M., Kaviani M.A., Di Caprio D., Rahpeyma B. (2016) A two-stage data envelopment analysis model for measuring performance in three-level supply chains. *Measurement*, no 78, pp. 322–333. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.023.
24. Tavana M., Mirzagoltabar H., Mirhedayatian S.M., Saen R.F., Azadi M. (2013) A new network epsilon-based DEA model for supply chain performance evaluation. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 66, no 2, pp. 501–513. DOI: 10.1016/j.cie.2013.07.016.
25. Tavassoli M., Saen R.F. (2019) Predicting group membership of sustainable suppliers via data envelopment analysis and discriminant analysis. *Sustainable Production and Consumption*, no 18, pp. 41–52. DOI: 10.1016/j.spc.2018.12.004.
26. Yousefi S., Soltani R., Saen R.F., Pishvae M.S. (2017) A robust fuzzy possibilistic programming for a new network GP-DEA model to evaluate sustainable supply chains. *Journal of Cleaner Production*, no 166, pp. 537–549. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.054.
27. Zhai D., Shang J., Yang F., Ang S. (2019) Measuring energy supply chains' efficiency with emission trading: A two-stage frontier-shift data envelopment analysis. *Journal of Cleaner Production*, no 210, pp. 1462–1474. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.355.
28. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. (1984) Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. *Management Science*, vol. 30, no 9, pp. 1078–1092. DOI: 10.1287/mnsc.30.9.1078.
29. Cooper W.W., Seiford L., Tone K. (2002) *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. Norwell, Massachusetts, US: Kluwer Academic Publishers.
30. Cook W.D., Zhu J., Bi G., Yang F. (2010) Network DEA: Additive efficiency decomposition. *European Journal of Operational Research*, vol. 207, no 2, pp. 1122–1129. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.05.006.
31. Cook W.D., Liang L., Zhu J. (2010) Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective. *Omega*, vol. 38, no 6, pp. 423–430. DOI: 10.1016/j.omega.2009.12.001.

About the authors

Mehdi Shoja

Ph.D. Student, Industrial Engineering Department, Roodehen Branch, Islamic Azad University, No 4, Shahid Ahmadi Alley, Valiasr Town, Firoozkooh, Tehran 3981838183, Iran;

E-mail: mmsh.bim@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9221-8071

Farhad Hosseinzadeh Lotfi

Professor, Mathematics Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Shohada Hesarak Blv, University Square, End of Shahid Sattari Highway, Tehran 1477893855, Iran;

E-mail: farhad@hosseinzadeh.ir

ORCID: 0000-0001-5022-553X

Amir Gholam Abri

Associate Professor, Mathematics Department, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, First of Valiasr Town, 45 Meters Street, Firoozkooh, Tehran 3981838381, Iran;

E-mail: amirgholamabri@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1981-9756

Alireza Rashidi Komijan

Associate Professor, Industrial Engineering Department, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, First of Valiasr Town, 45 Meters Street, Firoozkooh, Tehran 3981838381, Iran;

E-mail: rashidi@azad.ac.ir

ORCID: 0000-0001-7705-980X

Эффективность «зеленой» цепи поставок при наличии недискреционных и нежелательных факторов с применением анализа среды функционирования

Мехди Шойя^a

E-mail: mmsh.bim@gmail.com

Фархад Хоссейнзаде Лотфи^b

E-mail: farhad@hosseinzadeh.ir

Амир Гхолам Абри^c

E-mail: amirgholamabri@gmail.com

Алиреза Рашиди Комийан^c

E-mail: rashidi@azad.ac.ir

^a Roodehen Branch, Islamic Azad University

Адрес: No 4, Shahid Ahmadi Alley, Valiasr Town, Firoozkooh, Tehran 3981838183, Iran

^b Science and Research Branch, Islamic Azad University

Адрес: Shohada Hesarak Blv, University Square, End of Shahid Sattari Highway, Tehran 1477893855, Iran

^c Firoozkooh Branch, Islamic Azad University

Адрес: First of Valiasr Town, 45 Meters Street, Firoozkooh, Tehran 3981838381, Iran

Аннотация

Управление цепями поставок представляет собой новый подход, доминирующий в области управления производственными операциями в последние годы. Цепь поставок включает в себя все объекты, работы и операции (от поставщиков до клиентов), связанные с производством продукта. Отдельные элементы цепи поставок предусматривают планирование, управление спросом и предложением, закупку сырья, планирование производства, распределение и доставку продукции заказчику. Отдельные структуры в цепочке поставок были рассмотрены в предыдущих исследованиях. В данной статье цепочка поставок и оценка ее эффективности рассматриваются в условиях наличия недискреционных и нежелательных факторов, а также негативных данных. Для этой цели представлена модель сетевого анализа среды функционирования, которая оценивает производительность цепочки при наличии недискреционных входов и выходов, нежелательных и отрицательных последствий, имеющихся даже в ее внутренней структуре. Эффективность этапов цепи также определяется с использованием двойной модели. В ходе исследования были оценены 42 цементные компании, котирующиеся на Тегеранской фондовой бирже, каждая из которых имеет цепь поставок из четырех этапов, включающую поставщиков, производителей, дистрибьюторов и клиентов. В результате применения модели шесть компаний были признаны эффективными, а остальные – неэффективными. Кроме того, 25 цементных компаний в секторе поставщиков, 18 компаний в производственном секторе, семь компаний в секторе распределения и 17 компаний в секторе обслуживания клиентов были признаны эффективными.

Ключевые слова: эффективность цепи поставок; цементная промышленность; сетевой анализ среды функционирования; недискреционные факторы; нежелательные последствия; негативная информация.

Цитирование: Shoja M., Lotfi F.H., Abri A.G., Komijan A.R. Efficiency of Green Supply Chain in the presence of non-discretionary and undesirable factors, using Data Envelopment Analysis // *Business Informatics*. 2021. Vol. 15. No 3. P. 78–96. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.3.78.96

Литература

1. Färe R., Grosskopf S. Intertemporal production frontiers: with dynamic DEA // *Journal of the Operational Research Society*. 1997. Vol. 48. No 6. P. 656–656. DOI: 10.1057/palgrave.jors.2600779.
2. Färe R., Grosskopf S. Network DEA // *Socio-Economic Planning Sciences*. 2000. Vol. 34. No 1. P. 35–49. DOI: 10.1016/S0038-0121(99)00012-9.
3. Tone K., Tsutsui M. Network DEA: A slacks-based measure approach // *European Journal of Operational Research*. 2009. Vol. 197. No 1. P. 243–252. DOI: 10.1016/j.ejor.2008.05.027.
4. Xu J., Li B., Wu D. Rough data envelopment analysis and its application to supply chain performance evaluation // *International Journal of Production Economics*. 2009. Vol. 122. No 2. P. 628–638. DOI: 10.1016/j.ijpe.2009.06.026.
5. Saranga H., Moser R. Performance evaluation of purchasing and supply management using value chain DEA approach // *European Journal of Operational Research*. 2010. Vol. 207. No 1. P. 197–205. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.04.023.
6. Chen C., Yan H. Network DEA model for supply chain performance evaluation // *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 213. No 1. P. 147–155. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.03.010.
7. Azadeh A., Alem S.M. A flexible deterministic, stochastic and fuzzy Data Envelopment Analysis approach for supply chain risk and vendor selection problem: Simulation analysis // *Expert Systems with Applications*. 2010. Vol. 37. No 12. P. 7438–7448. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.04.022.
8. Babazadeh R., Razmi J., Rabbani M., Pishvaei M.S. An integrated data envelopment analysis–mathematical programming approach to strategic biodiesel supply chain network design problem // *Journal of Cleaner Production*. 2017. No 147. P. 694–707. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.038.
9. Badiezhadeh T., Saen R.F., Samavati T. Assessing sustainability of supply chains by double frontier network DEA: A big data approach // *Computers & Operations Research*. 2018. No 98. P. 284–290. DOI: 10.1016/j.cor.2017.06.003.
10. Boudaghi E., Saen R.F. Developing a novel model of data envelopment analysis–discriminant analysis for predicting group membership of suppliers in sustainable supply chain // *Computers & Operations Research*. 2018. No 89. P. 348–359. DOI: 10.1016/j.cor.2017.01.006.
11. Fathi A., Saen R.F. A novel bidirectional network data envelopment analysis model for evaluating sustainability of distributive supply chains of transport companies // *Journal of Cleaner Production*. 2018. No 184. P. 696–708. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.02.256.
12. Goodarzi M., Saen R.F. How to measure bullwhip effect by network data envelopment analysis? // *Computers & Industrial Engineering*. 2020. No 139. Article no 105431. DOI: 10.1016/j.cie.2018.09.046.
13. Grigoroudis E., Petridis K., Arabatzis G. RDEA: A recursive DEA based algorithm for the optimal design of biomass supply chain networks // *Renewable Energy*. 2014. No 71. P. 113–122. DOI: 10.1016/j.renene.2014.05.001.
14. Huang C.-W. Assessing the performance of tourism supply chains by using the hybrid network data envelopment analysis model // *Tourism Management*. 2018. No 65. P. 303–316. DOI: 10.1016/j.tourman.2017.10.013.
15. Izadikhah M., Saen, R.F. Evaluating sustainability of supply chains by two-stage range directional measure in the presence of negative data // *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2016. No 49. P. 110–126. DOI: 10.1016/j.trd.2016.09.003.
16. Izadikhah M., Saen, R.F., Ahmadi K. How to assess sustainability of suppliers in volume discount context? A new data envelopment analysis approach // *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. 2017. No 51. P. 102–121. DOI: 10.1016/j.trd.2016.11.030.
17. Kalantary M., Saen R.F. Assessing sustainability of supply chains: An inverse network dynamic DEA model // *Computers & Industrial Engineering*. 2019. No 135. P. 1224–1238. DOI: 10.1016/j.cie.2018.11.009.
18. Khodakarami M., Shabani A., Saen R.F., Azadi M. Developing distinctive two-stage data envelopment analysis models: An application in evaluating the sustainability of supply chain management // *Measurement*. 2015. No 70. P. 62–74. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.03.024.
19. Mirhedayatian S.M., Azadi M., Saen R.F. A novel network data envelopment analysis model for evaluating green supply chain management // *International Journal of Production Economics*. 2014. No 147. P. 544–554. DOI: 10.1016/j.ijpe.2013.02.009.
20. Sarah J., Khalili-Damghani K. Fuzzy type-II De-Novo programming for resource allocation and target setting in network data envelopment analysis: a natural gas supply chain // *Expert Systems with Applications*. 2019. No 117. P. 312–329. DOI: 10.1016/j.eswa.2018.09.046.
21. Shafiee M., Lotfi F.H., Saleh H. Supply chain performance evaluation with data envelopment analysis and balanced scorecard approach // *Applied Mathematical Modelling*. 2014. Vol. 38. No 21–22. P. 5092–5112. DOI: 10.1016/j.apm.2014.03.023.
22. Tajbakhsh A., Hassini E. A data envelopment analysis approach to evaluate sustainability in supply chain networks // *Journal of Cleaner Production*. 2015. No 105. P. 74–85. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.054.
23. Tavana M., Kaviani M.A., Di Caprio D., Rahpeyma B. A two-stage data envelopment analysis model for measuring performance in three-level supply chains // *Measurement*. 2016. No 78. P. 322–333. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.10.023.
24. A new network epsilon-based DEA model for supply chain performance evaluation / M. Tavana [et al.] // *Computers & Industrial Engineering*. 2013. Vol. 66. No 2. P. 501–513. DOI: 10.1016/j.cie.2013.07.016.
25. Tavassoli M., Saen R.F. Predicting group membership of sustainable suppliers via data envelopment analysis and discriminant analysis // *Sustainable Production and Consumption*. 2019. No 18. P. 41–52. DOI: 10.1016/j.spc.2018.12.004.

26. Yousefi S., Soltani R., Saen R.F., Pishvae M.S. A robust fuzzy possibilistic programming for a new network GP-DEA model to evaluate sustainable supply chains // *Journal of Cleaner Production*. 2017. No 166. P. 537–549. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.054.
27. Zhai D., Shang J., Yang F., Ang S. Measuring energy supply chains' efficiency with emission trading: A two-stage frontier-shift data envelopment analysis // *Journal of Cleaner Production*. 2019. No 210. P. 1462–1474. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.355.
28. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis // *Management Science*. 1984. Vol. 30. No 9. P. 1078–1092. DOI: 10.1287/mnsc.30.9.1078.
29. Cooper W.W., Seiford L., Tone K. *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software*. Norwell, Massachusetts, US: Kluwer Academic Publishers, 2002.
30. Cook W.D., Zhu J., Bi G., Yang F. Network DEA: Additive efficiency decomposition // *European Journal of Operational Research*. 2010. Vol. 207. No 2. P. 1122–1129. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.05.006.
31. Cook W.D., Liang L., Zhu J. Measuring performance of two-stage network structures by DEA: A review and future perspective // *Omega*. 2010. Vol. 38. No 6. P. 423–430. DOI: 10.1016/j.omega.2009.12.001.

Об авторах

Мехди Шойя

Ph.D. Student, Industrial Engineering Department, Roodehen Branch, Islamic Azad University, No 4, Shahid Ahmadi Alley, Valiasr Town, Firoozkooh, Tehran 3981838183, Iran;

E-mail: mmsh.bim@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9221-8071

Фархад Хоссейнзаде Лотфи

Professor, Mathematics Department, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Shohada Hesarak Blv, University Square, End of Shahid Sattari Highway, Tehran 1477893855, Iran;

E-mail: farhad@hosseinzadeh.ir

ORCID: 0000-0001-5022-553X

Амир Гхолам Абри

Associate Professor, Mathematics Department, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, First of Valiasr Town, 45 Meters Street, Firoozkooh, Tehran 3981838381, Iran;

E-mail: amirgholamabri@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1981-9756

Алиреза Рашиди Комийан

Associate Professor, Industrial Engineering Department, Firoozkooh Branch, Islamic Azad University, First of Valiasr Town, 45 Meters Street, Firoozkooh, Tehran 3981838381, Iran;

E-mail: rashidi@azad.ac.ir

ORCID: 0000-0001-7705-980X