

ISSN 2712-8687

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

5/2024

CONTROL  SCIENCES

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

С. Н. Васильев, академик РАН,
И. А. Каляев, академик РАН,
Н. В. Кузнецов, чл.-корр. РАН,
В. А. Левин, академик РАН,
Н. А. Махутов, чл.-корр. РАН,
А. Ф. Резчиков, чл.-корр. РАН,
Е. А. Федосов, академик РАН

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Ф. Т. Алескеров, д-р техн. наук,
В. Н. Афанасьев, д-р техн. наук,
Н. Н. Бахтадзе, д-р техн. наук,
В. Н. Бурков, д-р техн. наук,
В. М. Вишнеvский, д-р техн. наук,
А. О. Калашников, д-р техн. наук,
В. В. Клочков, д-р экон. наук,
С. А. Краснова, д-р техн. наук,
О. П. Кузнецов, д-р техн. наук,
А. А. Лазарев, д-р физ.-мат. наук,
В. Г. Лебедев, д-р техн. наук,
В. Е. Лепский, д-р психол. наук,
Н. Е. Максимова, канд. техн. наук
(ответственный секретарь),
А. С. Мандель, д-р техн. наук,
Р. В. Мещеряков, д-р техн. наук,
А. И. Михальский, д-р биол. наук,
Д. А. Новиков, академик РАН
(гл. редактор),
Б. В. Павлов, д-р техн. наук,
Ф. Ф. Пашенко, д-р техн. наук
(зам. гл. редактора),
Л. Б. Рапопорт, д-р физ.-мат. наук,
С. В. Ратнер, д-р экон. наук,
Е. Я. Рубинович, д-р техн. наук,
М. В. Хлебников, д-р физ.-мат. наук,
А. Д. Цвиркун, д-р техн. наук,
И. Б. Ядыкин, д-р техн. наук

РУКОВОДИТЕЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ РЕДСОВЕТОВ

Владивосток – О. В. Абрамов, д-р техн. наук,
Волгоград – А. А. Воронин, д-р физ.-мат. наук,
Воронеж – С. А. Баркалов, д-р техн. наук,
Курск – С. Г. Емельянов, д-р техн. наук,
Липецк – А. К. Погодаев, д-р техн. наук,
Пермь – В. Ю. Столбов, д-р техн. наук,
Ростов-на-Дону – Г. А. Угольницкий,
д-р техн. наук,
Самара – М. И. Гераськин, д-р экон. наук,
Саратов – В. А. Кушников, д-р техн. наук,
Тамбов – М. Н. Краснянский, д-р техн. наук,
Уфа – Б. Г. Ильясов, д-р техн. наук,
Челябинск – О. В. Логиновский, д-р техн. наук

ADVISORY BOARD

E. A. Fedosov, RAS¹ Academician,
I. A. Kalyaev, RAS Academician,
N. V. Kuznetsov, RAS Corr. Member,
V. A. Levin, RAS Academician,
N. A. Makhutov, RAS Corr. Member,
A. F. Rezchikov, RAS Corr. Member,
S. N. Vassilyev, RAS Academician

EDITORIAL BOARD

V. N. Afanas'ev, Dr. Sci. (Tech.),
F. T. Aleskerov, Dr. Sci. (Tech.),
N. N. Bakhtadze, Dr. Sci. (Tech.),
V. N. Burkov, Dr. Sci. (Tech.),
A. O. Kalashnikov, Dr. Sci. (Tech.),
V. V. Klochkov, Dr. Sci. (Econ.),
M. V. Khlebnikov, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. A. Krasnova, Dr. Sci. (Tech.),
O. P. Kuznetsov, Dr. Sci. (Tech.),
A. A. Lazarev, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
V. G. Lebedev, Dr. Sci. (Tech.),
V. E. Lepskiy, D. Sc. (Phych.),
A. S. Mandel, Dr. Sci. (Tech.),
N. E. Maximova, Cand. Sci. (Tech),
Executive Editor-in-Chief,
R. V. Meshcheryakov, Dr. Sci. (Tech.),
A. I. Michalski, Dr. Sci. (Biol.),
D. A. Novikov, RAS Academician,
Editor-in-Chief,
F. F. Pashchenko, Dr. Sci. (Tech.),
Deputy Editor-in-Chief,
B. V. Pavlov, Dr. Sci. (Tech.),
L. B. Rapoport, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
S. V. Ratner, Dr. Sci. (Econ.),
E. Ya. Rubinovich, Dr. Sci. (Tech.),
A. D. Tsvirkun, Dr. Sci. (Tech.),
V. M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Tech.),
I. B. Yadykin, Dr. Sci. (Tech)

LEADERS OF REGIONAL BOARDS

Chelyabinsk – O. V. Loginovskiy, Dr. Sci. (Tech.),
Kursk – S. G. Emelyanov, Dr. Sci. (Tech.),
Lipetsk – A. K. Pogodaev, Dr. Sci. (Tech.),
Perm – V. Yu. Stolbov, Dr. Sci. (Tech.),
Rostov-on-Don – G. A. Ougolnitsky,
Dr. Sci. (Tech.),
Samara – M. I. Geraskin, Dr. Sci. (Econ.),
Saratov – V. A. Kushnikov, Dr. Sci. (Tech.),
Tambov – M. N. Krasnyanskiy, Dr. Sci. (Tech.),
Ufa – B. G. Ilyasov, Dr. Sci. (Tech.),
Vladivostok – O. V. Abramov, Dr. Sci. (Tech.),
Vologograd – A. A. Voronin, Dr. Sci. (Phys.-Math.),
Voronezh – S. A. Barkalov, Dr. Sci. (Tech.)

¹Russian Academy of Sciences.



CONTROL SCIENCES
Научно-технический
журнал

6 номеров в год
ISSN 1819-3161 (Print)
ISSN 2712-8687 (Online)
Издается с 2003 года

УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
академик РАН
Д.А. Новиков

Заместитель главного редактора
Ф.Ф. Пащенко

Ответственный секретарь
Н.Е. Максимова

Выпускающий редактор
Л.В. Петракова

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410

Тел./факс (495) 198-17-20, доб. 1410

E-mail: pu@ipu.ru

Интернет: <http://pu.mtas.ru>
<http://controlsciences.org>

Опубликовано: 10 декабря 2024 г.

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.
выдано Министерством Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых
коммуникаций

Свидетельство о регистрации
Эл № ФС 77-80482 от 17 февраля 2021 г.
выдано Федеральной службой
по надзору в сфере связи,
информационных технологий и
массовых коммуникаций

Журнал входит в RSCI на платформе
Web of Science и Перечень
рецензируемых научных изданий ВАК

Журнал включен в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ).
На сайте Научной электронной
библиотеки (www.elibrary.ru) доступны
полные тексты статей.

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

5.2024

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Авдеева З. К., Гребенюк Е. А., Коврига С. В. Анализ методов
среднесрочного прогнозирования процессов со структурными
сдвигами на финансовых и товарных рынках 3

Управление в социально-экономических системах

Дранко О. И., Резчиков А. Ф., Степановская И. А. и др.
Сценарное моделирование развития страны на основе
индикативного планирования 25

Петров И. В., Чхартишвили А. Г. Задача стимулирования
в рефлексивной игре с точечной структурой
информированности 42

Информационные технологии в управлении

Толок А. В., Толок Н. Б. Функционально-воксельное
моделирование алгоритма движения к цели на основе
 R -функций 49

Управление подвижными объектами и навигация

Потапов А. П., Рубинович Е. Я. Программная 3D-траектория
защитника в ADT-игре при неполной априорной информации
у цели 57

Заметки

**XXV Ясинская (Апрельская) международная научная
конференция по проблемам развития экономики и общества 64**



CONTROL SCIENCES
Scientific Technical
Journal

6 issues per year

ISSN 1819-3161 (Print)

ISSN 2712-8687 (Online)

Published since 2003

FOUNDER and PUBLISHER

V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences
of Russian Academy of Sciences

Editor-in-Chief

D.A. Novikov, RAS Academician

Deputy Editor-in-Chief

F.F. Pashchenko

Executive Editor-in-Chief

N.E. Maximova

Editor

L.V. Petrakova

Editorial address

65 Profsoyuznaya st., office 410,
Moscow 117997, Russia

☎ +7(495) 198-17-20, ext. 1410

✉ pu@ipu.ru

URL: <http://pu.mtas.ru>

<http://controlsciences.org>

Published: December 10, 2024

Registration certificate of

ПИ № ФС 77-49203 of 30 March 2012
issued by the Ministry of Press,
Broadcasting, and Mass Media
of the Russian Federation

Registration certificate of

Эл № ФС 77-80482 of 17 February 2021
issued by the Federal Service
for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media

The Journal is indexed in RSCI (Russian
Science Citation Index) on the platform
Web of Science and in the list of peer-
reviewed scientific publications of HAC

On the website of the Scientific electronic
library (www.elibrary.ru) full texts of
articles are available

© V.A. Trapeznikov

Institute of Control Sciences

of Russian Academy of Sciences

CONTROL SCIENCES

5.2024

CONTENTS

Surveys

Avdeeva, Z. K., Grebenyuk, E. A., and Kovriga, S. V.

Analysis of Medium-Term Forecasting Methods for Processes

with Structural Shifts in Financial and Commodity Markets 3

Control in Social and Economic Systems

Dranko, O. I., Rezhnikov, A. F., Stepanovskaya, I. A., et al.

Scenario Modeling of Economic Growth Based on

Indicative Planning 25

Petrov, I. V. and Chkhartishvili, A. G. The Incentive-Targeting

Problem in a Reflexive Game with a Point-Type

Awareness Structure 42

Information Technology in Control

Tolok, A. V. and Tolok, N. B. Functional Voxel Modeling

of a Path Planning Algorithm to a Target Based on *R*-Functions 49

Control of Moving Objects and Navigation

Potapov, A. P. and Rubinovich, E. Ya. Building a Defender's

3D Program Path in an ADT Game with Incomplete A Priori

Target Information 57

Notes

25th Yasin (April) International Academic Conference

on Economic and Social Development 64

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СО СТРУКТУРНЫМИ СДВИГАМИ НА ФИНАНСОВЫХ И ТОВАРНЫХ РЫНКАХ[#]

З. К. Авдеева*, Е. А. Гребенюк**, С. В. Коврига***

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

*✉ avdeeva@ipu.ru, **✉ lngrebenuk12@yandex.ru, ***✉ kovriga@ipu.ru

Аннотация. Рассматриваются методы формирования среднесрочного прогноза цен на финансовых и товарных рынках. Прогнозируемые процессы являются нестационарными, нелинейными, в них присутствуют структурные сдвиги, возникающие вследствие системных изменений в структуре рынка и оказывающих воздействие на него экстремальных событий. С увеличением горизонта прогноза вероятность возникновения структурных сдвигов возрастает, поэтому возникает задача прогнозирования с учетом возможных изменений в процессе на горизонте прогноза. Для прогнозирования будущих изменений рассматриваемого процесса необходимо расширение информационного поля, на котором формируется прогноз: включение экспертных суждений, результатов качественного анализа процессов, например, с применением методов фундаментального анализа, когнитивного анализа и алгоритмов их реализации. Построение среднесрочных прогнозов цен на финансовых и товарных рынках является необходимым элементом в решении задач планирования и управления социально-экономическими и производственными системами, а также в решении задач инвестиционного управления. В настоящем обзоре рассмотрены особенности прогнозируемых процессов, определяющие требования к методам формирования среднесрочных прогнозов, их реализации и отбору включаемой в прогноз информации, необходимой для обнаружения будущих изменений в процессе и причинных факторов их возникновения. Рассмотрены модели и методы статистического прогнозирования, искусственного интеллекта и фрактального анализа, а также методы, использующие в алгоритме прогнозирования информацию из различных источников: экспертных, новостных, данных поисковых систем. Проведено обобщение результатов обзора в контексте решения задачи среднесрочного прогнозирования. В заключении обозначены перспективные, по мнению авторов, направления исследований в этой области.

Ключевые слова: товарные и финансовые рынки, временные ряды, структурные сдвиги, среднесрочное прогнозирование.

ВВЕДЕНИЕ

Среднесрочные прогнозы цен на финансовых и товарных рынках играют важную роль не только в стратегическом планировании развития мировой и региональной экономики, но и в управлении разви-

тием сложных систем междисциплинарной природы (социально-экономических, экономико-технических и др.).

Задача формирования прогнозов рыночных цен на один-два года вперед представляет собой одну из важных практических задач среднесрочного прогнозирования. Формирование прогнозов цен на сырье, комплектующие, продовольственные товары на один-два года вперед с помесечным разби-

[#] Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-21-00455).

нием является необходимым элементом планирования закупок и управления запасами предприятия, а повышение точности прогноза имеет решающее значение для снижения издержек. Другой задачей, необходимым элементом которой является среднесрочное прогнозирование цен, является задача стратегического планирования развития социально-экономических систем, в частности конъюнктурное прогнозирование рынка при планировании и управлении внешнеэкономической деятельностью [1] и инвестиционное управление.

Современный финансовый и товарный рынки представляют собой сложную систему. С начала 2000-х гг. произошли глубокие изменения в механизмах ценообразования, финансовые рынки стали влиять на формирование мировых цен на сырье. Результат финансиализации – резкое усложнение причинно-следственных связей, формирующих мировые цены на сырье. Кроме обычных фундаментальных факторов (запасы, спрос, производство, технологии, геополитические риски, цикличность) одновременно действуют финансовые факторы (инфляция, валютные курсы, спрос и предложение на финансовых рынках, их корреляция, микроструктура и т. п.) [2].

Необходимо отметить, что несмотря на большое количество цифровых данных, характеризующих все перечисленные факторы, нужного их объема и качества недостаточно для решения задач среднесрочного и долгосрочного прогнозирования. Для оценки долгосрочной перспективы в основном используются экспертные и сценарные прогнозы, хотя некоторые эмпирические исследования оспаривают ценность рекомендаций экспертов и качественных прогнозов [3], в особенности когда речь идет о более длинных горизонтах.

На фоне широкого освещения в литературе методов прогнозирования ближайшего будущего наблюдается возрастающее внимание к решению задач построения среднесрочных прогнозов. В отдельных публикациях для решения этой задачи применяются методы краткосрочного прогнозирования; предлагаются разные подходы для снижения неопределенности в условиях возможного возникновения структурных сдвигов на горизонте прогноза. Однако сохраняется актуальность исследовательской проблемы: что делать, если среднесрочные прогнозы становятся ненадежными через определенное время, когда на горизонте прогноза происходят изменения?

Стоит отметить, что задачи среднесрочного прогнозирования, помимо области финансовых и

товарных рынков, ставятся в таких областях, как прогнозирование сетевого и дорожного трафика, энергопотребления, погоды (силы ветра, солнечной активности), распространения заболеваний (см., например, работу [4]). В этих областях при построении среднесрочных прогнозов в основном стоит проблема учета связанных процессов и несистемных параметров, однако сами процессы обозримы и поддаются структуризации. В отличие от них цены на финансовых и товарных рынках подвержены влиянию многих неоднородных параметров, но самое главное – событий, что обязывает учитывать в модели прогнозирования несистемные изменения в процессах, начиная от изменений на связанных рынках и заканчивая новостным фоном, т. е. рассматриваемые процессы в большей степени не структурированы.

Выбор метода прогнозирования зависит от ряда факторов: свойств прогнозируемого ряда (случайное блуждание или фрактальный процесс); регулярности решения задачи (одноразовый или повторяющийся процесс); формы представления прогноза (конкретное значение, конкретное значение и/или интервал, направление тренда – восходящий, нисходящий, направление тренда и оценка его продолжительности); длины горизонта прогноза; типа информации и данных о прогнозируемом процессе, их доступности и полноте; требований к точности прогноза.

Среди методов прогнозирования выделяются методы, которые опираются на количественные временные данные, характеризующие прогнозируемый процесс, на качественные временные данные поисковых систем, новостных лент, характеризующие интенсивность, тональность информации, связанной с тематикой прогнозируемого процесса, и на экспертную информацию.

До применения на финансовых и товарных рынках глубокого обучения широко распространены были линейные гауссовские модели, которые используют окно текущей информации для прогнозирования следующего временного шага: интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего – (англ. *autoregressive integrated moving average*, ARIMA), векторные модели авторегрессии – VAR (*vector autoregression*) и VECM (*vector error correction model*). Для описания кластеризации волатильности, отклонений распределения доходностей от нормального распределения были предложены нелинейные условно гауссовские модели: ARCH (*autoregressive conditional heteroscedasticity*), GARCH (*generalized autoregressive*



conditional heteroskedasticity), FIGARCH (*fractionally integrated generalized autoregressive conditional heteroskedasticity*) и др.

В последние годы для анализа и прогнозирования наряду со статистическими моделями активно применяются методы искусственного интеллекта (ИИ) – машинного обучения, глубокого обучения и гибридные модели, сочетающие в себе комбинации различных подходов к решению задачи прогнозирования. Методы машинного обучения, такие как метод случайного леса, метод опорных векторов (англ. *support vector machine*, SVM), метод *k* ближайших соседей, логистический регрессионный анализ и пр., применяются для решения задачи прогноза и, в отличие от линейных моделей, могут хорошо справляться с нелинейностями. Однако они функционируют в рамках общей модели прогнозирования, решающей задачу обучения: например, минимизации ошибки прогноза, сокращения времени обучения или объема вычислений и т. п. Методы глубокого обучения позволяют уменьшить допустимые предположения о модели и улучшать решения путем извлечения необходимой информации из данных. В настоящее время для прогнозирования процессов на финансовых и товарных рынках широко используются нейросетевые модели глубокого обучения, их высокая способность к обучению позволяет расширить состав и объем информации об изменениях в прогнозируемом процессе и извлекать важные характеристики из данных при прогнозировании колебаний и тенденций рынка. В последние годы усиливается тенденция к созданию гибридных моделей глубокого обучения, которые сочетают статистические компоненты и компоненты глубокого обучения, используя преимущества обоих направлений.

Помимо количественных методов при построении прогноза применяют экспертные методы: сетевые модели представления знаний об объекте прогнозирования и связанных с ними факторах, событиях, объясняющих переменных; байесовские сети, сети убеждений; методы, основанные на суждениях (*judgement forecasting methods*), когда эксперты указывают конкретное значение, либо «вероятность» какого-то значения на горизонте [5].

Для повышения эффективности среднесрочных прогнозов актуально расширение информационного поля, на котором формируется прогноз: включение результатов фундаментального и когнитивного анализа, оценок влияния системных изменений на рынке, эффектов воздействия внешних событий, экспертных суждений, качественных факторов влияния на процесс в среднесрочной пер-

спективе, формируемых с использованием текстовой информации.

Для расширения информационного поля путем увеличения объема и улучшения качества обработки входной информации при прогнозировании применяются ансамблевые и гибридные модели. К первым относятся модели, результатом применения которых является прогноз, полученный из прогнозов, сформированных моделями ансамбля. Гибридные модели объединяют различные этапы построения прогноза, каждый из которых может быть выполнен различными методами: наряду со статистическими применяют интеллектуальные вычислительные методы, такие как искусственные нейронные сети, нечеткую логику, генетические алгоритмы и другие эволюционные методы для прогнозирования на финансовых и товарных рынках [6–8] и т. д.

В настоящем обзоре предпринята попытка анализа подходов к построению прогнозов цен с помесячным разбиением, которые были бы полезны в задачах прогнозирования как в пределах года, так и на один-два года вперед. В контексте повышения точности прогнозов в обзоре рассматривается современное состояние моделей, методов и алгоритмов, применимых для формирования среднесрочных прогнозов процессов со структурными сдвигами, включая методы расширения информационного поля как с помощью расширения набора временных рядов, так и путем включения экспертной информации и результатов работы систем обработки и структуризации информации.

В разделе § 1 описываются особенности объектов прогнозирования на товарных и финансовых рынках, которые определяют требования к прогнозу и методам его реализации. В § 2 приведена общая характеристика применяемого для решения задач прогнозирования аппарата моделирования и рассмотрены различные модели и методы анализа и прогноза цен на товарных и финансовых рынках: статистические методы, методы глубокого обучения, гибридные модели и методы фрактального анализа. В § 3 рассматриваются методы, направленные на расширение информационного поля путем использования количественной и качественной информации, извлеченной из внешних источников и включаемой в математические прогнозы: использование данных поисковых систем, анализ влияния внешних событий, применение экспертной информации. В § 4 представлено обобщение результатов проведенного обзора, в заключении обозначены некоторые перспективные направления развития методов построения среднесрочного прогноза для решения рассмотренных задач.

1. ОСОБЕННОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ СДВИГОВ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Объект прогнозирования описывается нестационарным временным рядом или группой временных рядов, динамика которых может изменяться вследствие влияния экзогенных (кризисов, природных катаклизмов, войн и т. п.) и эндогенных факторов (взаимозависимости рынков, отраслевых и макрофинансовых воздействий [9], изменений рыночной цены на конкретный продукт из-за удорожания транспортировки, разорения или изменения состава поставщиков, возникновения сильного конкурента и пр.).

Каждая из компонент прогнозируемого объекта в момент времени t зависит от:

- своих прошлых значений;
- прошлых значений других компонент процесса;
- прошлых значений других процессов, имеющих причинно-следственные связи с прогнозируемым;
- экстремальных событий, происходящих во внешней среде (важные правительственные решения, кризисы, эпидемии, войны, техногенные и природные катаклизмы);
- экзогенных и эндогенных факторов, влияющих на процесс, которые могут проявляться изменениями динамики процесса или быть выявленными по результатам обработки и анализа экспертной информации.

Факторы влияния на процесс могут быть описаны:

- временными рядами макропоказателей, курсов мировых валют, мировых цен на нефть и на товары ведущих отраслей промышленности, на транспортировку, электричество и пр.;
- сигналами различного вида, полученными в результате структурирования экспертных знаний о состоянии и направлении влияния факторов на текущее состояние среды и объекта.

Результатом воздействия факторов влияния на рынок являются структурные сдвиги, причинами возникновения которых могут служить [9–11]:

- изменения динамики ВВП и других макроэкономических показателей, таких как инфляция, ключевая процентная ставка Центрального банка, уровень занятости и оплаты труда;
- спекуляции, изменения в предпочтениях инвесторов, эпизодические события (катастрофы, пандемии, войны и пр.);

– изменения в спросе и предложении на ключевые сырьевые и продовольственные товары: нефть, газ, цветные металлы, пшеницу, сахар;

– образование новых секторов рынка.

Финансовый и товарный рынки связаны между собой причем, начиная с 2000 г. наблюдается повышение корреляции между ними, рост интереса финансовых инвесторов к товарному рынку, расширение возможностей диверсификации портфелей путем размещения в них продуктов различных рынков [12, 13]. В работе [14] исследован характер временных связей между товарным и финансовым рынками во время финансиализации товарных рынков и после кризиса 2008 г. Отмечается, что интерес финансовых инвесторов к товарным рынкам растет, их участие осуществляется посредством прямых или косвенных инвестиций в товарные фьючерсы, а увеличение корреляции между рынками не связано с финансовым кризисом.

Особенности современных финансового и товарного рынков – глобализация, совершенствование цифровых технологий, сокращение государственного регулирования индустрии финансовых услуг, важность продуктовых инноваций и пр. – приводят к существенным изменениям их динамики и вызывают необходимость усовершенствования моделей прогнозирования.

Для выявления и анализа факторов влияния на прогнозируемый объект, оценки их направления и силы воздействия применяются различные методы:

- Фундаментальный анализ, позволяющий выявить причинно-следственные связи макроэкономических показателей и индикаторов состояния рынка с прогнозируемым показателем, а также оценить финансовое состояние компаний, чьи товары или финансовые инструменты присутствуют на рынке. Фундаментальный анализ исследует экономические факторы, которые могут влиять на движение рынка, поэтому его результаты являются полезными для среднесрочного прогнозирования.

- Построение и анализ (сценарное моделирование) нечетких когнитивных карт (НКК) ситуации¹ [16, 17], направленных:

¹ Термин «нечеткая когнитивная карта» (предложен Б. Коско [15]) общепринят в зарубежных публикациях, связанных с исследованием динамических систем в контексте мягких вычислений. НКК представляют собой графовую структуру отображения причинно-следственных рассуждений, где нечеткость обусловлена размытой (неоднозначной) степенью причинности (силой влияния) между размытыми причинными концептами (факторами) [15]. В отечественных публикациях большее распространение получил термин «когнитивная карта», по смыслу он не отличается. В данном обзоре с учетом смысла этого понятия используется НКК независимо от того, какой термин используется в цитируемых публикациях.



– на систематизацию и агрегирование экспертных знаний о контролируемом объекте и его внешней среде, отражающих причинно-следственные связи значимых факторов влияния на объект, на основе структуризации и формализации экспертных знаний и информации из разнородных источников (в частности, с использованием результатов фундаментального анализа);

– на организацию направленного поиска наборов данных при мониторинге разнородных источников информации.

Сложность задачи прогнозирования заключается в наличии в процессах, протекающих на рассматриваемых рынках, структурных сдвигов (скачков уровня или волатильности, изменения трендов, характера взаимодействия между объектом прогнозирования и другими процессами, возникающими на финансовых и товарных рынках под воздействием экзогенных и эндогенных факторов). Структурные сдвиги прогнозируемого показателя изменяют его динамику и увеличивают ошибку прогноза, которая также может служить сигналом об изменении и/или о необходимости коррекции модели прогнозирования вследствие изменения силы и направленности воздействий факторов, влияющих на рынок. Поэтому при формировании прогноза и на его горизонте необходимо учитывать не только изменения значений прогнозируемого показателя, но и изменения влияющих на него факторов. Примерами таких факторов могут служить внешние регулярные и экстремальные события, изменения в структуре рынка, настроениях инвесторов, характере взаимодействия между спросом и предложением.

Наличие указанных изменений в прогнозируемом процессе создает проблемы в применении традиционных гауссовских моделей временного ряда: (ARIMA, VAR, VECM), которые предназначены для описания линейных процессов. Построение таких моделей без учета возникающих в процессе структурных сдвигов, как показали результаты анализа, приводит к ошибкам и ухудшению качества прогнозов. Дж. Сток и М. Ватсон по результатам исследования 76-ти месячных временных рядов в США обнаружили нестабильность параметров в значительной части своих моделей [18]. Эти исследования положили начало разработке методов прогнозирования, учитывающих изменения свойств рассматриваемого процесса.

Помимо стандартных шагов построения модели прогноза возникает необходимость включения в процесс прогнозирования алгоритмов мониторинга обнаружения структурных изменений в рассматриваемом процессе [19, 20] и – в отдельных случаях – прогнозирования таких изменений.

В силу специфики применения результатов среднесрочного прогнозирования в процессах текущего планирования и управления в большинстве задач конечной целью является формирование прогнозов с помесечным или поквартальным разбиением, что вызывает необходимость построения многошаговых прогнозов.

2. АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СРЕДНЕСРОЧНОМУ ПРОГНОЗИРОВАНИЮ

В ходе обзора была собрана выборка публикаций по методам анализа процессов на товарных и финансовых рынках и методам построения среднесрочных прогнозов, в которую попали около 200 работ, опубликованных за последние 20 лет, когда начался бум применения методов анализа накопленных данных. Среди них нет работ, полностью удовлетворяющих всем требованиям, предъявляемым к процедуре среднесрочного прогнозирования нестационарных процессов со структурными сдвигами на горизонте прогноза, поэтому акцент был сделан на освещение отдельных моделей, методов и алгоритмов, повышающих точность прогноза или решающих отдельные задачи для улучшения процедуры прогнозирования. Помимо этого авторы сочли необходимым включить результаты более давнего периода, в которых предложены актуальные методы решения отдельных задач. В конечном итоге целью исследования стал выбор полезных и прошедших проверку моделей, методов и алгоритмов решения задачи среднесрочного прогнозирования нестационарных процессов со структурными сдвигами с указанием условий их применения.

2.1. Общая характеристика применяемого аппарата моделирования для решения задач прогнозирования: исторический экскурс

Как было отмечено в разделе § 1, процессы на финансовых и товарных рынках являются нестационарными вследствие внутрисистемных изменений или под влиянием внешних событий; как в исторических данных, так и на горизонте прогноза в них наблюдаются структурные сдвиги. При формировании среднесрочного прогноза необходимо учитывать возможные изменения свойств процесса на горизонте, использовать мониторинг и механизмы коррекции.

История развития статистических моделей, применяемых для решения задач одношагового

прогнозирования, насчитывает более 50 лет. На рисунке представлена история развития моделей и методов прогнозирования временных рядов. В основе таких моделей лежит развитие классических моделей применительно к процессам, представленным нестационарными временными рядами.

Для нестационарных процессов в 1970-х гг. были предложены статистические одномерные и многомерные модели, такие как интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего (ARIMA) и модель коррекции ошибок (англ. *error correction model*, ECM). После были предложены авторегрессионная модель с условной гетероскедастичностью (ARCH) и обобщенная (GARCH), модель векторной авторегрессии (VAR) и векторная модель коррекции ошибок (VECM).

В соответствии с гипотезой эффективного рынка (англ. *Efficient Market Hypothesis*, EMH), предполагающей, что цены описываются как случайные процессы с гауссовским распределением, вся информация содержится в данных и доступна инвесторам, никаких внезапных событий и происходить не должно, рынок устойчив. Резкие изменения свойств процесса под воздействием крупных

событий, возникновение кризисов и структурных сдвигов *не согласуются* с EMH. Анализ процессов на финансовых рынках, проведенный Э. Петерсом и Б. Мандельбротом в конце прошлого века [21, 22], показал наличие существенных отклонений значительной части реальных рядов цен от EMH. Э. Петерсом была предложена гипотеза фрактального рынка (англ. *Fractal Market Hypothesis*, FMH), в соответствии с которой большинство процессов на финансовых и товарных рынках обладает нелинейной динамикой и самоподобием. Временной ряд обладает фрактальными свойствами, если в целом он имеет ту же структуру, что и отдельные его части. В 1980-х гг. для моделирования процессов с фрактальными свойствами была предложена модель ARFIMA (*autoregressive fractionally integrated moving average*).

Модели прогнозирования нестационарных процессов, предложенные в 1970–1990-х гг., составили основу для решения задачи среднесрочного прогнозирования нестационарных процессов в условиях структурных сдвигов. Тем не менее проблема ухудшения качества прогноза была актуальна.





Наличие структурных сдвигов в процессе на исторических периодах наблюдения не только затрудняло решение задач прогнозирования, но и представляло собой проблему при определении типа нестационарности процесса и идентификации коинтеграционных связей.

В 1990-х гг. П. Перрон [23] показал, что из-за структурных сдвигов стандартные тесты определения типа нестационарного процесса (со стохастическим трендом или с детерминированным трендом) [24] приводят к ошибкам и, как следствие, к ошибочным моделям, и предложил процедуру, позволяющую определить тип нестационарности процесса при известной дате изменения тренда и/или скачка. Поскольку дата возникновения структурного сдвига известна далеко не всегда, то для его идентификации необходимы алгоритмы, включающие определение момента его возникновения. Задачам обнаружения структурных сдвигов, определения их характера и «предвестников» современные исследователи уделяют большое внимание. Необходимость построения процедур определения типа нестационарности ряда в условиях возникновения структурных сдвигов усложняет процесс прогнозирования [25]. В настоящий момент разработано большое число алгоритмов, определяющих наличие структурных сдвигов с известной или неизвестной датой их возникновения, и тестов для определения типа процесса [26–28].

При построении VAR-моделей нестационарных процессов по разностям (преобразование, которое выполняется для приведения процесса к стационарному) теряется значительная часть информации. Если между рядами существует коинтеграция, то для этих рядов строят более эффективные VECM-модели, учитывающие долгосрочные соотношения между фактическими значениями ряда, поэтому проверка наличия коинтеграции является важным этапом выбора и построения модели. В 1980–1990-х гг. ведущие ученые в области прикладной статистики, К. Гренджер и С. Йохансен, в своих исследованиях показали, что при наличии структурных сдвигов стандартные тесты на коинтеграцию [29, 30] не дают правильных результатов. Современные подходы к решению этой проблемы описаны в работе [31].

Для формирования среднесрочного прогноза на один-два года вперед с помесечным разбиением используется многошаговый прогноз. Широко известны три подхода к решению этой сложной проблемы: рекурсивный, основанный на повторном применении одношаговой модели; прямой, осно-

ванный на построении набора моделей в разных масштабах; с одним входом и с несколькими выходами. Последний является модификацией подхода с несколькими входами и несколькими выходами, представленного в работе [32], где автор предложил использовать для прогнозирования на несколько шагов вперед векторную модель, в которой прогнозируемое значение является не скалярной величиной, а вектором будущих значений временного ряда. Этот подход заменяет набор моделей прямого подхода одной моделью с несколькими выходными данными с целью сохранения среди прогнозируемых значений стохастической зависимости, характеризующей временной ряд. Более подробно особенности стратегий многошагового прогнозирования представлены в п. 2.2.

В последние годы можно найти результаты исследований, посвященных решению задачи прогнозирования цен на товарных и финансовых рынках, которые опираются на обширную эмпирическую проверку, так как собраны большие объемы данных за длительный период наблюдения. Современные исследователи используют как перечисленные базовые статистические модели, применяя разные стратегии адаптации к изменениям, так и демонстрируют использование гибридных алгоритмов, в том числе с применением методов искусственного интеллекта.

Далее более подробно приведем результаты анализа современных исследований применительно к задаче формирования среднесрочного прогноза на товарных и финансовых рынках в условиях структурных сдвигов.

2.2. Статистические методы

В соответствии с гипотезой эффективного рынка приращения цен являются независимыми и подчиняются гауссовскому распределению. Однако большое число проведенных исследований не подтверждает эти предположения. Долгое время применение статистических моделей типа ARIMA, ECM, VAR, VECM, ARCH, GARCH и их модификаций для прогнозирования цен и волатильности было широко распространенным подходом. Однако на современном рынке в силу нестационарности, наличия структурных сдвигов и нелинейностей в процессах применение этих моделей не приводит к получению прогнозов необходимого качества.

Идея комбинированных подходов, впервые реализованная в работе [33], является эффективной, поскольку позволяет рассматривать прогнозируе-

мый процесс со всех сторон, расширяя его информационное поле. В статье [33] было показано, что комбинация прогнозов может дать меньшую среднеквадратичную ошибку, чем любой из отдельных прогнозов, составляющих комбинацию.

При формировании ансамбля есть возможность учесть большее число факторов, влияющих на процесс формирования прогноза, и уменьшить неопределенность в отношении данных и формы модели благодаря тому, что включенные в него прогнозы могут содержать частично дублирующуюся, но не полностью совпадающую информацию [34]. Комбинации прогнозов стали главными победителями в конкурсе M4 [35], который проводится в целях сравнения различных методов прогнозирования.

В работе [36] по результатам конкурсных экспериментов был проведен анализ причин успеха наиболее эффективных комбинаций, среди которых названы разнообразие прогнозов комбинации и выигрышная стратегия формирования комбинации. Разнообразие в прогнозах может быть достигнуто путем использования переменных из разных источников, (например, временной ряд, экономические показатели и данные финансовой отчетности компании), объединения прогнозов в разных временных масштабах, использования разных моделей на одних и тех же данных. Выигрышная стратегия формирования комбинации должна включать разнообразные и сопоставимые по эффективности прогнозы. В обзоре современных публикаций по комбинациям прогнозов [37] было отмечено, что из всех опубликованных прогнозных статей, включенных в базу Web of Science, доля статей, касающихся комбинаций прогнозов, за последние 50 лет возросла и достигла 13,8 % в 2021 г. Следует отметить, что наряду с возрастающей сложностью объектов прогнозирования изменяются схемы комбинирования из-за включения алгоритмов, выполняющих различные функции, учитывающие нелинейности в объектах, корреляции между компонентами и перекрестное обучение. Алгоритмы, входящие в состав комбинированного прогноза, могут различаться по составу информации, которая используется для его построения, способам ее обработки и результатам.

В конце прошлого века при формировании прогнозов в условиях изменения свойств прогнозируемых рядов все большую популярность стали приобретать байесовские модели усреднения (англ. *Bayesian model averaging*, BMA) [38]. Для построения прогноза по BMA строятся N возможных моделей, которые различаются между собой составом

включенных в них предикторов. Прогноз на шаге t рассчитывается как средневзвешенное значение прогнозов каждой модели с весами, пропорциональными вероятности правильного предсказания для нее на момент прогнозирования; состав и структура моделей не изменяются.

Байесовский подход был успешно применен для прогнозирования макроэкономических показателей при наличии структурных сдвигов. В работе [39] байесовские методы обучения и сравнения моделей применяются для вычисления прогностической плотности вероятности того, что разрыв произойдет до следующего наблюдения; в работе [40] была предложена байесовская процедура, которая оценивает возможность появления новых разрывов на прогнозируемом горизонте с учетом продолжительности прошлых разрывов и использованием модели скрытой марковской цепи.

В зависимости от свойств рассматриваемого процесса при использовании статистических моделей для улучшения качества прогноза применяют различные способы адаптации к изменениям в рассматриваемом процессе: интеграцию линейных моделей и экспертной информации [41], использование скользящих окон, скользящей регрессии и экспоненциально взвешенного скользящего среднего [42, 43], формирование комбинированных прогнозов в скользящем окне [44], построение адаптивных моделей, изменяющих свои параметры при изменении свойств прогнозируемого ряда цен [42, 45]. Однако такие модели неспособны обеспечить необходимую точность прогноза при наличии нелинейностей в динамике объекта и структурных сдвигов на горизонте прогноза.

Модель динамического усреднения (англ. *dynamic model averaging*, DMA) исходит из того, что свойства прогнозируемого процесса точно неизвестны и изменяются во времени. В ней каждая из исходных моделей объединяется с моделью цепи Маркова для получения корректной модели. Это позволяет «корректной» модели изменяться с течением времени. В качестве частного случая, когда модель и параметры не меняются, DMA представляет собой рекурсивную реализацию BMA (стандартного усреднения байесовской модели). Модель DMA, впервые предложенная в работе [46], активно используется для прогнозирования [47, 48], ее первое применение для решения эконометрических задач было приведено в статье [49]. В публикации [48] при прогнозировании цен на золото было отмечено, что модели DMA превосходят по качеству прогнозирования линейные статистические модели и байесовские BMA.



Далее рассмотрим подробнее алгоритмы многошаговых прогнозов, использующие статистические модели. Упомянутая в п. 2.1 рекурсивная стратегия имеет низкую точность, поскольку ошибки предсказаний накапливаются из-за увеличения доли прогнозов во входных данных, а прямая стратегия имеет высокую дисперсию ошибок прогноза при увеличении масштабов данных. Предложенный в работе [50] алгоритм, объединяющий обе стратегии, улучшает качество прогноза: уменьшает величину смещения рекурсивной стратегии и дисперсию прямой.

Мотивация стратегии множественных выходов заключается в сохранении стохастической зависимости, которая характеризует временные ряды между прогнозируемыми значениями. Кроме того, эта стратегия прогнозирования позволяет избежать предположения об условной независимости, принятого в прямой стратегии, и накопления ошибок в рекурсивной многошаговой стратегии прогнозирования. Проведенные в работе [51] экспериментальные исследования показали, что подходы с несколькими выходами представляют собой конкурентный выбор для решения задач долгосрочного прогнозирования.

Тем не менее, основным недостатком этой стратегии является тот факт, что одна модель должна сохранять стохастические зависимости и прогнозировать все значения горизонта прогноза одновременно, что обычно приводит к низкой эффективности [52].

Выводы. Сильные стороны традиционных статистических методов заключаются в их интерпретируемости и прочной теоретической основе. Они позволяют получить представление о закономерностях, лежащих в основе экономических переменных, что упрощает процесс принятия решений. Однако эти методы могут оказаться неэффективными при наличии нелинейностей, изменений или отклонений от исходных моделей, часто встречающихся в рассматриваемых процессах.

2.3. Методы глубокого обучения

Методы прогнозирования финансовых временных рядов уже более 40 лет пользуются большой популярностью среди исследователей в области машинного обучения. На сегодняшний день наряду с классическими методами машинного обучения (англ. *machine learning*, ML) в моделях прогнозирования широко используются глубокие нейронные сети. Применение глубокого обучения (англ. *deep learning*, DL) в алгоритмах прогнозиро-

вания позволяет увеличить объемы входной информации, необходимой для расширения горизонтов прогноза, избежать переобучения и увеличения ошибки обучения сети с ростом числа слоев. По результатам публикаций, приведенным в обзорных статьях [53, 54], подавляющее большинство исследований показало, что применение DL в моделях прогнозирования улучшает качество краткосрочных прогнозов.

За последние несколько лет разработаны различные типы моделей DL: глубокий многослойный персептрон (англ. *deep multi-layer perceptron*, DMLP), сверточные нейронные сети (англ. *convolutional neural networks*, CNN), рекуррентные нейронные сети (англ. *recurrent neural network*, RNN), их разновидность – рекуррентные сети с долговременной краткосрочной памятью (англ. *long short-term memory*, LSTM), и др. Структура LSTM организована таким образом, что сеть может добавлять или удалять информацию, гарантированно сохраняя только актуальную и удаляя ненужную. Для достижения этой цели в LSTM используются три важные структуры «ворот»: ворота забвения, ворота ввода и ворота вывода. Эти элементы управления определяют, от какой информации следует отказаться, какая информация должна храниться в состоянии ячейки и какая информация должна отображаться в выходных данных. При прогнозировании финансового рынка LSTM может автоматически обучаться и адаптироваться к нелинейным условиям и сложному поведению рынка в будущем, тем самым повышая точность и достоверность прогноза [55]. Изучая временные зависимости и параметры волатильности данных, LSTM может фиксировать долгосрочные тенденции рыночных индексов и цен на акции и товары, а также выявлять краткосрочные колебания и неожиданные события и реагировать на них. Нейронные сети глубокого обучения и гибридные модели, представляющие собой комбинации алгоритмов DL с другими методами, доминируют в области прогнозирования финансовых временных рядов.

Высокая способность нейронных сетей к обучению позволяет расширить состав и объем информации об изменениях в прогнозируемом процессе и извлекать важные характеристики из данных при прогнозировании колебаний и тенденций финансового рынка. К проблемам их применения относятся: необходимость наличия большого объема данных для обучения, длительность процесса обучения при работе с большими массивами данных, потребность в высокопроизводительных вычислительных ресурсах.

Задача построения прогноза временных рядов традиционно рассматривается как проблема регрессии. Однако внимание значительного числа исследователей финансовых и товарных рынков сосредоточено на прогнозировании направления изменения трендов, при котором задача ставится как задача классификации. Более половины существующих реализаций алгоритмов DL сосредоточены в этой области.

Рассмотрим применение DL для построения среднесрочных прогнозов. Исследования, посвященные применению методов DL к задаче среднесрочного прогнозирования, в настоящее время составляют очень небольшой процент от предлагаемых краткосрочных прогнозов. Одна из причин – это сложность задачи, другая – отсутствие структурированной информации о факторах влияния на рынок и на прогнозируемый процесс. В работе [56] отмечается, что в долгосрочной перспективе информативность краткосрочных прогнозов аналитиков улучшилась, в то время как информативность их долгосрочных прогнозов снизилась. Этот факт объясняется доступностью альтернативных данных о рынках в отношении краткосрочных результатов в будущем, что побуждает прогнозистов переключать свое внимание с долгосрочных прогнозов на краткосрочные.

В рассматриваемых ниже работах горизонт прогноза составляет один месяц. В работе [57] в рамках разработки алгоритма формирования инвестиционного портфеля было проведено сравнительное исследование результатов применения моделей рекуррентных нейронных сетей (RNN), включающих модель с длительной кратковременной памятью (LSTM) и управляемый рекуррентный модуль для выбора наилучшего предиктора при построении портфеля. Результаты экспериментов, проведенных на наборе из десяти акций США, показали, что модель прогнозирования, основанная на LSTM, превосходит остальные по коэффициенту совпадения прогнозов на один месяц вперед.

В статье [58] предложена модель сверточной нейронной сети (CNN) для прогнозирования месячных и недельных ценовых трендов. Полученная точность прогнозирования составила 65 % для месячных ценовых трендов и 60 % для недельных ценовых трендов.

Выводы. Применение алгоритмов глубокого обучения позволяет выявлять закономерности в динамике прогнозируемого процесса по историческим данным временных рядов и альтернативным данным о факторах влияния на рынок и на прогнозируемый процесс. Однако проблемы формирования среднесрочных прогнозов связаны с низкой

информативностью среднесрочных альтернативных данных, что подтверждается результатами [56]. Обработка данных, содержащих информацию о результатах развития процесса на сроки, сопоставимые с горизонтом прогнозирования, и введение их в прогноз должно сделать среднесрочные прогнозы более информативными.

2.4. Гибридные модели

Гибридные модели объединяют модели различных видов: статистические, машинного обучения, глубокого обучения и пр. Каждый включенный алгоритм выполняет определенную функцию, управляющий алгоритм организует их взаимодействие и формирование решения – прогноз. В статье [59] предлагается алгоритм прогнозирования цен закрытия четырех биржевых индексов: SP500, NIKKEI 225, AORD, CSI300 на 30, 60, 100 и 200 биржевых дней. Разработана гибридная модель, которая сочетает метод ансамблевой эмпирической модельной декомпозиции (англ. *ensemble empirical mode decomposition*, EEMD) – разложение исходного ряда по эмпирическим модам, интегрированную модель авторегрессии – скользящего среднего (ARIMA) и модель разложения нелинейной функции в ряд Тейлора с использованием дифференциатора отслеживания (англ. *Taylor expansion forecasting*, TEF) (впервые применен в работе [60]) для прогнозирования финансовых временных рядов. Исходный временной ряд разбивается с помощью EEMD на ансамбль подмножеств, каждое из которых содержит совокупность функций (рядов), соответствующих определенному режиму осцилляций. На подмножествах линейные ряды прогнозируются с помощью линейной модели ARIMA, нелинейные – с помощью нелинейной модели TEF. Результаты прогноза линейной и нелинейной моделей объединяются в результат прогноза на каждом подмножестве. Окончательный результат прогнозирования получается путем объединения прогнозов всех подмножеств. Эмпирические результаты с использованием реальных финансовых временных рядов демонстрируют, что этот новый гибридный подход позволяет улучшить результаты стандартных гибридных моделей, рассмотренных в работах [60, 61].

В статье [62] для прогнозирования сложных временных рядов с высокой волатильностью и неравномерностью предложена парадигма «декомпозиции и ансамбля», объединяющая ансамблевую эмпирическую модальную декомпозицию (EEMD) и машину экстремального обучения (англ. *extreme learning machine*, ELM). Основная цель концепции «декомпозиции и ансамбля» состоит в том, чтобы



разделить исходную сложную задачу прогнозирования на несколько относительно простых подзадач, уменьшив сложность моделирования.

В работе [63] рассматривалась задача построения ежемесячного прогноза волатильности на рынке меди. Для ее решения в работе рассматривались различные структуры из набора моделей временных рядов, включающего: параметрические модели – ARIMA, GARCH; непараметрические модели из области мягких вычислений – искусственные нейронные сети (англ. *artificial neural networks*, ANN, системы нечеткого вывода (англ. *fuzzy inference systems*, FIS) и генетические алгоритмы. По результатам большого объема экспериментов, проведенных по данным за период с 1990 г. по 2016 г., были сделаны следующие выводы: составление прогнозов с применением адаптивного метода имеет решающее значение для получения надежной и улучшенной производительности, модель адаптивной системы нечеткого вывода Adaptive–GARCH–FIS обеспечивает наилучшие возможности прогнозирования.

Выводы. Применение гибридных моделей предоставляет широкие возможности для повышения надежности краткосрочных прогнозов и разработки моделей среднесрочного прогнозирования, так как они способны учитывать большое число факторов, влияющих на прогноз, благодаря применению совершенных механизмов обработки и анализа количественных и альтернативных данных о рынках в отношении как краткосрочных, так и среднесрочных перспектив.

2.5. Фрактальный анализ

Как было отмечено в п. 2.1, методы фрактального анализа и соответствующие модели процессов применяются в задачах прогнозирования на финансовом и товарном рынках.

Одним из основных инструментов анализа и идентификации мультифрактальности во временных рядах в настоящее время является мультифрактальный детрендрованный флуктуационный анализ (англ. *Multifractal Detrended Fluctuation Analysis*, MFDFA), первоначально представленный в работе [64].

С использованием MFDFA и его модификаций определяется наличие дальнедействующих корреляций, вычисляются мультифрактальные характеристики ряда: обобщенный показатель Херста, скейлинговая экспонента, спектр сингулярности, а также проводятся исследования степенных кросс-корреляций между различными одновременно регистрируемыми (синхронизированными) временными рядами [65, 66].

Важным вопросом при прогнозировании временных рядов является выбор модели для прогнозируемого объекта. Одним из параметров этого выбора является фрактальная структура объекта прогнозирования. При прогнозировании фрактальных процессов наиболее часто используется модель ARFIMA(p, d, q), предложенная в работе [67]:

$$A(L)(1-L)^d Y_t = B(L)\mu_t,$$

где $d \in (-0,5; 0,5)$ – дробный коэффициент, связанный с показателем Херста H соотношением $D = 2 - H$; D – фрактальная размерность ряда, Y_t ; $A(L)$, $B(L)$ – полиномы степеней p и q соответственно оператора запаздывания L ; μ_t – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин с нулевым средним и конечной дисперсией.

В обзорной статье [68] подробно рассмотрены методы и модели мультифрактального анализа: доказательства наличия мультифрактальности в финансовых временных рядах, вычисление количественной оценки рыночной неэффективности, поддержки управления рисками.

Исследованию эффективности применения модели ARFIMA на финансовых рынках уделяется большое внимание, существуют разные мнения относительно эффективности этой модели. В статье [69] был проведен сравнительный анализ прогнозов акций российских компаний с помощью моделей ARIMA и GARCH и их фрактальных модификаций ARFIMA и ARFIMA–GARCH. Результаты проведенных экспериментов показали, что учет фрактальности финансовых рядов позволяет получать более качественные прогнозы, так как в большинстве случаев точность прогнозов ARFIMA и ARFIMA–GARCH оказалась выше, чем прогнозов ARIMA и GARCH.

В работе [70] проводился анализ эффективности применения модели ARFIMA для прогнозирования на горизонте длиной до 100 шагов, рассматривались случаи априори известного базового значения параметра d и неизвестного. Было показано, что в целом линейные модели, как правило, превосходят модель ARFIMA как для положительных, так и для отрицательных значений d для моделируемого ряда, а также для положительных значений d из данных реального временного ряда. В статье [71] приведены результаты прогнозирования с помощью модели ARFIMA гонконгского индекса Hang Seng (ряд которого обладает длинной памятью) и отмечено, что модель в данном случае оказалась неэффективной.

В работе [72] было проведено сравнение прогнозных характеристик моделей ARIMA(p, d, q) и

ARFIMA(p, d, q) для стационарного ряда обменного курса британского фунта стерлингов к доллару США, обладающего длинной памятью. Сравнение, проведенное по двум параметрам (RMSE (*root mean square error*) – корень из среднеквадратической ошибки, MAPE (*mean absolute percentage error*) – средняя абсолютная ошибка в процентах) показало, что расчетные прогнозные значения, полученные с помощью модели ARFIMA, более реалистичны и точнее отражают текущую экономическую реальность в двух странах. Полученные результаты согласуются с мнением авторов работ [73, 74].

В статье [75] для прогнозирования рядов с длинной памятью был применен двухэтапный подход. На первом шаге выполнялось оценивание параметра длинной памяти и применение оператора длинной памяти к исходному ряду, для которого вычислялись прогнозы на несколько шагов вперед. На втором шаге к спрогнозированным значениям применялся оператор дробной кумуляции для преобразования их к значениям исходного ряда. Проведенный анализ применения предложенного подхода на реальных данных и с использованием имитационного моделирования показал устойчивость нового метода к изменениям среднего значения процесса и параметра длинной памяти, что позволяет использовать его в прикладных задачах при отклонениях истинных параметров данных от модельных.

Для прогнозирования цен на товарных и финансовых рынках в работе [76] предложена гибридная рекуррентная модель ARFIMA–LSTM. На первом шаге с использованием модели ARFIMA выполняется фильтрация данных (с лучшим качеством, чем в модели ARIMA), на втором – обработка результатов фильтрации с использованием нейронной сети LSTM. Для исследования качества прогнозирования проводилось тестирование модели на данных товарного рынка. Результаты эксперимента показали эффективность предлагаемой гибридной модели AFRIMA–LSTM, позволяющей снизить величину ошибки MAE (*mean absolute error*) в среднем на 80 % в сравнении с обобщенной регрессионной нейронной сетью (англ. *generalized regression neural network*, GRNN), ARFIMA, ARIMA-моделями.

Методы фрактального анализа могут быть применены для предсказания кризисов. В работе [77] оценивается качество предсказания глобального финансового кризиса конца 2000-х гг. при условии выполнения гипотезы FMH. На примере трех американских индексов – DJI, NASDAQ и S&P500 – показано, что FMH достаточно хорошо описывает поведение индексов на различных инвестицион-

ных горизонтах до и во время мирового финансового кризиса.

Выводы. Проводимые исследования процессов финансового рынка подтверждают выполнение гипотезы фрактального рынка и ее полезность для анализа структуры финансовых рядов, тенденций движения финансовых потоков, предсказания кризисных ситуаций и прогнозирования [78], хотя однозначного мнения о преимуществах той или иной гипотезы не сформировано, а аппарат формирования прогнозов фрактальных процессов на финансовых и товарных рынках пока еще слабо разработан.

3. РАСШИРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ ВНЕШНИХ ИСТОЧНИКОВ

Задача формирования среднесрочных прогнозов цен на финансовых и товарных рынках в условиях нестационарности, возникновения структурных сдвигов, вызванных изменениями, происходящими внутри системы (например, предпочтений инвесторов, распределения инвесторов по различным горизонтам) или вследствие внешних событий (техногенных и природных катастроф, войн, эпидемий, засухи и пр.) вызывает необходимость включения в среднесрочные и долгосрочные прогнозы сценариев возможного развития ситуаций и оценок результатов этого воздействия. Для построения таких сценариев необходима информация о состоянии внешней среды, изменениях в структуре финансового и товарного рынков, правительственных решениях, экстремальных событиях и пр. Поэтому одним из важнейших направлений совершенствования среднесрочных прогнозов цен финансового и товарного рынков является получение информации, позволяющей оценивать возможности будущих изменений во внешней среде или в структуре прогнозируемого объекта.

Расширение информационного поля прогноза исключительно путем расширения состава временных рядов цен не позволяет сформировать среднесрочные прогнозы с необходимой точностью. Например, в работе [79] предложена модель среднесрочного прогнозирования цен на нефть с горизонтом 6–8 кварталов (18–24 месяца), представляющая собой комбинацию прогнозов, построенных по следующим показателям: ценам мирового рынка нефти, ценам на промышленное сырье, не связанное с нефтью, ценам фьючерсов на нефть, величине спреда между спотовыми ценами на бензин и сырую нефть, временным параметрам



спредов бензина и топочного мазута, наивного прогноза. Проведенные эксперименты показали, что, хотя предложенная модель комбинации прогнозов систематически показывает большую точность, чем наивные прогнозы на всех горизонтах от 1 до 18 месяцев, ее точность невысока: снижение среднеквадратичной ошибки прогноза относительно наивного составляет всего 13 %, а точность прогнозирования трендов достигает 65 %, для квартальных прогнозов на горизонтах от одного до шести кварталов снижение ошибки и точность составляют 12 % и 72 % соответственно.

Существуют две стратегии расширения информационного поля и включения в решение задачи прогнозирования не только структурированных данных о разных процессах, но и экспертных знаний и информации, содержащихся в новостных, аналитических и других источниках, связанных с объектом прогнозирования. Обе состоят в расширении схемы прогнозирования, которая включает: построение модели прогноза на фиксированном наборе данных, мониторинг изменений и коррекцию исходной модели, вычисление прогнозных значений.

Первая стратегия состоит в обеспечении возможности системного анализа путем включения этапа поиска и структуризации доступной информации о рынке, построения модели знаний о прогнозируемом процессе и внешних факторах, которые на него влияли, влияют и могут повлиять. При этом на практике модель знаний часто используется только для структуризации аналитической информации для экспертов, реже ее применение связано с формированием временных рядов активности, частоты запросов, тональности сообщений, которые добавляются к данным для формирования моделей.

Вторая стратегия заключается во включении алгоритмов обработки информации, знаний и выводов в виде оценочных суждений об изменении или прямых оценочных суждений экспертов в модель прогноза или в процедуры коррекции прогноза.

3.1. Использование данных поисковых систем

С развитием технологий больших данных получила широкое распространение идея включения в формирование прогноза данных поисковых систем. Данные поисковых систем (англ. *Search Engine Data*, SED) являются мощным фактором оценки важности и интереса пользователей к данной проблеме. Прогнозирующая способность SED достаточно подробно исследована в литературе.

В статье [80] объем поисковой выдачи Google (*Google search volume index*, GSVI) используется для измерения внимания некоммерческих и не представляющих отчетности инвесторов (трейдеров) и исследования взаимосвязи между GSVI и ценами на сырую нефть. Проведенный анализ динамики GSVI и цен на сырую нефть с января 2004 г. по июнь 2014 г. подтверждает наличие обратной связи между ними, использование GSVI повышает точность прогнозирования при рекурсивных прогнозах на одну неделю вперед.

В работе [81] предложен метод многомасштабного прогнозирования цен на сырую нефть, включающий:

- многофакторный процесс обработки данных поисковой системы, уменьшение размерности с оценкой их предсказательной силы с использованием статистического анализа;

- многомасштабный анализ для извлечения согласованных общих мод на схожих временных масштабах из данных о ценах на нефть и многофакторных поисковых систем с помощью многомерного разложения по эмпирическим модам;

- прогноз цены на нефть, включающий прогнозирование в каждом временном масштабе и ансамблевое прогнозирование по всем временным масштабам с помощью выбранного метода.

Результаты проведенного эмпирического исследования показали, что предложенный многомасштабный метод с многофакторным SED значительно превосходит все рассмотренные авторами методы прогнозирования цены на нефть. Проведенные исследования показали, что информация, содержащаяся в многофакторном SED, может иметь большую прогностическую силу для цены на сырую нефть.

Выводы. Однако, как отмечено в работе [56], в основном данные поисковых систем ориентированы на краткосрочную перспективу, их доступность приводит к тому, что «аналитики уделяют больше внимания сбору краткосрочной информации в ущерб долгосрочной». В результате, как показали проведенные в работе исследования, в долгосрочной перспективе информативность краткосрочных прогнозов аналитиков улучшается, в то время как информативность их долгосрочных прогнозов снижается.

3.2. Анализ воздействия экстремальных событий

Важным элементом воздействия на цены финансовых и товарных рынков являются экстремальные события, происходящие во внешней среде. При этом во многих работах под экстремаль-

ными событиями понимаются некоторые глобальные события, такие как пандемия или введение санкций, однако остается вопрос, какие события могут быть значимыми для рассматриваемого прогнозируемого процесса.

В других работах в области краткосрочного прогнозирования на финансовых рынках на основе обработки потока новостных заголовков формируются прогнозы движения цен. Вопросы классификации потока событий для определения значимых почти не рассматриваются, в основном изучаются характеристики интенсивности, всплесков в определенной тематической области. В этом классе методов часто исследуется ряд тональности новостей или постов, смена характеристик которого также является признаком значимых событий. Среди работ необходимо выделить методы, которые позволяют обнаружить связь между этой так называемой альтернативной информацией и изменением прогнозируемого ряда [82].

В статье [83] проведено исследование влияния экстремальных событий на цены на сырую нефть. Для оценки влияния событий на волатильность цен прогнозируемый временной ряд сначала разлагается на несколько внутренних мод в различных временных масштабах и средний тренд. Разложенные моды отражают колебания, вызванные экстремальным событием или другими факторами, действующими на него в течение рассматриваемого периода. Установлено, что общее воздействие экстремального события входит только в одну или несколько доминирующих мод, а вторичные моды изменяются под влиянием других факторов. Проведенные исследования показывают, что метод разложения по эмпирическим модам обеспечивает приемлемое решение для оценки влияния экстремальных событий на изменение цен на сырую нефть.

В работе [84] показано, что внезапные экстремальные события оказывают существенное влияние на связи между изменениями волатильностей финансового, товарного и углеродного рынков в Китае.

Выводы. Исследования в этой области сосредоточены на разработке методов обнаружения связи между информацией о событии и изменением ряда, в частности на развитии метода разложения по эмпирическим модам.

3.3. Экспертная информация

Для повышения точности прогноза путем расширения информационного поля, помимо применения методов интеллектуального анализа тексто-

вой информации из различных новостных источников, используется экспертная информация.

В работе [85] представлен подход к повышению точности прогноза путем структурирования и эффективного использования экспертных знаний. В основе данного подхода лежит субъективная корректировка прогноза, при которой математические прогнозы рассматриваются как основа, а структурированные знания экспертов предоставляются для корректировки первоначальных статистических прогнозов. При этом структурирование экспертных знаний достигается с помощью четырех формализованных факторов (по типам динамики) для идентификации и классификации событий, которые приводят к различным изменениям динамики (в различные моменты времени) прогнозируемого процесса и которые не могли быть учтены в первоначальных математических прогнозах. Эксперт оценивает силу (веса) воздействия выявленных факторов, ассоциированных с событиями, для последующей коррекции статистического прогноза в соответствующие моменты времени.

Подтверждение работоспособности этого подхода обеспечивается двумя тематическими исследованиями, проведенными совместно с прогнозистами производителя пластиковых пакетов в южной части Испании и дистрибьютора, действующего на продовольственном рынке на севере Франции. Результаты показывают, что структурирование экспертных знаний посредством идентификации событий, сопоставленных с выделенными классификационными факторами, приводит к повышению точности прогноза на 2%. Точность прогнозирования с применением предложенного подхода оценивается с использованием мер ошибок MAE и MAPE (результаты, полученные с помощью математических моделей, сравниваются с результатами, полученными с помощью прогнозирования, с поправкой на субъективные оценки).

Выводы. Экспертные оценки, полученные определенным способом, применяются на этапе коррекции сформированных математических прогнозов. Однако остается слабо проработанным вопрос о сквозном применении алгоритмов экспертного оценивания в процедуре прогнозирования, а также о верификации экспертных прогнозов.

3.4. Когнитивный анализ и моделирование ситуаций

Сегодня активно развивается научно-прикладное направление когнитивного анализа и моделирования ситуаций для решения задач структуризации, анализа, классификации, прогнозирования и поддержки принятия управленческих



решений, в том числе для анализа и прогнозирования временных рядов (см. например, недавние обзоры [86, 87]). Его основу составляет применение нечетких когнитивных карт.

Нечеткая когнитивная карта ситуации – это формализованная модель этой ситуации, отражающая представления о взаимных причинно-следственных влияниях значимых факторов ситуации; она является, как правило, результатом структуризации и формализации разнородной информации об исследуемом объекте для последующего моделирования сценариев возможного развития ситуаций. В зависимости от используемых источников различают прямой, косвенный и смешанный способы построения НКК. Прямой способ предусматривает непосредственное взаимодействие с экспертами для извлечения необходимых знаний об объекте, косвенный способ – поиск и сбор значимых сведений из разнородных информационных источников (смешанный способ является сочетанием прямого и косвенного).

Можно выделить ряд исследований, где в целях повышения точности прогноза формирование и/или коррекция прогнозной модели опирается на данные о событиях (инфоповодах) внешней среды, извлеченных из разнородных источников информации и обработанных с использованием НКК (см., например, работы [88–90]).

В статье [88] представлен подход к прогнозированию финансовых рядов данных с совместным использованием знаковых НКК и нейронных сетей. Знаковая НКК – это НКК, в которой причинно-следственные связи между концептами (факторами) отражают только знак причинно-следственного влияния – положительного (усиливающего) или отрицательного (ослабляющего) – между любой парой концептов в карте без установления весов (степени) влияния между ними. Авторы предложили автоматизированную систему KBNMiner, включающую в себя:

- базу предварительных знаний, которая формируется на основе экспертных знаний, представленных в виде НКК по различным предметным областям;

- информационно-поисковую подсистему для автоматического сбора новостной информации о событиях из сети Интернет, где направленный поиск организован с использованием концептов НКК предметных областей;

- подсистему приложения знаний, предназначенную для обработки выделенных положительных и отрицательных событий на основе анализа структуры причинно-следственных влияний НКК, результаты которого вводятся в прогнозную модель нейронной сети в виде параметра, характери-

зующего относительную силу воздействия (положительного или отрицательного) на прогнозируемый показатель, вместе с другими связанными с ним финансовыми показателями.

Предложенный подход был применен к прогнозированию процентных ставок; эмпирические результаты подтвердили, что качественная информация оказывает значительное влияние на эффективность нейронной сети при прогнозировании процентных ставок. Горизонт прогноза составил 30 дней.

В работе [89] предложена модель модулярной системы прогнозирования временных рядов, включающая три основных модуля. Гибридная нейро-нечеткая сеть формирует количественный прогноз временного ряда, результаты которого верифицируются по критерию заданной точности. НКК, учитывающая факторы причинно-следственного влияния на прогнозируемый показатель на основе собранных данных о событийном влиянии на временной ряд, формирует прогноз с оценкой влияния события на прогнозируемый показатель. Итоговый прогноз формируется моделью нейронной сети, агрегирующей результаты работы первых двух моделей.

Хотя авторы декларируют эффективность гибридного подхода (с использованием НКК и нейронных сетей) к прогнозированию временных рядов, но никаких подтверждающих практических или экспериментальных результатов его применения не приводят.

В статье [90] рассматривается проблема прогнозирования цен на сырьевые товары на один год вперед с разбивкой по месяцам. Сложность указанной проблемы обусловлена уровнем неопределенности прогноза, который возрастает с увеличением горизонта прогнозирования. Чтобы уменьшить эту неопределенность, авторы предложили гибридную модель формирования и корректировки ежемесячного прогноза цен на год вперед. Модель прогнозирования основана на использовании ансамблей многомерных статистических моделей временных рядов в различных временных масштабах. Модели, входящие в ансамбль, включают различные комбинации рядов, которые являются причинными по Грейнджеру для прогнозируемого. Помимо прогнозируемого показателя и оказывающих влияние на прогноз временных рядов цен и макропоказателей модель использует экспертно-аналитическую информацию, обработанную с помощью НКК. Данный подход развивается в русле методов комбинированного прогнозирования.

Общий алгоритм решения задачи среднесрочного многошагового прогнозирования процессов со структурными сдвигами, причиной возникновения

которых являются события внешней среды, включает:

– систематизацию, структурирование и формализацию экспертных суждений и информации из разнородных источников посредством использования НКК, отражающей структуру связей (причинно-следственных влияний) между системообразующими факторами², характеризующими основные процессы в изучаемой ситуации на товарных рынках;

– комбинированный мониторинг цен на товарных рынках [91], включающий:

1) цифровой мониторинг для выявления структурных сдвигов во временном ряду прогнозируемого процесса (и рядах связанных с ним процессов);

2) ситуационный мониторинг внешней среды (по разнородным информационным источникам) и формирование сигналов по результатам сценарного моделирования на НКК возможных последствий влияния значимых событий внешней среды (инфоповодов) на изменение прогнозируемого процесса и связанных с ним процессов;

3) управление обменом информацией между п. 1 и п. 2 и формирование выходных агрегированных сигналов;

– формирование ежемесячного прогноза цен на один год вперед на основе информации, полученной в результате обработки экспертных знаний и данных временных рядов с применением ансамбля статистических моделей VECM, ARIMA, VAR, и его коррекцию в режиме комбинированного мониторинга на основе формируемых выходных агрегированных сигналов.

Работоспособность предложенного подхода проверена на примере прогнозирования цен на черный лом на 2019 г. Точность полученного прогноза сравнивалась с наивными прогнозами и прогнозами, полученными с помощью модели ARIMA. Благодаря применению ансамблей моделей точность прогноза увеличивается практически в два раза по сравнению с «наивным» прогнозом и ARIMA, а средняя процентная ошибка прогноза – в 10,5 и три раза соответственно. Применение коррекции на горизонте прогноза снижает абсолютную процентную ошибку на 20 %, а среднюю ошибку в пять раз по сравнению с прогнозом без коррекции на основе НКК и мониторинга [41].

Выводы. По результатам обработки экспертных знаний (сценарного моделирования на НКК) могут формироваться различные сигналы, отражающие

информацию о смене направления и силы тренда прогнозируемого показателя, весовых коэффициентов для прогнозов, входящих в комбинацию, а также информацию о новых параметрах, для которых необходимо осуществить поиск данных и добавить их в исходные выборки.

4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБЗОРА В КОНТЕКСТЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

• Для объекта среднесрочного прогнозирования на товарном или финансовом рынке многошаговый прогноз необходим при решении задач планирования. Во многих случаях многошаговый прогноз позволяет повысить точность результата путем использования данных в разных масштабах (см. п. 2.1 и 2.2).

• Комбинирование прогнозов позволяет снижать величины ошибок, возникающих из-за нестабильности рынка, и изменений, вызванных внешними событиями (см. § 2).

• Применение гибридных моделей ориентировано на объединение различных этапов построения прогноза, каждый из которых может быть выполнен различными методами (см. п. 2.4).

• Для своевременного обнаружения и прогнозирования изменений, прежде всего для обнаружения признаков будущих структурных изменений (смены тренда или смены набора параметров), необходимо расширение информационного поля как путем включения временных рядов, характеризующих связанные процессы, так и путем применения методов обработки качественной информации (данных поисковых систем, новостных и фактографических данных, экспертной информации) при решении задач мониторинга в режиме текущих наблюдений и прогнозирования (см. § 3).

• Модели прогнозирования цен на среднесрочный период, построенные по историческим данным, часто оказываются несостоятельными вследствие изменений на горизонте прогноза эндогенных и экзогенных факторов, меняющих динамику прогнозируемого объекта и вызывающих необходимость коррекции. Особенности объекта прогнозирования и специфика задачи формирования среднесрочных многошаговых прогнозов цен на товарном и финансовом рынке требуют изменения стандартной схемы решения задачи прогнозирования, которая в общем виде состоит из:

- формирования выборки данных,
- анализа свойств прогнозируемого ряда и идентификации объясняющих переменных,

² Факторы названы системообразующими, поскольку в своем единстве они образуют систему, отражающую целостный взгляд на ситуацию в контексте рассматриваемой проблемы.



- выбора типа и параметров модели,
- построения прогноза и его коррекции на горизонте по результатам мониторинга.

Эти изменения для разных этапов состоят в следующем.

Этап подготовки данных. При решении задач среднесрочного прогнозирования наблюдается переход от использования имеющихся данных к формированию модели данных и информации, которые нужны для решения задачи прогнозирования. На основе структуризации знаний о процессах на товарном или финансовом рынках должна формироваться модель представления знаний, которая служит тематическим фильтром сбора временных рядов и структуризации поступающей неструктурированной информации о рынке. Это позволяет не только расширять набор моделей для комбинирования и/или переключения, которые по-разному работают на разных периодах, но при использовании методов обработки и анализа качественной информации может позволить обнаружить признаки изменений или различить важные события, последствия которых затрагивают различные параметры.

Этап определения набора параметров и их структуры для модели прогноза. Для обеспечения возможности выбирать разные модельные ансамбли или формировать гибридные модели для среднесрочного прогнозирования нестационарных процессов на этапе идентификации произошел переход от выбора ограниченного набора параметров для заданного периода к формированию структурированных разнообразных наборов параметров и классификации периодов динамики того или иного типа для прогнозируемого процесса. Расширение информационного поля для формирования прогнозов, связанное не только со сложностью процессов на товарных и финансовых рынках, но и с накопленными данными за большой исторический период, обусловило включение в процесс прогнозирования методов машинного обучения и нейросетевых методов для анализа свойств причинности на большом наборе данных, которые рассмотрены в п. 2.3.

Этап формирования модели. На этом шаге применяют статистические методы, ML, DL, ARFIMA и гибридные модели (см. § 2). Исследования показывают, что результаты определения уровня фрактальности процессов (значения фрактальной размерности D (см. п. 2.5)) являются одним из важных критериев выбора моделей. Если фрактальная размерность D лежит в интервале $[1,4; 1,6]$ и распределение временных рядов является нормальным, то для них выполняется гипотеза EMN и поведение системы хорошо описывается классическими статистическими методами, такими

как ARIMA, VAR и VECM, и другими статистическими моделями. При этом применяются специальные методы определения типа процесса (стационарный, тренд-стационарный, с единичным корнем) на рассматриваемом участке прогнозирования и алгоритмы анализа коинтеграции между рядами (см. п. 2.1). При использовании статистических моделей, рассмотренных в п. 2.1 и 2.2, наилучшее качество прогноза обеспечивается формированием ансамбля моделей, применением процедур анализа динамики изменения качества прогнозов на разных периодах и выбором стратегии комбинирования алгоритмов.

Если распределение временных рядов отличается от нормального и фрактальная размерность D лежит в интервале $[1; 1,4]$ или в интервале $(1,6; 2]$, то в первом случае процесс обладает длинными корреляциями (долговременной памятью) и является устойчивым; во втором случае анализируемый процесс находится в антиперсистентном, неустойчивом состоянии. Применение статистических моделей в обоих случаях может не дать хороших результатов, целесообразно применение фрактального анализа и моделей прогноза, учитывающих их фрактальные свойства, например, ARFIMA (см. п. 2.5) и методов ИИ.

В отличие от статистических моделей методы, использующие алгоритмы ИИ (см. п. 2.3, 2.4) и их комбинации, не требуют знания типа процесса и его распределения и сохраняют свою работоспособность при изменении этих свойств. Для учета нелинейностей в динамике объекта в настоящее время активно используются модели ИИ, обладающие способностью к самообучению. Применение методов ИИ повышает точность прогнозов в условиях изменяющихся финансового и товарного рынков путем изучения нелинейных характеристик их динамики по историческим данным. К проблемам их применения относятся: необходимость наличия большого объема данных для обучения, длительность процесса обучения при работе с большими массивами данных, потребность в высокопроизводительных вычислительных ресурсах.

Этап мониторинга и коррекции. На этапе мониторинга в режиме получения текущих наблюдений рекомендуется применение алгоритмов обнаружения и идентификации типа изменений, но в массе своей в обзорной выборке работ они не применяются. Если изменение обнаружено, принимается решение о целесообразности коррекции модели. Соответственно, необходимо включать в арсенал методов и алгоритмов набор алгоритмов коррекции моделей на случай обнаружения определенного типа изменений. В § 3 представлен ряд работ, в которых применены методы обработки и

анализа разнородной информации и решалась задача прогнозирования на финансовых и товарных рынках. Возникновение структурных сдвигов на горизонте прогноза вызывает необходимость их обнаружения и корректировки моделей. Для обнаружения структурных сдвигов в режиме онлайн наряду с алгоритмами мониторинга временных рядов целесообразно использовать комбинированный мониторинг, включающий обнаружение структурных сдвигов и экспертный анализ ситуации, оказывающей влияние на прогнозируемый объект: результатов воздействия событий внешней среды и стратегий различных групп участников рынка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем обзоре предпринята попытка исследования методов формирования среднесрочных прогнозов цен на финансовых и товарных рынках. Такие прогнозы играют важную роль в стратегическом планировании развития мировой и региональной экономики, в управлении развитием социально-экономических объектов различной степени сложности.

Объектами прогнозирования являются процессы на товарных и/или финансовых рынках. Такие процессы быстро реагируют на изменение экзогенных и эндогенных факторов; в большинстве своем они нелинейные, изменяются от стационарных к нестационарным и обратно. Под среднесрочным прогнозом понимается прогноз с помесечным разбиением и горизонтом прогноза от трех месяцев до двух лет.

На рассматриваемых горизонтах существует растущая с их увеличением вероятность возникновения структурных сдвигов, приводящих к изменениям первоначально построенного прогноза. Поэтому на горизонте прогноза необходимо осуществлять мониторинг возникновения структурных сдвигов и коррекцию прогноза по результатам мониторинга.

По проведенному обзору можно сделать следующие выводы.

- Проблеме построения среднесрочных прогнозов на товарных и финансовых рынках уделяется мало внимания как в отечественных, так и в зарубежных исследованиях, в основном представлены результаты по краткосрочному и – реже – помесечному прогнозированию.

- Задача среднесрочного прогноза сложнее классической задачи одношагового прогнозирования и требует более трудоемких процедур сбора данных о факторах влияния на рынок и методов их

анализа, расширения схемы решения рассматриваемой задачи.

- Постановке задачи прогнозирования структурных сдвигов и последующей коррекции на горизонте прогноза в литературе уделяется мало внимания. Для решения этой задачи требуется прогноз возникновения различных вариантов изменений эндогенных и/или экзогенных факторов, влияющих на процесс. Для построения такого прогноза необходимо включать в него не только информацию о ценах рынка, но и качественную информацию.

- В работах, включенных в обзор, рассмотрены модели, методы и алгоритмы, которые реализуют отдельные этапы расширенной схемы среднесрочного прогнозирования. Перспективным путем реализации этой схемы, по мнению авторов, является гибридный подход.

- В рамках развития методов для решения задачи среднесрочного прогнозирования процессов на товарных и финансовых рынках в условиях структурных сдвигов представляются перспективными следующие направления:

- развитие методов, направленных на расширение возможностей использования количественной и качественной информации, извлекаемой из разнородных источников (данных поисковых систем, новостной информации, аналитических исследований причинно-следственных связей между отдельными секторами рынка, экспертных суждений, результатов сценарного анализа влияния значимых событий);

- применение байесовского подхода для прогнозирования структурных сдвигов на горизонте прогноза;

- исследование возможностей применения фрактального анализа для предсказания кризисов и значимых для прогнозируемого объекта событий в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Мировая экономика и международный бизнес* / под общ. ред. В.В. Полякова и Р.К. Щенина. – 5-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2008. – 688 с. [*Mirovaya ekonomika i mezhdunarodnyi biznes* / pod obshch. red. V.V. Polyakova i R.K. Shchenina. – 5-e izd., ster. – М.: KNORUS, 2008. – 688 s. (In Russian)]
2. *Международная практика прогнозирования мировых цен на финансовых рынках (сырье, акции, курсы валют)*. Под ред. Я. Миркина – М: Магистр, 2014. – 456 с. [*Mezhdunarodnaya praktika prognozirovaniya mirovykh tsen na finansovykh rynkakh (sy'r'e, aktsii, kursy valyut)*. Pod red. Ya.M. Mirkina – М: Magistr, 2014. – 456 s. (In Russian)]
3. *Graefe, A., Weinhardt, C. Long-Term Forecasting with Prediction Markets – A Field Experiment on Applicability and Expert*



- Confidence // The Journal of Prediction Markets. – 2008. – Vol. 2, no. 2. – P. 71–91.
4. Jiang, M., Wang, K., Sun, Y., et al. MLGN: Multi-scale Local-Global Feature Learning Network for Long-Term Series Forecasting // Machine Learning: Science and Technology. – 2023. – Vol. 4, no. 4. – DOI: <https://doi.org/10.1088/2632-2153/ad1436>
 5. Zellner, M., Abbas, A.E., Budescu, D.V., Galstyan, A. A Survey of Human Judgement and Quantitative Forecasting Methods // R. Soc. Open Sci. – 2021. – Vol. 8. – Art. no. 201187. – DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.201187>
 6. Mediavilla, M. A., Dietrich, F., Palm, D. Review and Analysis of Artificial Intelligence Methods for Demand Forecasting in Supply Chain Management // Procedia CIRP. – 2022. – Vol. 107. – P. 1126–1131.
 7. Kumar, G., Jain, S., Singh, U.P. Stock Market Forecasting Using Computational Intelligence: A Survey // Archives of Computational Methods in Engineering. – 2021. – Vol. 28, no. 3. – P. 1069–1101.
 8. Zheng, H., Wu, J., Song, R., et al. Predicting Financial Enterprise Stocks and Economic Data Trends Using Machine Learning Time Series Analysis. Applied and Computational Engineering. – 2024. – Vol. 87. – P. 26–32.
 9. Fattouh, B., Mahadeva, L. Causes and Implications of Shifts in Financial Participation in Commodity Markets // Journal of Futures Markets. – 2014. – Vol. 34, no. 8. – P. 757–787.
 10. Fan, Y., Xu, J.H. What Has Driven Oil Prices since 2000? A Structural Change Perspective // Energy Economics. – 2011. – Vol. 33, no. 6. – P. 1082–1094.
 11. Покровская А.В. Анализ структурных сдвигов на рынке ценных бумаг России в период 2019–2022 гг. // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2023. – № 63. – С. 118–134. [Pokrovskaya, A.V. Analiz strukturnykh sdvigoв na rynke tsennykh bumag Rossii v period 2019–2022 gg. // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ehkonomika. – 2023. – No. 63. – S. 118–134. (In Russian)]
 12. Hunjra, A.I., Azam, M., Niazi, G.S.K., et al. Risk and Return Relationship in Stock Market and Commodity Prices: A Comprehensive Study of Pakistani Markets // World Applied Sciences Journal. – 2011. – Vol. 13, no. 3. – P. 470–481.
 13. Mensi, W., Beljid, M., Boubaker, A., Managi, S. Correlations and Volatility Spillovers across Commodity and Stock Markets: Linking Energies, Food, and Gold // Economic Modelling. – 2013. – Vol. 32. – P. 15–22.
 14. Öztekin, M.F., Öcal, N. Financial Crises and the Nature of Correlation between Commodity and Stock Markets // International Review of Economics & Finance. – 2017. – Vol. 48. – P. 56–68.
 15. Kosko, B. Fuzzy Cognitive Maps // Int. J. Man. Mach. Stud. – 1986. – Vol. 24, no. 1. – P. 65–75.
 16. Авдеева З.К., Коврига С.В. Диагностирование проблемных ситуаций в развитии сложных систем на основе когнитивных карт // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 42. – С. 5–28. [Avdeeva, Z.K., Kovriga, S.V. Cognitive-Map-Based Diagnostics of Problem Situations in Complex System Development // Large-Scale Systems Control. – 2013. – Iss. 42. – P. 5–28. (In Russian)]
 17. Авдеева З.К., Коврига С.В. Подход к постановке задач управления на когнитивной модели ситуации для стратегического мониторинга // Управление большими системами. – 2016. – Вып. 59. – С. 120–146. [Avdeeva, Z.K., Kovriga, S.V. Cognitive-Map-Based Approach to Statement of System Development Control Problem Based for the Strategy Monitoring // Large-Scale Systems Control. – 2016. – Iss. 59. – P. 120–146. (In Russian)]
 18. Stock, J.H., Watson, M.W. Evidence on Structural Instability in Macroeconomic Time Series Relations // Journal of Business & Economic Statistics. – 1996. – Vol. 14, no. 1. – P. 11–30.
 19. Lazariv, T., Schmid, W. Challenges in Monitoring Non-stationary Time Series. In: Frontiers in Statistical Quality Control. Ed. by S. Knoth, S., W. Schmid. – Cham: Springer, 2018. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-75295-2_14
 20. Гребенюк Е.А. Алгоритмы обнаружения изменений свойств нестационарных процессов в режиме мониторинга // Труды XIV Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2021). – Москва, 2021. – С. 738–746. [Grebnyuk, E.A. Algorithms for Detecting Changes in the Properties of Non-Stationary Processes in the Monitoring Mode // Proceedings of the 14th International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD). – Moscow: IEEE, 2021. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9600109>.]
 21. Mandelbrot, B.B. Fractals and Scaling in Finance. – New York: Springer, 1997. – 552 p.
 22. Peters, E.E. Fractal Market Analysis. Applying Chaos Theory to Investment & Economics. – New York: J. Wiley & Sons, 1994. – 336 p.
 23. Perron, P. The Great Crash, the Oil Price Shock and the Unit Root Hypothesis // Econometrica. – 1989. – Vol. 57, no. 6. – P. 1361–1401.
 24. Kwiatkowski, D., Phillips, P., Schmidt, P. Testing the Null Hypothesis of Stationarity against the Alternative of a Unit Root: How Sure Are We That Economic Time Series Have a Unit Root? // Journal of Econometrics. – 1992. – Vol. 54, no. 1-3. – P. 159–178.
 25. Скроботов А.А. Структурные сдвиги и тестирование на единичный корень // Прикладная эконометрика. – 2020. – Т. 58. – С. 96–141. [Skrobotov, A.A. Strukturnye sdvigi i testirovanie na edinichnyi koren' // Prikladnaya ehkonometrika. – 2020. – Vol. 58. – P. 96–141. (In Russian)]
 26. Casini, A., Perron, P. Structural Breaks in Time Series // Oxford Research Encyclopedia of Economics and Finance. – 2019. – DOI: <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190625979.013.179>
 27. Бродский Б.Е. Структурные сдвиги и единичные корни: различение моделей нестационарности временных рядов // Прикладная эконометрика. – 2008. – № 3. – С. 52–63. [Brodskii, B.E. Strukturnye sdvigi i edinichnye korni: razlichenie modelei nestatsionarnosti vremennykh ryadov // Prikladnaya ehkonometrika. – 2008. – No. 3. – S. 52–63. (In Russian)]
 28. Полбин А.В., Скроботов А.А. Тестирование наличия изломов в тренде структурной компоненты ВВП Российской Федерации // Экономический журнал Высшей школы экономики. – 2016. – Т. 20, № 4. – С. 588–623. [Polbin, A.V., Skrobotov, A.A. Testirovanie nalichiya izlomov v trende strukturnoi komponenty VVP Rossiiskoi Federatsii // Ehkonomicheskii zhurnal Vysshei shkoly ehkonomiki. – 2016. – Vol. 20, no. 4. – P. 588–623. (In Russian)]
 29. Engle, R.F., Granger, C.W.J. Co-Integration and Error-Correction: Representation, Estimation, and Testing // Econometrica. – Vol. 55. – P. 251–276.
 30. Johansen, S. Likelihood-Based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models. – Oxford: Oxford University Press, 1995. – 267 p.
 31. Скроботов А.А. Структурные сдвиги в моделях коинтеграции // Прикладная эконометрика. – 2021. – № 3. – С. 117–141. [Skrobotov, A.A. Strukturnye sdvigi v modelyakh kointegratsii // Prikladnaya ehkonometrika. – 2021. – No. 3. – P. 117–141. (In Russian)]

32. *Bontempi, G.* Long Term Time Series Prediction with Multi-input Multi-output Local Learning // Proceedings of the 2nd European Symposium on Time Series Prediction (ESTSP08). – Helsinki, Finland, 2008. – P. 145–154.
33. *Bates, J.M., Granger, C.W.J.* The Combination of Forecasts // Journal of the Operational Research Society. – 1969. – Vol. 20, no. 4. – P. 451–468.
34. *Armstrong, J.S.* Combining Forecasts. In: Principles of Forecasting. A Handbook for Researchers and Practitioners. Ed. by J.S. Armstrong. – Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 417–440.
35. *Makridakis, S., Spiliotis, E., Assimakopoulos, V.* The M4 Competition: Results, Findings, Conclusion and Way Forward // International Journal of Forecasting. – 2018. – Vol. 34, no. 4. – P. 802–808.
36. *Atiya, A.F.* Why Does Forecast Combination Work So Well? // International Journal of Forecasting. – 2020. – Vol. 36, no. 1. – P. 197–200.
37. *Wang, X., Hyndman, R.J., Li, F., Kang, Y.* Forecast Combinations: An over 50-Year Review // International Journal of Forecasting. – 2023. – Vol. 39, no. 4. – P. 1518–1547.
38. *Hoeting, J.A., Madigan, D., Raftery, A.E., Volinsky, C.T.* Bayesian Model Averaging: A Tutorial // Statistical Science. – 1999. – Vol. 14, no. 4. – P. 382–417.
39. *Maheu, J.M., Gordon, S.* Learning, Forecasting and Structural Breaks // Journal of Applied Econometrics. – 2008. – Vol. 23, no. 5. – P. 553–583.
40. *Pesaran, M.H., Pettenuzzo, D., Timmermann, A.* Forecasting Time Series Subject to Multiple Structural Breaks // The Review of Economic Studies. – 2006. – Vol. 73, no. 4. – P. 1057–1084.
41. *Avdeeva, Z.K., Grebenyuk, E.A., Kovriga, S.V.* Raw Material Price Forecasting on Commodity Markets: Application of Expert and Quantitative Information // Advances in Systems Science and Applications. – 2022. – Vol. 22, no. 4. – P. 126–143.
42. *Giraitis, L., Kapetanios, G., Price, S.* Adaptive Forecasting in the Presence of Recent and Ongoing Structural Change // Journal of Econometrics. – 2013. – Vol. 177, no. 2. – P. 153–170.
43. *Junttila, J.* Structural Breaks, ARIMA Model and Finnish Inflation Forecasts // International Journal of Forecasting. – 2001. – Vol. 17, no. 2. – P. 203–230.
44. *Diebold, F.X., Pauly, P.* Structural Change and the Combination of Forecasts // Journal of Forecasting. – 1987. – Vol. 6, no. 1. – P. 21–40.
45. *Goodwin, B.K.* Forecasting Cattle Prices in the Presence of Structural Change // Journal of Agricultural and Applied Economics. – 1992. – Vol. 24, no. 2. – P. 11–22.
46. *Raftery, A.E., Kárny, M., Ettl, P.* Online Prediction under Model Uncertainty via Dynamic Model Averaging: Application to a Cold Rolling Mill // Technometrics. – 2010. – Vol. 52, no. 1. – P. 52–66.
47. *Byrne, J.P., Korobilis, D., Ribeiro, P.J.* On the Sources of Uncertainty in Exchange Rate Predictability // International Economic Review. – 2018. – Vol. 59, no. 1. – P. 329–357.
48. *Aye, G., Gupta, R., Hammoudeh, S., Kim, W.J.* Forecasting the Price of Gold Using Dynamic Model Averaging // International Review of Financial Analysis. – 2015. – Vol. 41. – P. 257–266.
49. *Koop, G., Korobilis, D.* Large Time-Varying Parameter VARs // Journal of Econometrics. – 2013. – Vol. 177, no. 2. – P. 185–198.
50. *Taieb, S.B., Hyndman, R.* Recursive and Direct Multi-step Forecasting: The Best of Both Worlds. Working Paper 19/12. – Melbourne: Monash University, Department of Econometrics and Business Statistics, 2012. – 36 p.
51. *Taieb, S.B., Sorjamaa, A., Bontempi, G.* Multiple-Output Modeling for Multi-step-ahead Time Series Forecasting // Neurocomputing. – 2010. – Vol. 73. – P. 1950–1957.
52. *Livieris, I.E., Pintelas, P.* A Novel Multi-step Forecasting Strategy for Enhancing Deep Learning Models' Performance // Neural Computing and Applications. – 2022. – Vol. 34. – P. 19453–19470. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07158-9>
53. *Sezer, O.B., Gudelek, M.U., Ozbayoglu, A.M.* Financial Time Series Forecasting with Deep Learning: A Systematic Literature Review: 2005–2019 // Applied Soft Computing. – 2020. – Art. no. 106181. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106181>
54. *Mahmoud, A., Mohammed, A.* A Survey on Deep Learning for Time-Series Forecasting. In: Machine Learning and Big Data Analytics Paradigms: Analysis, Applications and Challenges. Ed. by A.E. Hassanien and A. Darwish. – Cham: Springer, 2021. – P. 365–392.
55. *Li, Z., Fan, C., Ding, W., Qian, K.* Robot Navigation and Map Construction Based on SLAM Technology // World Journal of Innovation and Modern Technology. – 2024. – Vol. 7, iss. 3. – P. 8–14. – DOI: [https://doi.org/10.53469/wjimt.2024.07\(03\).02](https://doi.org/10.53469/wjimt.2024.07(03).02)
56. *Dessaint, O., Foucault, T., Frésard, L.* Does Alternative Data Improve Financial Forecasting? The Horizon Effect // The Journal of Finance. – 2024. – Vol. 79, no. 3. – P. 2237–2287.
57. *Lee, S.I., Yoo, S.J.* Threshold-Based Portfolio: The Role of the Threshold and Its Applications // The Journal of Supercomputing. – 2020. – Vol. 76, no. 10. – P. 8040–8057.
58. *Dingli, A., Fournier, K.S.* Financial Time Series Forecasting – Deep Learning Approach // International Journal of Machine Learning and Computing. – 2017. – Vol. 7, no. 5. – P. 118–122.
59. *Luo, Z., Guo, W., Liu, Q., Zhang, Z.* A Hybrid Model for Financial Time-Series Forecasting Based on Mixed Methodologies // Expert Systems. – 2021. – Vol. 38, no. 2. – Art. no. e12633.
60. *Zhang, G., Zhang, X., Feng, H.* Forecasting Financial Time Series Using a Methodology Based on Autoregressive Integrated Moving Average and Taylor Expansion // Expert Systems. – 2016. – Vol. 33, no. 5. – P. 501–516.
61. *Wu, Z., Huang, N.E.* Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-Assisted Data Analysis Method // Adv. Adapt. Data Anal. – 2009. – Vol. 1, no. 01. – P. 1–41. – DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793536909000047>
62. *Yang, H., Lin, H.* Applying the Hybrid Model of EMD, PSR, and ELM to Exchange Rates Forecasting // Computational Economics. – 2017. – Vol. 49, no. 1. – P. 99–116.
63. *Garcia, D., Kristjanpoller, W.* An Adaptive Forecasting Approach for Copper Price Volatility through Hybrid and Non-hybrid Models // Applied Soft Computing. – 2019. – Vol. 74. – P. 466–478.
64. *Peng, C.K., Havelin, S., Stanley, H.E., Goldberger, A.L.* Quantification of Scaling Exponents and Crossover Phenomena in Nonstationary Time Series // Chaos. – 1995. – No. 5. – P. 82–89.
65. *Mali, P., Mukhopadhyay, A.* Multifractal Characterization of Gold Market: A Multifractal Detrended Fluctuation Analysis // Physica: A Statistical Mechanics and its Applications. – 2014. – Vol. 413. – P. 361–372.
66. *Podobnik, B., Stanley, H.E.* Detrended Cross-correlation Analysis: A New Method for Analyzing Two Non-stationary Time Series // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100. – Art. no. 084102.



67. *Granger, C.W.J., Joyeux, R.* An Introduction to Long-Memory Time Series Models and Fractional Differencing // *Journal of Time Series Analysis*. – 1980. – Vol. 1, no. 1. – P. 15–30.
68. *Jiang, Z.Q., Xie, W.J., Zhou, W.X., Sornette, D.* Multifractal Analysis of Financial Markets: A Review // *Reports on Progress in Physics*. – 2019. – Vol. 82, no. 12. – Art. no. 125901.
69. *Гарафутдинов П.В.* Исследование влияния некоторых параметров модели ARFIMA на точность прогноза финансовых временных рядов // *Прикладная эконометрика*. – 2021. – Т. 62. – С. 85–100. [*Garafutdinov, R.V.* Issledovanie vliyaniya nekotorykh parametrov modeli ARFIMA na tochnost' prognoza finansovykh vremennykh ryadov // *Prikladnaya ehkonometrika*. – 2021. – Vol. 62. – P. 85–100. (In Russian)]
70. *Ellis, C., Wilson, P.* Another Look at the Forecast Performance of ARFIMA Models // *International Review of Financial Analysis*. – 2004. – Vol. 13, no. 1. – P. 63–81.
71. *Xiu, J., Jin, Y.* Empirical Study of ARFIMA Model Based on Fractional Differencing // *Physica: A Statistical Mechanics and its Applications*. – 2007. – Vol. 377, no. 1. – P. 138–154.
72. *Shittu, O.I., Yaya, O.S.* Measuring Forecast Performance of ARMA and ARFIMA Models: An Application to US Dollar/UK Pound Foreign Exchange Rate // *European Journal of Scientific Research*. – 2009. – Vol. 32, no. 2. – P. 167–176.
73. *Jadhav, V., Chinnappa, R.B.V., Gaddi, G.M.* Application of ARIMA Model for Forecasting Agricultural Prices // *J. Agr. Sci. Tech.* – 2017. – Vol. 19, no. 5. – P. 981–992.
74. *Boutahar, M., Mootamri, I., Peguin-Feissolle, A.* A Fractional Integrated Exponential STAR Model Applied to the US Real Effective Exchange Rates // *Economic Modelling*. – 2009. – Vol. 26. – P. 335–341.
75. *Papailias, F., Dias, G.F.* Forecasting Long Memory Series Subject to Structural Change: A Two-Stage Approach // *International Journal of Forecasting*. – 2015. – Vol. 31, no. 4. – P. 1056–1066.
76. *Bukhari, A.H., Raja, M.A.Z., Sulaiman, M., et al.* Fractional Neuro-Sequential ARFIMA-LSTM for Financial Market Forecasting // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 71326–71338.
77. *Kristoufek, L.* Fractal Markets Hypothesis and the Global Financial Crisis: Scaling, Investment Horizons and Liquidity // *Advances in Complex Systems*. – 2012. – Vol. 15, no. 6. – Art. no. 1250065.
78. *Taylor, S.J., Letham, B.* Forecasting at Scale // *The American Statistician*. – 2018. – Vol. 72, no. 1. – P. 37–45.
79. *Baumeister, C., Kilian, L.* Forecasting the Real Price of Oil in a Changing World: A Forecast Combination Approach, *Journal of Business & Economic Statistics*. – 2015. – Vol. 33, no. 3. – P. 338–351.
80. *Li, X., Ma, J., Wang, S., Zhang, X.* How Does Google Search Affect Trader Positions and Crude Oil Prices? // *Economic Modelling*. – 2015. – Vol. 49. – P. 162–171.
81. *Tang, L., Zhang, C., Li, L., Wang, S.* A Multi-scale Method for Forecasting Oil Price with Multi-factor Search Engine Data // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 257. – Art. no. 114033.
82. *Xu, W., Liu, W., Xu, C., et al.* REST: Relational Event-Driven Stock Trend Forecasting // *Proceedings of the Web Conference WWW'2021*. – New York, 2021. – P. 1–10. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3442381.3450032>
83. *Zhang, X., Yu, L., Wang, S., Lai, K.K.* Estimating the Impact of Extreme Events on Crude Oil Price: An EMD-Based Event Analysis Method // *Energy Economics*. – 2009. – Vol. 31, no. 5. – P. 768–778.
84. *Zhao, L., Liu, W., Zhou, M., Wen, F.* Extreme Event Shocks and Dynamic Volatility Interactions: The Stock, Commodity, and Carbon Markets in China // *Finance Research Letters*. – 2022. – Vol. 47. – Art. no. 102645.
85. *Marmier, F., Cheikhrouhou, N.* Structuring and Integrating Human Knowledge in Demand Forecasting: A Judgmental Adjustment Approach // *Production Planning & Control*. – 2010. – Vol. 21, no. 4. – P. 399–412.
86. *Felix, G., Nápole, G., Falcon, R., Froelich, W.* A Review on Methods and Software for Fuzzy Cognitive Maps // *Artif. Intell. Rev.* – 2019. – Vol. 52. – P. 1707–1737.
87. *Orang, O., de Lima e Silva, P.C., Guimarães, F.G.* Time Series Forecasting Using Fuzzy Cognitive Maps: A Survey // *Artif. Intell. Rev.* – 2023. – Vol. 56. – P. 7733–7794.
88. *Hong, T., Han, I.* Integrated Approach of Cognitive Maps and Neural Networks Using Qualitative Information on the World Wide Web: The KBNMiner // *Expert Systems*. – 2004. – Vol. 21, no. 5. – P. 243–252.
89. *Аверкин А.Н., Ярушев С.А., Павлов В.Ю.* Когнитивные гибридные системы поддержки принятия решений и прогнозирования // *Программные продукты и системы*. – 2017. – Т. 30, № 4. – С. 632–642. [*Averkin, A.N., Yarushev, S.A., Pavlov, V.Yu.* Cognitive Hybrid Systems for Decision Support and Forecasting // *Programmnye produkty i sistemy*. – 2017. – Vol. 30, no. 4. – P. 632–642. (In Russian)]
90. *Авдеева З.К., Гребенюк Е.А., Коврига С.В.* Формирование среднесрочных помесячных прогнозов цен на сырье на основе экспертной и количественной информации // *Автоматизация в промышленности*. – 2022. – № 5. – С. 38–45. [*Avdeeva, Z.K., Grebenyuk, E.A., Kovriga, S.V.* Formirovanie srednesrochnykh pomesyachnykh prognozov tsen na syr'e na osnove ehkspertnoi i kolichestvennoi informatsii // *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. – 2022. – No. 5. – P. 38–45. (In Russian)]
91. *Avdeeva, Z.K., Grebenyuk, E.A., Kovriga, S.V.* Detection of Structural Shifts in Commodity Markets in the Mode of Situation and Digital Monitoring // *IFAC-PapersOnLine*. – 2023. – Vol. 56, no. 2. – P. 7778–7783.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Ключковым.

Поступила в редакцию 14.07.2024,
после доработки 08.11.2024.
Принята к публикации 13.11.2024.

Авдеева Зинаида Константиновна – канд. техн. наук,
✉ avdeeva@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4517-6750>

Гребенюк Елена Алексеевна – д-р техн. наук,
✉ Ingrebenuk12@yandex.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5153-8578>

Коврига Светлана Вадимовна – науч. сотрудник,
✉ kovriga@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-7675-5192>

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

© 2024 г. Авдеева З. К., Гребенюк Е. А., Коврига С. В.



Эта статья доступна по лицензии [Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ANALYSIS OF MEDIUM-TERM FORECASTING METHODS FOR PROCESSES WITH STRUCTURAL SHIFTS IN FINANCIAL AND COMMODITY MARKETS

Z.K. Avdeeva*, E.A. Grebenyuk** and S.V. Kovriga***

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ avdeeva@ipu.ru, **✉ lngrebenuk12@yandex.ru, ***✉ kovriga@ipu.ru

Abstract. Medium-term price forecasting methods for financial and commodity markets are considered. The forecasted processes are nonstationary and nonlinear; they contain structural shifts arising due to systemic changes in the market structure and extreme events affecting the market. The probability of structural shifts grows with increasing the forecasting horizon, so the forecasting problem should be solved considering possible changes in the process of interest on the forecasting horizon. To forecast future changes in the process, it is necessary to expand the information field of the forecast, i.e., include expert judgments and the results of qualitative analysis of the processes, e.g., using the methods of fundamental analysis, cognitive analysis, and their implementation algorithms. Medium-term price forecasting in financial and commodity markets is a necessary element in the planning and management of socio-economic and production systems and investment management. This survey addresses the peculiarities of the forecasted processes determining the requirements for medium-term forecasting methods, their implementation, and the selection of necessary information included in the forecast to detect future changes in the process and their causal factors. Models and methods of statistical forecasting, artificial intelligence, and fractal analysis are considered, in addition to those using information from various sources in the forecasting algorithm: expert judgments, news about extreme events, and search engine data. The results of this survey are summarized in the context of medium-term forecasting. Finally, some promising lines of research in this area are outlined.

Keywords: commodity and financial markets, time series, structural shifts, medium-term forecasting.

Acknowledgments. This work was supported in part by the Russian Science Foundation, project no. 23-21-00455; <https://rscf.ru/project/23-21-00455/>.

СЦЕНАРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ СТРАНЫ НА ОСНОВЕ ИНДИКАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

О. И. Дранко*, А. Ф. Резчиков**, И. А. Степановская***, А. С. Богомолов****, В. А. Кушников*****

*-***Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
****.*****ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», г. Саратов

*✉ olegdranko@gmail.com, **✉ rw4cy@mail.ru, ***✉irstepan@ipu.ru,
****✉ alexbogomolov@yandex.ru, *****✉ kushnikoff@yandex.ru

Аннотация. В работе рассмотрена многоуровневая модель индикативного планирования целевых индикаторов в системе «мир (много стран) – страна – отрасли – ресурсы – мероприятия». В предлагаемой имитационной модели реализуется подход на основе сценарного планирования. Поставлена задача анализа и прогноза целевых индикаторов страны на примере показателя ВВП по ППС. Проведены оценки необходимого для реализации целевого сценария роста ВВП и валовой добавленной стоимости (ВДС) отдельных отраслей. Определены удельные показатели эффективности по финансовым и кадровым ресурсам: производительность труда и капиталоемкость. Сделана оценка необходимых для реализации целевого сценария инвестиций в основной капитал и численность занятых. Показано, что для реализации целевого сценария роста ВДС необходимы меры по ускорению роста производительности труда, выделены наиболее актуальные отрасли. В качестве исходных данных использовались данные Мирового банка и Росстата.

Ключевые слова: моделирование, прогнозирование, целеобразование, индикативное планирование, управление, крупномасштабные системы, системная динамика.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях капитализма перед экономикой стоит задача роста и развития, стимулируемая кредитным процентом. Количественным измерителем экономики в целом по системе национальных счетов принимается валовой внутренний продукт (ВВП).

Рассмотрим Задачу 1, установленную в Послании Президента России Федеральному собранию: «принять меры, обеспечивающие вхождение к 2030 г. Российской Федерации в четверку крупнейших экономик мира по объему валового внутреннего продукта, рассчитанному по паритету покупательной способности» [1, 2].

Информация о текущем положении Российской Федерации по показателю ВВП по ППС приведена далее в § 4.

Ранее Россия уже решала задачу ускоренного роста. В 2003 г. В. В. Путин поставил задачу удво-

ения ВВП страны за 10 лет. Для этого необходим среднегодовой темп роста (англ. *Compound Annual Growth Rate*, CAGR) 7,2 %, и он реализовывался с 2000 по 2008 гг. [3]. С одной стороны, это был «рост от нуля», после падения российской экономики в 1990-х годах [4]. С другой стороны, необходимо было обеспечить условия для такого роста. В 2000-е гг. ключевой вклад в прирост ВВП как суммарной ВДС отраслей внесли следующие отрасли (табл. 1): торговля (ПАО «Газпром» является организацией по торговле газом согласно кодам ОКВЭД), строительство, финансовая деятельность, операции с недвижимым имуществом. Были и отрасли, которые практически не росли в тот период: сельское хозяйство и рыболовство, производство электроэнергии, образование и здравоохранение.

Однако масштабный экономический кризис 2008–2009 гг. и ковидные ограничения 2020–2021 гг. заметно замедлили рост мировой и российской экономики.

ВДС отраслей по ОКВЭД в постоянных ценах 2008 г.

Отрасль	ВДС отраслей, 2002 г., млрд руб.	ВДС отраслей, 2008 г., млрд руб.	Прирост абсолютный, 2002–2008 гг., млрд руб.	CAGR, 2002–2008 гг., %
Валовой внутренний продукт в рыночных ценах, в том числе:	27 312	41 277	11 972	7,13 %
Строительство	1 152	2 225	927	11,60 %
Оптовая и розничная торговля	3 740	7 138	2 900	11,37 %
Финансовая деятельность	438	1 538	973	23,30 %
Операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг	2 423	3 959	1 469	8,53 %

Однако масштабный экономический кризис 2008–2009 гг. и ковидные ограничения 2020–2021 гг. заметно замедлили рост мировой и российской экономики.

Выделяют показатели ВВП и ВВП по паритету покупательной способности (ППС). ВВП по ППС учитывает реальную покупательную способность национальных валют на местных рынках, а также обменные курсы валют. Универсального ответа на вопрос, какой показатель предпочтительнее, нет – критерий зависит от рассматриваемой ситуации.

В странах с низким доходом товары и услуги, как правило, стоят дешевле, чем в государствах с высоким доходом. Если не учитывать эту разницу в ценах на международном уровне, то можно недооценить покупательную способность населения в развивающихся странах и странах с формирующимся рынком и, соответственно, их общее благосостояние. Поэтому для оценки общего благосостояния обычно используют показатель ВВП по ППС.

Основная проблема заключается в сложности измерения ВВП по ППС по сравнению с ВВП в текущих ценах. Для расчета ВВП по ППС требуется провести масштабную статистическую работу, а новые сопоставления цен становятся доступны только со значительной временной задержкой. В периоды между датами исследования необходимо оценивать коэффициент ППС, что может привести к погрешностям в измерениях.

Экспорт и импорт в международных расчетах косвенно влияют на покупательную способность и учтены в ВВП по ППС. Доля импорта и экспорта в российской экономике в целом может быть оценена по отношению величины экспорта к выручке по полному кругу организаций, или по доле импорта к затратам. Объем экспорта России составил 425,1 млрд долларов США (USD) в 2023 г. [5], 592,5 млрд USD в 2022 г. при выручке 324 321 млрд руб. по всем типам квалификационных группировок

[6]. Отсюда доля экспорта (592,5 млрд USD при средненежном курсе доллара 68,35 руб./USD) в 2022 г. в выручке всех организаций страны составила

$$D_{3,2022} = \frac{40,5 \text{ трлн руб.}}{324,3 \text{ трлн руб.}} = 12,5 \%$$

При такой доле экспорта в общей выручке организаций страны покупательная способность, оцененная по ППС, выглядит более обоснованной. Во многих работах, связанных с реальным развитием стран, рассматривается именно показатель ВВП по ППС [7, 8].

Доля экспорта в поступлениях в бюджет значительно выше в связи с экспортом нефтегазовых продуктов и повышенной долей налогов, включая НДС (налог на добычу полезных ископаемых).

В данной работе рассматривается развитие страны как крупномасштабной системы по показателю ВВП по ППС на основе траекторного подхода модели системной оптимизации. Рассматриваемая модель служит инструментом индикативного планирования для оценки перспектив роста экономики и потребности в значительных объемах ресурсов.

Задачу 1 в данной работе (или серии работ) будем решать в несколько этапов:

Подзадача 1.1. Определение необходимых темпов роста экономики в целом.

Подзадача 1.2. Определение необходимых темпов роста экономики по отраслям.

Подзадача 1.3. Определение необходимых ресурсов для обеспечения темпов роста экономики по отраслям.

Подзадача 1.4. Определение достаточности ресурсов для обеспечения темпов роста экономики по отраслям.

Подзадача 1.5. Управление: определение значимых параметров для эффективного управления ресурсами.



1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На текущий момент нет однозначного определения индикативного планирования. В рамках данной работы примем следующее определение: «Индикативное государственное планирование представляется как процесс формирования системы индикаторов (показателей) и разработка на их основе экономических мер государственного воздействия на экономические процессы для достижения установленных показателей» [9].

В работах О. О. Смирновой [10, 11] рассмотрены модели индикативного планирования с адаптацией к национальным условиям. Показаны проблемы индикативного планирования и недостатки системного научно-методического подхода в этой области. Для индикативного планирования рекомендуется применять подход, который заключается в формировании системы показателей. На их основе разрабатывается комплекс мероприятий для достижения установленных целей. В качестве инструментов предлагается применять методы математического моделирования и балансовые расчеты для анализа ресурсного обеспечения. Это позволит выработать систему мер и управленческих решений.

В работах Ф. Ф. Пашенко и коллег [12–14] рассматривается комплекс моделей индикативного планирования, в том числе применительно к региональному развитию. В качестве примера рассматривается Хабаровский край.

Традиционная макроэкономическая двухфакторная модель Кобба – Дугласа рассматривает развитие производственного фактора Q в зависимости от двух основных ресурсов: трудовых и финансовых [15]:

$$Q = F L^\alpha K^\beta,$$

где F – общая производительность факторов; L – трудовые ресурсы; K – капитал; α – эластичность по труду; β – эластичность по капиталу.

Одним из простых, но эффективных методов, который предшествует планированию собственно индикаторов, является сценарный анализ с использованием когнитивных карт. Когнитивный подход позволяет выделить подмножество индикаторов с существенными связями (отношениями). В работе И. В. Чернова и коллег [16] рассматриваются когнитивные карты развития региона с выявлением возможностей роста. В статье [17] рассматривается построение когнитивных схем с выделением узвимостей.

В работах З. К. Авдеевой и коллег [18] рассматривается применение когнитивных карт для решения задач прогнозирования временных рядов. В статье [19] предлагается подход к поиску воз-

можности достижения целей развития со многими активными субъектами с использованием когнитивных карт. Выделены некоторые перспективные прикладные области, где могут быть востребованы указанные задачи: анализ обоснованности решений, разрешение проблемной ситуации, формирование коалиций заинтересованных сторон.

В работах А. А. Захаровой, А. Г. Подвесовского и коллег [20, 21] рассматриваются примеры построения сценариев стратегического управления слабоструктурированными социально-экономическими системами с применением нечетких когнитивных карт. Также можно упомянуть о возможности совместного использования визуальной аналитики и когнитивного подхода [22, 23]. Визуальная аналитика служит для предварительного (разведочного) анализа данных, связанных с показателями, и для формирования первичной структуры сценариев на основе сформулированных гипотез. Когнитивное моделирование – для уточнения и верификации сценариев и их динамического моделирования.

Сценарные подходы в реализации индикативного планирования на примере развития ЕАЭС описаны в работе Ф. И. Ерешко и коллег [24]. Для реализации сценариев используются имитационные модели.

В докладе А. Д. Цвиркуна и коллег [25] рассматриваются инструменты отраслевого развития высокотехнологичной отрасли: скользящее планирование и бюджетирование, программно-целевой подход, модели вычислимого общего равновесия (англ. *Computable General Equilibrium models*, CGE models), матрицы финансовых потоков (англ. *Social Accounting Matrix*, SAM), показывающие балансы доходов и расходов основных экономических агентов в базисном году. Указывается, что многие модели не обеспечены исходными данными, что существенно ограничивает их применимость.

В работе Н. К. Обросовой и А. А. Шананина [26] рассматриваются отраслевые индикаторы развития (на примере обрабатывающей промышленности). В качестве модели используется функция с постоянной эластичностью (англ. *Constant Elasticity of Substitution*, CES). Во многих работах рассматривается CES-функция с двумя ресурсами: $B_1 = K$ – капитал и $B_2 = L$ – труд. В общем виде CES-функция с n входами (ресурсами) записывается в виде

$$Q = F \left(\sum_{i=1}^n w_i B_i^r \right)^{\frac{1}{r}},$$

где Q – выпуск продукции; F – общая производительность факторов; w_i – доля i -го входа ($\sum w_i = 1$);

B_i – количество i -го фактора (ресурса); r – параметр замещения.

В. Г. Варнавский [27] рассматривает среднесрочные тренды развития мировой экономики и выделяет следующие драйверы роста: глобализацию, информационно-коммуникационные технологии («компьютер»), открытие миру Китая, труд и производительность, соответствие институтов мировым стандартам. Первые три драйвера анализируются в публикации более подробно.

В работах В. М. Глушкова [28, 29], В. С. Михалевича [30] рассматривается модель системной оптимизации. Основная идея такова: улучшение всех параметров системы для достижения целей.

В работах В. А. Ирикова, В. Н. Буркова [31], В. Н. Тренева рассматривается траекторный подход модели системной оптимизации. Данное направление не получило широкого распространения с переходом российской экономики к рыночным отношениям. В 1990-е гг. основным дефицитным ресурсом было финансирование, другие ресурсы стали избыточными или как минимум не дефицитными. Модель системной оптимизации в условиях заменимости ресурсов с финансовым эквивалентом сводилась к задаче одноресурсной оптимизации. В настоящее время развитие экономики требует учета ограничивающих ресурсов в явном виде, особенно при существующих ограничениях в международной торговле.

В работе [32] рассматривается применение модели системной оптимизации для развития энергетики страны. Основные рассматриваемые ресурсы: инвестиции, кадры, металл, оборудование. В работах В. А. Ирикова [33, 34] рассматривается применение модели системной оптимизации к отраслевому и региональному развитию. В модели системной оптимизации для увеличения степени достижения целевой точки λ^* рассматриваются следующие возможности:

- Использование дополнительного ресурса; причем дополнительные неограничивающие ресурсы не повлияют на λ^* (будут излишними), если не выделен дополнительный ограничивающий ресурс.

- Обмен ресурсами: увеличение дефицитного ресурса за счет недефицитного (неограничивающего).

- Повышение эффективности путем изменения технологий; учитывается в изменении (уменьшении) удельных норм расхода.

- Изменение целевой точки (точки идеала).

Логика траекторного подхода модели системной оптимизации соответствует п 6. Федерального закона от 28.06.2014 N 172-ФЗ «О стратегическом

планировании в Российской Федерации» [35]: «Принцип результативности и эффективности стратегического планирования означает, что выбор способов и методов достижения целей социально-экономического развития и обеспечения национальной безопасности Российской Федерации должен основываться на необходимости достижения заданных результатов с наименьшими затратами ресурсов в соответствии с документами стратегического планирования, разрабатываемыми в рамках планирования и программирования.»

В работе [36] рассматривается система управления инновационным развитием как средство увеличения темпов выхода России из кризисной ситуации.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача роста ВВП описывается критерием

$$\Delta GDP \rightarrow \max, \quad (1)$$

где GDP – ВВП (англ. *Gross Domestic Product*).

Параметрами управления являются темпы роста показателей нижнего уровня. Для ВВП это темпы роста ВДС по отраслям. Для ВДС это темпы роста добавленных стоимостей по предприятиям.

Показатель ВВП формируется суммой ВДС по отраслям. В формуле оценки ВВП для упрощения ее вида опустим индекс периодов (годов) t :

$$GDP = \sum_j VA_j + VA_0, \quad j = 1, \dots, J,$$

где VA – валовая добавленная стоимость; j – индекс отрасли; VA_0 – чистые налоги на продукты, для России они составляют около 10 % ВВП.

Связь величины добавленной стоимости отрасли и результатов работы отдельных предприятий можно установить соотношением

$$VA_j = \sum_i VA_{ji}, \quad (2)$$

где VA_{ji} – добавленная стоимость отдельного предприятия; i – индекс предприятия.

Величину добавленной стоимости отрасли можно описать динамической зависимостью

$$VA_j(t) = VA_j(t-1)(1 + r_{VA,j}(t)),$$

где $r_{VA,j}$ – темп прироста добавленной стоимости отрасли.

Темп прироста отрасли можно разделить на две составляющие:

- темп прироста инерционный, по статистике прошлых лет;

- изменение темпа роста благодаря управлению.



В качестве инерционного варианта будем рассматривать среднегодовой темп роста g (CAGR), определяемый из уравнения

$$VA_j(t) = VA_j(t - \tau)(1 + g_j(t))^\tau.$$

Здесь

$$g_j(t) = (VA_j(t) / VA_j(t - \tau))^{(1/\tau)} - 1,$$

где $g_j(t)$ – темп прироста добавленной стоимости отрасли; τ – интервал анализа данных.

В общем случае темп $g_j(t)$ зависит от периода t и можно записать $g_j(t, \tau)$, но в данной работе предполагается проводить расчеты при постоянном значении τ и не перегружать формулы параметрами.

Дополнительно введем управление – изменение темпов роста $u_j(t)$. Тогда

$$r_{VA,j}(t) = (1 + g_j(t))(1 + u_j(t)) - 1,$$

где $r_{VA,j}$ – темп прироста добавленной стоимости отрасли с учетом управления.

Запишем ВВП через период T как сумму валовых добавленных стоимостей отраслей, считая $t = 0$ периодом с последними фактическими данными:

$$GDP(T) = \sum_j VA_j(T) + VA_0(T),$$

$$GDP(T) = \sum_j VA_j(0) \prod_{t=1}^T (1 + g_j(t))(1 + u_j(t)) + VA_0(T).$$

Задача (1) сводится к задаче увеличения темпов роста отдельных отраслей (Подзадача 1.2 во введении)

$$(1 + g_j(t))(1 + u_j(t)) \rightarrow \max, j = 1, \dots, J,$$

при ограничениях

$$\mathbf{A}(t)\mathbf{VA}(t) \leq \mathbf{B}^H(t),$$

где \mathbf{A} – матрица удельных расходов ресурсов; $\mathbf{VA}(t)$ – вектор ВДС отраслей; \mathbf{B}^H – вектор наличия ресурсов.

Сложность применения формулы (2) заключается в отсутствии информации о добавленной стоимости отдельного предприятия. Поэтому рассмотрим вариант связи добавленной стоимости с выручкой предприятий:

$$VA_j = k_{VA,j} R_j + \varepsilon_j,$$

где R – выручка; k_{VA} – коэффициент добавленной стоимости в выручке; ε – погрешность.

Величина $k_{VA,j}$ может быть определена регрессионными зависимостями по фактическим данным прошлых периодов. Таким образом, сложность (невозможность) получения информации о добав-

ленной стоимости отдельных предприятий можно заменить на задачу определения средних коэффициентов добавленной стоимости в выручке по отрасли в предположении, что в рамках отрасли коэффициенты добавленной стоимости отдельных предприятий находятся в некоторой окрестности средних коэффициентов добавленной стоимости отрасли. То есть

$$VA_j = \sum_i VA_{ji} = \sum_i k_{VA,ji} R_{ji} = k_{VA,j} R_j + \varepsilon_j.$$

Суммарная выручка отрасли представляет собой сумму выручек отдельных предприятий отрасли:

$$R_j = \sum_i R_{ji}, j = 1, \dots, J,$$

где i – индекс предприятия в отрасли j ; J – количество отраслей.

Представим ВВП через связь валовых добавленных стоимостей отраслей и выручек предприятий, считая $t = 0$ периодом с последними фактическими данными:

$$GDP(T) = \sum_j \left\{ R_j(0) k_{VA,j} \prod_{t=1}^T (1 + g_j(t))(1 + u_j(t)) \right\} + VA_0(T).$$

Таким образом, наблюдаем многоуровневую систему (рис. 1). На верхнем уровне – сводный показатель ВВП страны в целом, на следующем слое – виды деятельности с декомпозицией по отраслям, далее – предприятия и проекты развития.

3. МОДЕЛЬ РЕСУРСОВ

Выделим несколько ресурсных ограничений, существенных для решения данной задачи:

В1. Инвестиции.

В2. Кадры.

В3. Энергоресурсы.

В4. Ключевые виды сырья и материалов.

В5. Земля.

Перечень ресурсов может быть расширен. В данной работе рассматриваются ресурсы B_1 (инвестиции в основной капитал) и B_2 (кадры), приводятся соответствующие расчеты.

Величина чистых инвестиций в основной капитал (слово «чистые» подразумевает учет использования амортизации текущего периода в покупке внеоборотных активов) определяется формулой

$$Inv_{FA,j} = FA_{j,t} - FA_{j,t-1},$$

где Inv_{FA} – чистые инвестиции в основной капитал; FA – внеоборотные активы.



Рис. 1. Многоуровневая система «страна – отрасль – предприятие – проект»

Однако помимо инвестиций в основной капитал необходимы инвестиции в оборотный капитал, особенно на этапах роста выручки компании для опережающего обеспечения запасами непрерывного производства. Тогда полные инвестиции определяются как

$$Inv_{ji} = IC_{ji,t} - IC_{ji,t-1},$$

где IC – инвестированный капитал. Величина инвестированного капитала определяется активами за вычетом кредиторской задолженности:

$$IC_j = A_j - CL_j = FA_j + CA_j - CL_j,$$

$$Eq_j = FA_j + CA_j - CL_j - D_j = IC_j - D_j,$$

где A – активы; Eq – собственный капитал; CA – текущие (оборотные) активы; CL – текущие пассивы; D – долгосрочные пассивы.

Показателем эффективности, увязывающим прирост добавленной стоимости и инвестиций, являются удельные капиталовложения в прирост добавленной стоимости

$$a_{1,j} = IC_j / GVA_j,$$

где GVA_j – ВДС отрасли j .

На уровне предприятий можно использовать дополнительный коэффициент удельных капиталовложений в прирост выручки

$$\begin{aligned} \bar{a}_{1,j} &= IC_j / R_j = \\ &= (IC_j / GVA_j) \times (GVA_j / R_j) = a_{1,j} \times k_{VA,j}. \end{aligned}$$

Потребность в кадрах определяется производительностью труда по добавленной стоимости:

$$a_{2,j} = B_{2,j} / GVA_j.$$

На уровне предприятий можно использовать дополнительный коэффициент производительности труда по выручке

$$\begin{aligned} \bar{a}_{2,j} &= B_{2,j} / R_j = \\ &= (B_{2,j} / GVA_j) \times (GVA_j / R_j) = a_{2,j} \times k_{VA,j}. \end{aligned}$$

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В разных источниках в период подготовки данной статьи содержались несколько различающиеся данные относительно начального рейтинга стран по ВВП по ППС и его количественного измерения.

Согласно статье [37] сайта www.worldeconomics.com, по оценке индикатора ВВП по ППС за 2023 г. Китай, США и Индия занимают первые три места с большим отрывом от других стран; Япония, Россия, Индонезия, Германия последовательно занимают с четвертого по седьмое место. В статье указано, что авторы проводят дооценку показателей в связи с нерегистри-



руемой экономической деятельностью (*informal economic activity*), а также с недостаточностью или возможным искажением официальных статистических данных по странам. Приводятся прогнозные оценки роста ВВП на 2025–2030 гг. на основе среднегодовых темпов роста за предыдущее десятилетие.

Данные, которые приводит Мировой банк по индикатору «GDP, PPP (current international \$)» [38] с 1990 по 2022 г., отличаются в различных версиях. В версии данных от 28.03.2024 г. в 2022 г. Россия занимала шестое место с ВВП по ППС 5 082 млрд USD (табл. 2). В версии данных от 30.05.2024 г. Россия находится на четвертом месте по ВВП по ППС, с данными за 2022 г. 5 988 млрд USD. Изменение в версиях данных составило 17,8 % из-за изменения коэффициента ППС с $K_{PPP,0a} = 0,4409$ до $K_{PPP,0b} = 0,3742$. Показатель CAGR в табл. 2 включает инфляцию.

В данной работе основные расчеты по оценке роста отраслей и дополнительных ресурсов для выхода на среднемировые темпы роста экономики существенно не изменяются из-за корректировки данных коэффициента ППС K_{PPP} .

В отношении России исходные данные по ВДС по видам деятельности и отраслям представляет Росстат [39].

5. МОДЕЛЬ И РАСЧЕТЫ

5.1. На уровне стран

Рассмотрим задачу: какое должно быть дополнительное ускорение роста страны 1 (России) для опережения другой страны (с индексом 2). Путем несложных преобразований формул роста ВВП

для стран с индексами 1 и 2 получаем, что для того, чтобы $GDP_{1,T} \geq GDP_{2,T}$, необходимо

$$GDP_{1,T} = GDP_{1,0} (1 + g_1)^T (1 + u_1)^T, \quad (3)$$

$$GDP_{2,T} = GDP_{2,0} (1 + g_2)^T (1 + u_2)^T,$$

$$u_1 \geq (1 + u_2) \left(\frac{GDP_{1,0}}{GDP_{2,0}} \right)^{-1/T} \left(\frac{1 + g_1}{1 + g_2} \right)^{-1} - 1, \quad (4)$$

где g – это CAGR; u_1 и u_2 – управление темпом роста g стран 1 и 2 соответственно; T – период анализа.

Расчеты по данным Мирового банка от 28.03.2024 г. по формулам (3) и (4) показывают, что дополнительное ускорение среднегодового роста страны 1 (России) составляет $u_1^{цел} = 2,12\%$ при $u_2 = 0\%$ с 2023 по 2030 г. Отметим, что для решения этой задачи существенную роль играет не само ускорение роста отдельной страны, а разница между значениями показателя CAGR сравниваемых стран.

Национальными целями России по росту ВВП России до 2030 г. установлен целевой индикатор: «обеспечение темпа роста валового внутреннего продукта страны выше среднемирового при сохранении макроэкономической стабильности» [40]. Расчеты авторов по данным Мирового банка [41] показывают, что рост мировой экономики составил 2,76 % за период 2011–2022 гг.

Среднегодовой рост показателя CAGR за 2011–2022 гг. валового внутреннего продукта в постоянных ценах составил 1,01 %, рост ВДС в постоянных ценах составил 1,24 % (данные для инерционного сценария). Отличие в росте ВВП и ВДС заключается в уменьшении чистых налогов на продукты. Анализировать налоги на продукты в этой

Таблица 2

ВВП по ППС некоторых стран по данным Мирового банка

Место, 2022 г.	Страна	ВВП по ППС, 2000 г., млрд USD	ВВП по ППС, 2012 г., млрд USD	ВВП по ППС, 2022 г., млрд USD	CAGR, 2012–2022 г., %
Мир		49 258	100 816	171 531	5,46 %
1	Китай	3 683	15 213	31 773	7,64 %
2	США	10 251	16 254	25 440	4,58 %
3	Индия	2 212	6 163	12 998	7,75 %
4	Российская Федерация	1 001	3 480	5 988	5,58 %
5	Япония	3 461	4 800	5 862	2,02 %
6	Германия	2 236	3 487	5 582	4,82 %
7	Бразилия	1 582	2 992	4 120	3,25 %
8	Индонезия	1 002	2 408	3 980	5,15 %

работе не будем, но отметим, что «это налоги, величина которых пропорциональна количеству или стоимости товаров и услуг, производимых, продаваемых или импортируемых резидентами. К ним относятся: налог на добавленную стоимость, акцизы, экспортные пошлины и налоги на импортные товары и услуги» [42].

Дополнительный рост ВВП $u_1^{\text{цел}} = 2,12\%$ будет рассматриваться входным параметром для декомпозиции темпов роста по видам деятельности и отраслям как для обеспечения целевого индикатора достижения среднемирового темпа роста экономики, так и для решения Задачи 1 роста по показателю ВВП по ППС.

5.2. На уровне видов деятельности и отраслей

Росстат предоставляет информацию по 54-ти отраслям в соответствии с классификатором ОКВЭД-2 [43]. Нумерация отраслей производится в сочетании буквы раздела (от А до Т) и номера отрасли (от 1 до 99). В ряде случаев отрасли укрупняются: J (62–63) «Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги; деятельность в области информационных технологий» – это сумма отраслей J 62 «Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги» и J 63 «Деятельность в области информационных технологий».

На рис. 2 выделены некоторые отрасли с крупным приростом (более 100 млрд руб.) в постоянных ценах 2021 г. (далее – основные) и средним темпом роста более 1,5 % в год.

Выделим некоторые отрасли с наибольшим абсолютным приростом ВДС и высоким темпом роста:

- Раздел К «Деятельность финансовая и страховая (прежде всего, деятельность холдингов)»;
- Раздел L «Деятельность по операциям с недвижимым имуществом»;
- J (62–63) «Разработка компьютерного программного обеспечения, консультационные услуги в данной области и другие сопутствующие услуги; деятельность в области информационных технологий»;
- С 25 «Производство готовых металлических изделий, кроме машин и оборудования»;
- С 20 «Производство химических веществ и химических продуктов»;
- С 21 «Производство лекарственных средств и материалов, применяемых в медицинских целях»;
- R 93 «Деятельность в области спорта, отдыха и развлечений»;
- М 71 «Деятельность в области архитектуры и инженерно-технического проектирования; технических испытаний, исследований и анализа».

Отметим, что все основные растущие отрасли можно отнести к «умным» отраслям: это сложное производство или управление.

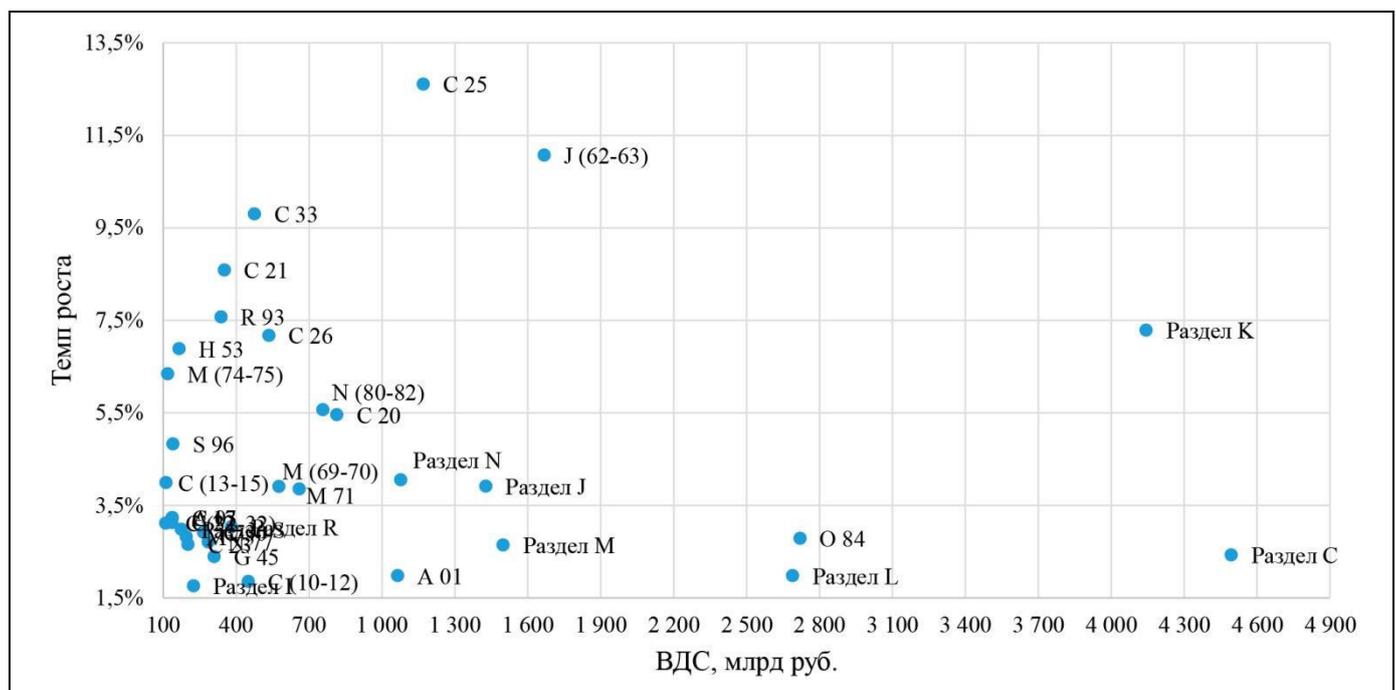


Рис. 2. Темп роста и прирост ВДС в постоянных ценах некоторых отраслей



6. СЦЕНАРИИ ПРОГНОЗА РОСТА

Рассматриваются несколько сценариев роста:

- Инерционный сценарий роста по отраслям с темпом роста, соответствующим прежним периодам.
- Ускоренный рост на одинаковую величину по каждой отрасли (все отрасли ускорятся одинаково).
- Ускоренный рост, прирост роста определяется предыдущим ростом (пропорционален ему).

Для данной работы это иллюстрация возможных структурных сдвигов по отраслям. Многие факторы в каждой отрасли могут повлиять на развитие, отклоняя его от инерционного сценария: внешние воздействия, колебания валютного курса, экспортно-импортные возможности, технологические инновации и пр.

На рис. 3 и в табл. 3 показаны результаты сценария ускоренного роста отраслей экономики. Для наглядности проведена группировка отраслей по размеру (основные – с приростом ВДС более 100 млрд руб. за 2011–2022 г.) и по темпу роста (высокий темп – более 2 %, низкий темп – от 1 до 2 %, нет роста – менее 1 %). Из графика видно, что основной прирост суммарного ВДС обеспечивают основные (крупные) отрасли с высокими темпами роста. В расчетах данного сценария принято, что управление (дополнительный прирост отрасли) пропорционально инерционному росту на фактическом интервале. Отрасли без роста и с малым

ростом не обеспечивают значительного прироста суммарного ВДС (а значит, и ВВП). Основной (ускоренный) прирост обеспечивают отрасли с быстрым ростом. В таблицах виды деятельности с кодами от М до S не показаны в целях сокращения объема статьи, названия видов деятельности сокращены.

Отрасли машиностроения (С 27 «Производство электрического оборудования», С 28 «Производство машин и оборудования, не включенных в другие группировки», С 29 «Производство автотранспортных средств, прицепов и полуприцепов»), а также Раздел Д «Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха», Раздел Н «Транспортировка и хранение», Раздел I «Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания», J 61 «Деятельность в сфере телекоммуникаций», М 72 «Научные исследования и разработки», Р 85 «Образование» относятся к группе «неосновная, нет роста». Это важные отрасли, часто – инфраструктурные. Но эти отрасли развивались недостаточно быстро в прошлом десятилетии, и их роль значительно уменьшилась по сравнению с почти самодостаточной экономикой Советского Союза или (как телекоммуникации / сотовая связь) перестали расти после скачка. Образование создает фундамент для расшивки узкого места по обеспечению кадровыми ресурсами и производительности труда. Не будем в данной работе пересматривать сценарий ускоренного роста с пропорциональным распределением темпов роста, но для исследования более

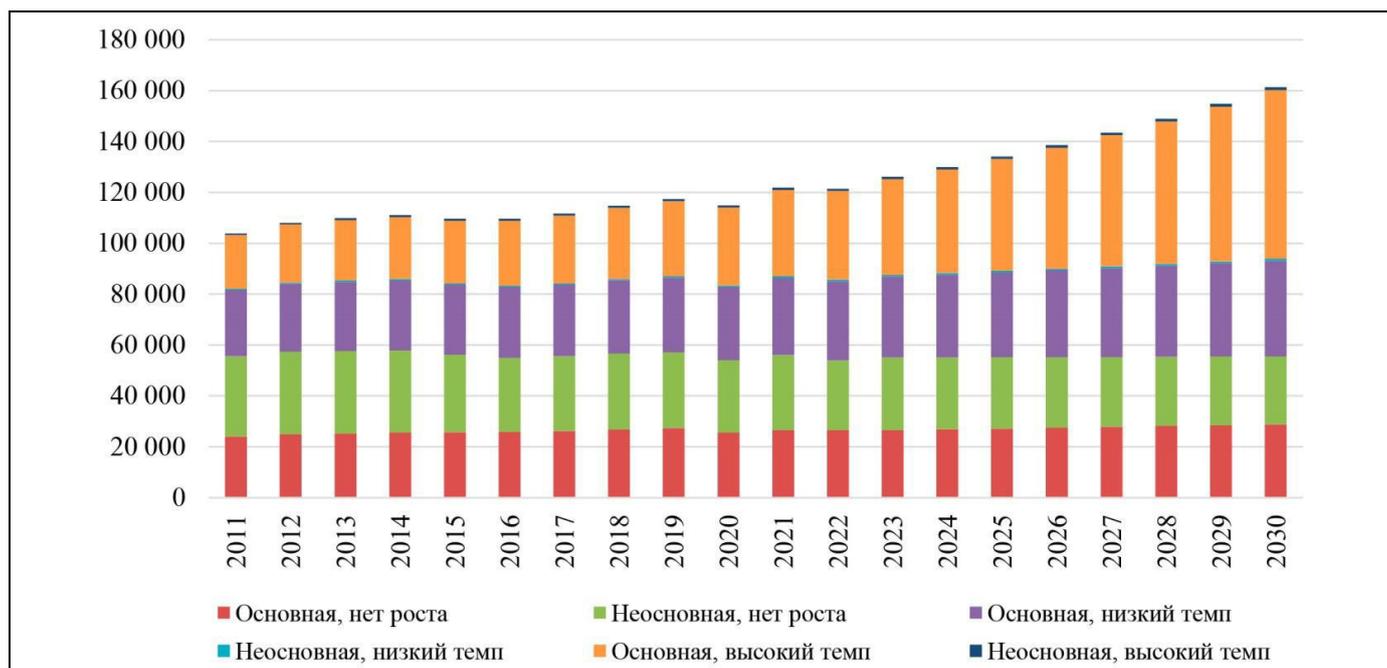


Рис. 3. Сценарий ускоренного роста ВДС по группам роста (в ценах 2021 г., млрд руб.)

Оценка роста ВВП по ППС, соответствующая сценарию ускоренного роста, в постоянных ценах 2021 г.

Код	Отрасль	Показатель		
		2022 г., млрд руб.	2030 г., млрд руб.	Группа
Валовой внутренний продукт в постоянных ценах		134 081	173 604	Свод
Валовая добавленная стоимость в постоянных ценах		121 436	161 391	Свод
A	Сельское хозяйство	5 720	7 001	Сумма
B	Добыча полезных ископаемых	16 201	17 213	Основная, нет роста
C	Обрабатывающие производства	16 783	27 043	Сумма
D	Обеспечение электрической энергией	2 984	3 003	Неосновная, нет роста
E	Водоснабжение	591	586	Сумма
F	Строительство	6 240	7 424	Основная, низкий темп
G	Торговля	14 121	14 264	Сумма
H	Транспортировка	7 617	8 664	Сумма
I	Гостиницы и предприятия общественного питания	1 078	1 412	Основная, низкий темп
J	Информация и связь	3 518	8 179	Сумма
K	Деятельность финансовая и страховая	6 687	14 747	Основная, высокий темп
L	Операции с недвижимым имуществом	12 719	15 597	Основная, низкий темп

реалистичных сценариев роста российской экономики с существенной степенью автономности значимость этих отраслей должна быть обозначена в стратегиях развития страны.

В качестве примера приведем целевой сценарий по изменению ВДС по сельскому хозяйству (Раздел А по классификатору ОКВЭД-2; на рис. 4 ось Y) и по деятельности в области информации и связи (Раздел J по классификатору ОКВЭД-2; на рис. 4 ось X). Эти отрасли были выбраны для графика, потому что в прошлом они развивались с разной скоростью, и в целевом сценарии их рост также будет различаться. Кружочками обозначены фактические данные за 2011–2023 гг., крестики – прогнозные данные целевого сценария за 2024–2030 гг.

На рис. 4 показаны ресурсные ограничения для двух рассмотренных отраслей в 2030 г. по следующим ресурсам:

- по инвестициям в основной капитал B_1 (зеленый квадрат);
- по численности занятых B_2 (красный треугольник).

Ресурсные ограничения на рис. 4 рассчитаны как произведение оценки ВДС для инерционного сценария и удельных ресурсов (по численности и инвестициям) для конечного рассматриваемого периода (2030 г.). Удельные ресурсы по численно-

сти (производительность труда по добавленной стоимости $a_{2,j}$) оценены по инерционному сценарию с учетом повышения производительности труда.

По рис. 4 видно, что целевые значения по росту отраслей не будут достижимы с текущим объемом ресурсов в инерционном сценарии удельных расходов (технологий использования ресурсов). Необходимо дополнительное выделение ресурсов и/или значительное повышение эффективности использования ресурсов (изменение матрицы A , включающей удельные инвестиции, производительность труда).

Неявное предположение по ресурсам можно сформулировать так: ресурс взаимозаменяемый для различных отраслей. Для инвестиций это предположение выглядит разумным. Для численности занятых с различной квалификацией по разным специальностям это предположение может быть выполнено при значительных усилиях по подготовке и переподготовке кадров.

7. РАСЧЕТЫ ПОТРЕБНОСТИ В РЕСУРСАХ

Росстат определяет инвестиции в основной капитал как «совокупность затрат, направленных на строительство, реконструкцию (включая расширение и модернизацию) объектов, которые приводят

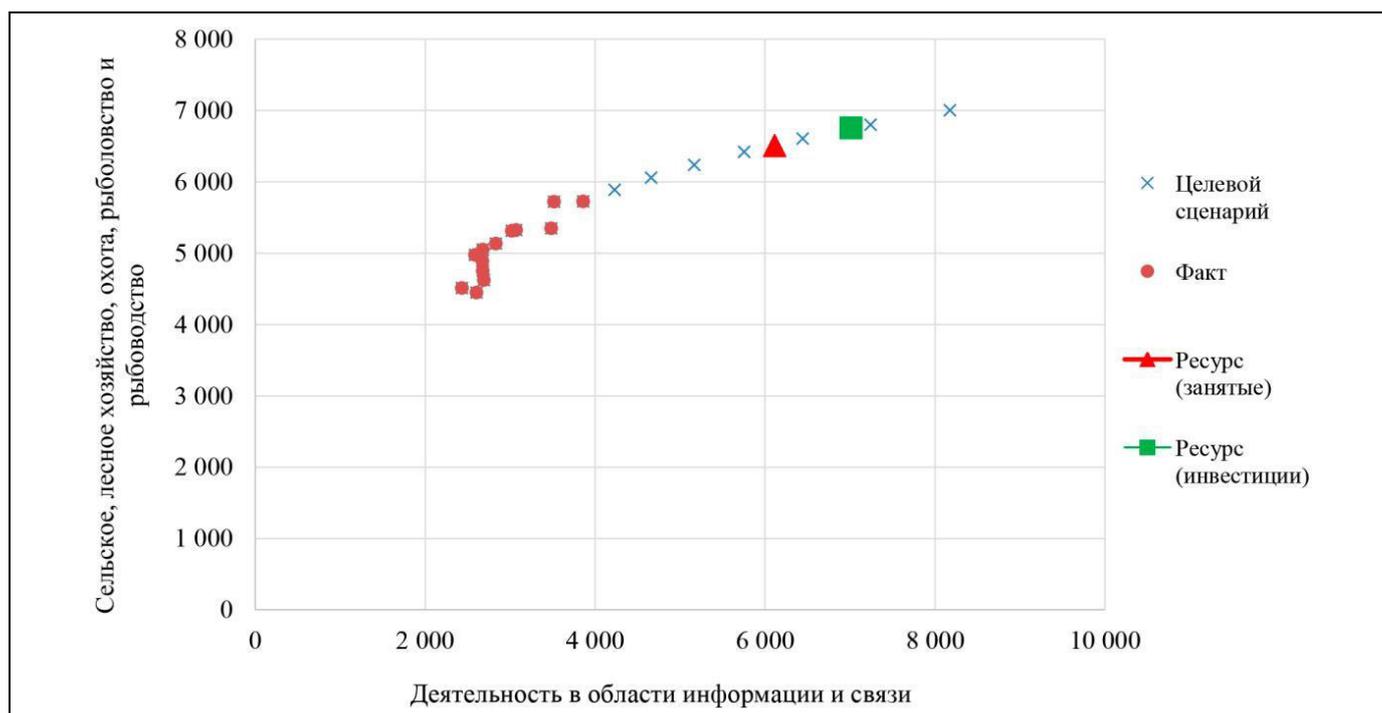


Рис. 4. Факт и целевой сценарий изменения ВДС, млрд руб.

к увеличению их первоначальной стоимости, приобретение машин, оборудования, транспортных средств, производственного и хозяйственного инвентаря, бухгалтерский учет которых осуществляется в порядке, установленном для учета вложений во внеоборотные активы, инвестиции в объекты интеллектуальной собственности (с 2013 г.); культивируемые биологические ресурсы» [44].

Также Росстат выделяет инвестиции в производственные нефинансовые активы. Данный показатель составил от 1,0 до 2,3 % в период 2013–2023 гг. от значения показателя «инвестиции в нефинансовые активы – всего», в данной работе его рассматривать не предполагается.

Инвестиции в основной капитал включают следующие группировки [45]: инвестиции в здания (кроме жилых) и сооружения, в жилые здания и помещения, на улучшение земель, в машины, оборудование, транспортные средства, в объекты интеллектуальной собственности, прочие инвестиции в основной капитал.

Обратим внимание, что в составе показателя «инвестиции» Росстат отдельно приводит информацию о вложениях (инвестициях) в оборотный капитал. В данной работе инвестиции в оборотный капитал не рассматриваются.

Анализ ВДС и инвестиций по видам деятельности (отраслям) должен обеспечить информацию о средних удельных инвестициях в прирост ВДС, а затем дать информацию о возможных отраслевых приоритетах.

Содержательно накопленные инвестиции формируют первоначальную стоимость основных средств (зданий и сооружений, оборудования), которая служит для производства продукции. И именно завершённое строительство с вводом основных средств позволяет выпускать продукцию. Авторами были проведены дополнительные исследования (которые решено не включать в данную работу) о связи с ВДС по отраслям не только инвестиций в основной капитал, но и накопленных инвестиций в основной капитал. Проведенный анализ показал, что есть сильная зависимость инвестиций в основной капитал и среднегодовых накопленных инвестиций от ВДС; для упрощения в текущей работе используются ежегодные инвестиции в основной капитал.

Можно выделить капиталоемкие отрасли по данным Росстата (табл. 4) – обеспечение электрической энергией, водоснабжение, транспорт – а также некапиталоемкие – торговля, деятельность гостиниц и предприятий общественного питания, деятельность финансовая и страховая, государственное управление.

Данные о среднегодовой численности занятых по видам экономической деятельности с 2017 г. приводит Росстат [46]. Оценка кадровых ресурсов на обеспечение роста может быть выполнена по средней производительности труда по отраслям.

На основании приказа [47] рассчитаем показатели $a_{2,j}$ удельных расходов ресурса B_2 (труда). Значения параметров $a_{2,j}$ будут обратными к про-

Удельные коэффициенты по ресурсам в 2023 г. в ценах 2021 г.

Код	Отрасль	Показатель					
		ВДС, 2023 г., млрд руб.	CAGR, %	Всего инвестиций в основной капитал, 2023 г., млрд руб.	$a_{1,i}$ – инвестиции, руб./ВДС, руб.	Производительность труда по ДС, 2023 г., оценка, тыс. руб./чел.	$a_{2,i}$ – трудоемкость (численность/ВДС), 2023 г., оценка, чел./млн руб.
Всего		126 088	1,65 %	27 432,3	0,218	1 737	0,576
A	Сельское хозяйство	5 723,6	1,85 %	1 238,7	0,216	1 347	0,742
B	Добыча полезных ископаемых	15 869,0	0,82 %	4 161,8	0,262	13 467	0,074
C	Обрабатывающие производства	17 937,2	2,24 %	4 051,7	0,226	1 719	0,582
D	Обеспечение электрической энергией	2 985,2	0,06 %	1 493,9	0,500	1 946	0,514
E	Водоснабжение	573,3	0,05 %	343,1	0,598	861	1,161
F	Строительство	6 649,4	1,11 %	1 214,1	0,183	962	1,040
G	Торговля	15 047,2	-0,55 %	877,6	0,058	1 056	0,947
H	Транспортировка	7 857,8	0,75 %	4 484,7	0,571	1 302	0,768
I	Гостиницы и предприятия обществ. питания	1 185,0	1,76 %	174,7	0,147	577	1,733
J	Информация и связь	3 861,3	3,61 %	1 019,4	0,264	2 244	0,446
K	Деятельность финансовая и страховая	7 266,5	7,29 %	882,7	0,121	5 749	0,174
L	Операции с недвижимым имуществом	12 814,7	1,98 %	3 319,0	0,259	7 039	0,142

изводительности труда. Например, $a_{2,B} = 1/13\,467$ тыс. руб./чел. по отрасли $j = \text{«В»}$ («Добыча полезных ископаемых») и $a_{2,I} = 1/577$ тыс. руб./чел. по отрасли $j = \text{«I»}$ («Деятельность гостиниц и предприятий общественного питания»).

Обратим внимание на значительное отличие значений параметров по различным видам деятельности. Виды деятельности с большой трудоемкостью (малой производительностью труда): водоснабжение, деятельность гостиниц и предприятий общественного питания, образование. Виды деятельности с малой трудоемкостью (большой производительностью труда): добыча полезных ископаемых, деятельность финансовая и страховая, деятельность по операциям с недвижимым имуществом.

В табл. 4 показаны некоторые исходные данные для расчета: начальные данные, рост, удельные коэффициенты по ресурсу B_1 (инвестиции) и ресурсу B_2 (кадры).

В табл. 5 приведены расчеты оценки потребности в инвестициях в основной капитал для целевого и инерционного сценария роста (Подзадача 1.3 во введении). Обратим внимание, что разница в оценке потребности в суммарных инвестициях в

основной капитал в инерционном и целевом сценарии небольшая.

В табл. 6 показана оценка потребности в кадрах по видам деятельности. Она сделана на основании оценки целевого сценария ВДС и производительности труда по отраслям

$$B_{2,j}(t) = GVA_j(t) a_{2,j}(t),$$

$$a_{2,j}(t) = a_{2,j}(t-1)(1 + g_{a_{2,j}}),$$

где $B_{2,j}$ – численность занятых по отраслям; GVA_j – ВДС отрасли j ; $a_{2,j}$ – удельная трудоемкость отрасли j ; $g_{a_{2,j}}$ – темп роста производительности труда; j – индекс отрасли; t – индекс времени.

Инерционный прогноз занятых показывает незначительный рост $B_{2,j}(t)$ к 2030 г. Оценка потребности в кадрах для целевого сценария $B_{2,j}^H(t)$ показывает, что нехватка кадров к 2030 г. составит около 4,8 млн чел. (Подзадача 1.4 во введении). Можно выделить отрасли с особенно большим ожидаемым дефицитом кадров: обрабатывающие производства, торговля, деятельность в области информации и связи, деятельность административная.



Таблица 5

**Оценка потребности в инвестициях в основной капитал для целевого сценария роста
в ценах 2021 г., млрд руб.**

Код	Отрасль	Показатель			
		2024 г., целевой сценарий	2030 г., целевой сценарий	Всего, целевой сценарий, 2024–2030 гг.	Всего, инерционный сценарий, 2024–2030 гг.
Потребность в инвестициях в основной капитал, всего		28 289,4	33 391,0	215 090	208 692
A	Сельское хозяйство	1 271,5	1 500,1	9 682	9 394
B	Добыча полезных ископаемых	4 226,8	4 638,8	31 011	30 099
C	Обрабатывающие производства	4 321,9	5 489,8	34 077	33 051
D	Обеспечение электрической энергией	1 505,8	1 579,7	10 797	10 482
E	Водоснабжение	346,4	365,9	2 492	2 419
F	Строительство	1 236,7	1 380,9	9 154	8 884
G	Торговля	878,9	890,0	6 189	6 010
H	Транспортировка	4 547,7	4 955,0	33 240	32 264
I	Гостиницы и предприятия обществ. питания	179,1	207,9	1 353	1 312
J	Информация и связь	1 090,0	1 550,4	9 093	8 815
K	Деятельность финансовая и страховая	954,1	1 521,2	8 535	8 269
L	Операции с недвижимым имуществом	3 409,9	4 009,5	25 921	25 150

Таблица 6

Оценка потребности в кадрах, тыс. чел.

Код	Отрасль	2022 г.	2023 г., оценка	2024 г., целевой сценарий	2030 г., целевой сценарий	Прирост, 2023–2030 гг.
Нехватка кадров		–	–	400	4 829	–
Всего, инерционный сценарий		71 217	71 066	70 985	70 738	0,995
Всего, целевой сценарий		71 156	71 066	71 386	75 549	1,097
A	Сельское хозяйство	4 466	4 353	4 274	3 846	0,884
B	Добыча полезных ископаемых	1 195	1 209	1 237	1 419	1,174
C	Обрабатывающие производства	10 003	9 970	10 120	12 015	1,205
D	Обеспечение электрической энергией	1 560	1 546	1 523	1 390	0,899
E	Водоснабжение	706	698	686	617	0,883
F	Строительство	6 552	6 600	6 586	6 506	0,986
G	Торговля	13 251	13 165	13 006	12 159	0,924
H	Транспортировка	5 751	5 859	6 008	7 028	1,200
I	Гостиницы и предприятия общественного питания	1 862	1 905	1 933	2 115	1,111
J	Информация и связь	1 619	1 656	1 745	2 680	1,619
K	Деятельность финансовая и страховая	1 303	1 280	1 267	1 191	0,930
L	Операции с недвижимым имуществом	1 856	1 841	1 847	1 880	1,021

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается задача анализа и прогноза целевых индикаторов страны. Для решения предлагается многоуровневая модель индикативного планирования.

Рассматривается рейтинг страны по индикатору ВВП по ППС. Для отдельных отраслей проведены оценки необходимого роста ВВП и валовой добавленной стоимости, а также необходимых ресурсов по инвестициям в основной капитал и численности занятых на основе данных Мирового банка и Росстата.

Основной вывод: целевой сценарий роста валовой добавленной стоимости не реализуется при инерционном сценарии изменения трудоемкости (производительности труда). Из рассмотренных ресурсов именно кадровые ограничения будут препятствием для достижения целевых установок.

Необходимы меры по ускоренному росту производительности труда, особенно в области информации и связи, в обрабатывающих производствах, торговле, в административной деятельности (Подзадача 1.5 во введении).

Анализируемая модель позволяет рассмотреть сценарии изменения целевых установок, ресурсные ограничения, изменения эффективности использования ресурсов.

Представленные результаты индикативного планирования целевого роста экономики России относятся только к двухуровневой экономической системе: стране в целом и отраслям. Анализ на уровне организаций и проектов – задача последующих публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Перечень поручений по реализации Послания Президента Федеральному Собранию.* – 2024. – URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/73759> (дата обращения 15.04.2024). [List of directives on implementing the Presidential Address to the Federal Assembly. – 2024. – URL: <http://kremlin.ru/acts/assignments/orders/73759> (accessed April 15, 2024) (In Russian)]
2. *Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».* – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015>. [Decree of the President of the Russian Federation of 07.05.2024 No 309 «On the National Development Goals of the Russian Federation for the Period up to 2030 and for the Future until 2036». – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405070015> (In Russian)]
3. *ВДС коды ОКВЭД-2007 (с 2002 г.).* – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Rp8q2AB0/ВДС%20годы%20ОКВ> ЭД2007%20(с%202002%20г.).xls (дата обращения 15.04.2024). [Gross value added (GVA) codes OKVED-2007 (since 2002). – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Rp8q2AB0/ВДС%20годы%20ОКВЭД2007%20\(с%202002%20г.\).xls](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Rp8q2AB0/ВДС%20годы%20ОКВЭД2007%20(с%202002%20г.).xls) (accessed April 15, 2024) (In Russian)]
4. *ВВП годы (с 1995 г.).* – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VVP_god_s_1995-2023.xlsx (дата обращения 15.04.2024). [GDP years (since 1995). – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VVP_god_s_1995-2023.xlsx (accessed April 15, 2024) (In Russian)]
5. *Итоги внешней торговли со всеми странами.* – Федеральная таможенная служба. – URL: https://customs.gov.ru/storage/document/document_statistics_file/2024-02/13/Tcnc/страны122023.xlsx (дата обращения 15.04.2024). [Results of foreign trade with all countries. – Federal Customs Service. – URL: https://customs.gov.ru/storage/document/document_statistics_file/2024-02/13/Tcnc/страны122023.xlsx (accessed April 15, 2024) (In Russian)]
6. *Выручка (нетто) от продажи товаров, продукции, работ, услуг (за минусом налога на добавленную стоимость, акцизов и иных аналогичных обязательных платежей) по данным бухгалтерской отчетности с 2017 г.* – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/58235> (дата обращения 15.04.2024). [Revenue (net) from the sale of goods, products, works, services (net of value added tax, excise taxes and other similar mandatory payments) according to the financial statements since 2017. – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: <https://www.fedstat.ru/indicator/58235> (accessed April 15, 2024) (In Russian)]
7. *Варнавский В.Г.* Китайский феномен экономического роста // *Мировая экономика и международные отношения.* – 2022. – Т. 66, № 1. – С. 5–15. [Varnavsky, V.G. The Chinese Phenomenon of Economic Growth // *World Economy and International Relations.* – 2022. – Vol. 66, no. 1. – P. 5–15. (In Russian)]
8. *Кузнецов В.И., Ларионова Е.И., Чинаева Т.И.* Анализ экономики Китая в XXI веке // *Статистика и экономика.* – 2021. – Т. 18, № 2. – С. 57–70. [Kuznetsov, V.I. Larionova, E. I., Chinaeva, T.I. Analysis of China's Economy in the 21st Century // *Statistics and Economics.* – 2021. – Vol. 18, no. 2. – P. 57–70. (In Russian)]
9. *Смирнова О.О.* Основы стратегического планирования Российской Федерации. – М.: Издательский Дом «Наука», 2013. – 302 с. [Smirnova, O.O. Fundamentals of Strategic Planning of the Russian Federation. – Moscow: Nauka Publishing House, 2013. – 302 p. (In Russian)]
10. *Смирнова О.О.* Формирование отечественной модели индикативного планирования // *МИР (Модернизация. Инновации. Развитие).* – 2020. – Т. 11, № 3. – С. 266–279. [Smirnova, O.O. Formation of the Domestic Model of Indicative Planning // *MID (Modernization, Innovations, Development).* – 2020. – Vol. 11, no. 3. – P. 266–279. (In Russian)]
11. *Смирнова О.О.* Стратегическое индикативное планирование: принципы и возможности применения // *Инновации.* – 2020. – Т. 260, № 6. – С. 17–21. [Smirnova, O.O. Strategic Indicative Planning: Principles and Possibilities of Application // *Innovations.* – 2020. – Vol. 260, no. 6. – P. 17–21. (In Russian)]



12. Левинталь А.Б., Ефременко В.Ф., Гусев В.Б. и др. Индикативное планирование и проведение региональной политики / Под ред. А.Б. Левинталь, Ф.Ф. Пащенко. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 368 с. [Levintal, A.B., Efremenko, V.F., Gusev, V.B., et al. Indicativnoe planirovanie i provedenie regionalny politiki / pod red A.B. Levintal, F.F. Pashchenko. – М.: Finance & Statistics, 2007. – 368 s. (In Russian)]
13. Левинталь А.Б., Ефременко В.Ф., Гусев В.Б., Пащенко Ф.Ф. Индикативное планирование и проведение региональной политики в развитых зарубежных странах: Науч. изд. – М.: ИПУ РАН, 2005. – 56 с. [Levintal, A.B., Efremenko, V.F., Gusev, V.B., Pashchenko, F.F. Indicative Planning and Implementation of Regional Policy in Developed Foreign Countries: Scientific Edition. – М.: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2005. – 56 p. (In Russian)]
14. Левинталь А.Б., Ефременко В.Ф., Гусев В.Б., Пащенко Ф.Ф. Расчет показателей индикативного планирования для программ развития региона – М.: ИПУ РАН, 2006. – 49 с. [Levintal, A.B., Efremenko, V.F., Gusev, V.B., Pashchenko, F.F. Calculation of Indicators of Indicative Planning for Regional Development Programs – М.: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2006. – 49 p. (In Russian)]
15. Суворов Н.В., Ахунов Р.Р., Губарев Р.В. и др. Применение производственной функции Кобба – Дугласа для анализа промышленного комплекса региона // Экономика региона. – 2020. – Т. 16, № 1. – С. 187–200. [Suvorov, N.V., Akhunov, R.R., Gubarev, R.V., et al. Application of the Cobb-Douglas Production Function for the Analysis of the Industrial Complex of the Region. – 2020. – Vol. 16, no. 1. – P. 187–200. (In Russian)]
16. Дранко О.И., Новиков Д.А., Райков А.Н., Чернов И.В. Управление развитием региона. Моделирование возможностей. – М.: URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2023. – 432 с. [Dranko, O.I., Novikov, D.A., Raikov, A.N., Chernov, I.V. Management of regional development. Modeling of opportunities. – М.: URSS, ООО «ЛЕНАНД», 2023. – 432 s. (In Russian)]
17. Chernov, I.V. Scenario Analysis of Vulnerability in Control of Complex Systems // Automation and Remote Control. – 2022. – Vol. 83, No. 5. – P. 780–791.
18. Avdeeva, Z.K., Kovriga, S.V., Grebenyuk, E.A. Cognitive Modelling-driven Time Series Forecasting for Predicting Target Indicators in Non-stationary Processes // IFAC-PapersOnLine. – 2021. – Vol. 54, no.13. – P. 91–96.
19. Авдеева З.К., Коврига С.В. О постановке задач управления ситуацией со многими активными субъектами с использованием когнитивных карт // Управление большими системами. – 2017. – Вып. 68. – С. 74–99. [Avdeeva, Z.K. and Kovriga, S.V. On Situation Control Problem Settings with Multiple Stakeholders Using Cognitive Maps // Autom. Remote Control. – 2020. – Vol. 81, no. 1. – P. 139–152.]
20. Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. Нечеткие когнитивные модели в управлении слабоструктурированными социально-экономическими системами // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2020. – № 4 (20). – С. 5–23. [Zakharova, A.A., Podvesovskii, A.G., Isaev, R.A. Fuzzy Cognitive Models in the Management of Semi-Structured Socio-Economic Systems // Information and Mathematical Technologies in Science and Management. – 2020. – No. 4 (20). – P. 5–23. (In Russian)]
21. Подгорская С.В., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А. и др. Моделирование сценарного развития сельских территорий на основе нечеткой когнитивной модели // Проблемы управления. – 2019. – № 5. – С. 49–59. [Podgorskaya, S.V., Podvesovskii, A.G., Isaev, R.A. et al. Modeling of Scenario Development of Rural Territories Based on Fuzzy Cognitive Model // Control Sciences. – 2019. – No. 5. – P. 49–59. (In Russian)]
22. Zakharova, A.A., Podvesovskii, A.G. Application of Visual-Cognitive Approach to Decision Support for Concept Development in Systems Engineering. – 2021. – IFAC-PapersOnLine. – Vol. 54, no. 13. – P. 482–487.
23. Zakharova, A.A., Podvesovskii, A.G., Shklyar, A.V. Visual and cognitive interpretation of heterogeneous data // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. – 2019. – Vol. XLII-2/W12. – P. 243–247.
24. Ерешко Ф.И., Шумов В.В. Разработка методики оценки рисков реализации различных сценариев развития ЕАЭС для государств-членов и для Союза в целом с учетом влияния различных экономических факторов // Россия и Азия. – 2020. – № 5(14). – С. 40–50. [Ereshko, F.I., Shumov, V.V. Development of a Methodology for Assessing the Risks of Implementing Various Scenarios for the Development of the EAEU for the Member States and for the Union as a Whole, Taking into Account the Impact of Various Economic Factors // Russia and Asia. – 2020. – Vol. 5, no. 14. – P. 40–50. (In Russian)]
25. Цвиркун А.Д., Чурсин А.А., Ерешко Ф.И. Задачи стратегического управления в крупномасштабных проектах (на примере ракетно-космической отрасли) // Матер. Девятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2016». – Москва, 2016. – Т. 1. – С. 130–138. [Tsvirkun, A.D., Chursin, A.A., Ereshko, F.I. Tasks of Strategic Management in Large-Scale Projects (on the Example of the Rocket and Space Industry) // Proceedings of the Ninth International Conference «Management of the Development of Large-Scale MLSD'2016 Systems». – Moscow, 2016. – Vol. 1. – P. 130–138. (In Russian)]
26. Обросова Н.К., Шананин А.А. Описание функционирования обрабатывающего сектора в макромоделе российской экономики // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2018. – Т. 68, № 2. – С. 63–67. [Obrosova, N.K., Shaninin, A.A. Description of the Functioning of the Manufacturing Sector in the Macromodel of the Russian Economy // Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences. – 2018. – Vol. 68, no. 2. – P. 63–67. (In Russian)]
27. Варнавский В.Г. Драйверы мировой экономики // Мировая экономика и международные отношения. – 2020. – Т. 64, № 7. – С. 5–16. [Varnavsky, V.G. Drivers of Global Economy // World Economy and International Relations. – 2020. – Vol. 64, no. 7. – P. 5–16. (In Russian)]
28. Глушков В.М. О системной оптимизации // Кибернетика. – 1980. – № 5. – С. 89–90. [Glushkov, V.M. On System Optimization // Cybernetics. – 1980. – No. 5. – P. 89–90. (In Russian)]
29. Глушков В.М., Михалевиц В.С., Волкович В.Л. и др. Системная оптимизация в многокритериальных задачах линейного программирования при интервальном задании предпочтений // Кибернетика. – 1983. – № 3. – С. 1–8. [Glushkov, V.M., Mikhalevich, V.S., Volkovich, V.L. et al. System Optimization in Multi-Criteria Problems of Linear Programming with Interval Setting of Preferences // Cybernetics. – 1983. – No. 3. – P. 1–8. (In Russian)]
30. Михалевиц В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 286 с. [Mikhalevich, V.S., Volkovich, V.L. Computational Methods of Research and Design of Complex Systems. – Moscow: Nauka, 1982. – 286 p. (In Russian)]

31. Бурков В.Н., Ириков В.А. Модели и методы управления организационными системами – М.: Наука, 1994. – 270 с. [Burkov, V.N., Irikov, V.A. Models and Methods of Management of Organizational Systems. – Moscow: Nauka, 1994. – 270 p. (In Russian)]
32. Ириков В.А., Поспелов Г.С., Курилов А.Е. Процедуры и алгоритмы формирования комплексных программ – М.: Наука, 1985. – 424 с. [Irikov, V.A., Pospelov, G.S., Kurilov, A.E. Procedures and Algorithms for the Formation of Complex Programs – Moscow: Nauka. – 1985. – 424 p. (In Russian)]
33. Ириков В.А., Охрименко М.В. Формирование и контроль целей регионального развития на основе траекторного подхода с использованием моделей системной оптимизации // Международная научно-практическая Мультиконференция «Управление большими системами 2009». – Москва, 2009. – С. 111–114. [Irikov, V.A., Okhrimenko, M.V. Formation and Control of Regional Development Goals on the Basis of the Trajectory Approach Using System Optimization Models // International Scientific and Practical Multiconference «Management of Large Systems 2009». – Moscow, 2009. – P. 111–114. (In Russian)]
34. Ириков В.А., Тренев В.Н. Распределенные системы принятия решений. Теория и приложения – М.: Наука, 1999. – 285 с. [Irikov, V.A., Trennev, V.N. Distributed Decision-Making Systems. Theory and Applications – Moscow: Nauka, 1999. – 285 p. (In Russian)]
35. Федеральный закон от 28.06.2014 N 172-ФЗ (ред. от 17.02.2023) «О стратегическом планировании в Российской Федерации». – URL: <https://cloud.consultant.ru/cloud/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=439977>. [Federal Law of 28.06.2014 No.172-FZ (as amended on 17.02.2023) "On Strategic Planning in the Russian Federation". – URL: <https://cloud.consultant.ru/cloud/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=439977>. (In Russian)]
36. Ириков В.А., Новиков Д.А., Тренев В.Н. Целостная система государственно-частного управления инновационным развитием как средство удвоения темпов выхода России из кризиса и посткризисного роста. – М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. – 220 с. [Irikov, V.A., Novikov, D.A., Trennev, V.N. Celostnaja sistema gosudarstvenno-chastnogo upravlenija innovacionnym razvitiem kak sredstvo udvoenija tempov vyhoda Rossii iz krizisa i postkrizisnogo rosta. – M.: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, 2009. – 220 s. (In Russian)]
37. Gross Domestic Product (GDP). – URL: <https://www.world.economics.com/Indicator-Data/Economic-Size/Revaluation-of-GDP.aspx> (дата обращения 15.04.2024). [Accessed April 15, 2024].
38. The World Bank. GDP, PPP (current international \$). – URL: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.PP.CD> (Даты обращения 15.04.2024, 15.06.2024). [Accessed April 15, 2024, June 15, 2024].
39. Валовая добавленная стоимость по отраслям экономики (в текущих ценах, млрд. руб.). – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VDS_god_OKVED2_s2011-2023.xlsx (дата обращения 15.04.2024). [Gross value added by sectors of the economy (at current prices, billion rubles). – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VDS_god_OKVED2_s2011-2023.xlsx (accessed April 15, 2024). (In Russian)]
40. Указ Президента РФ от 21 июля 2020 года N 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года». – URL: <https://cloud.consultant.ru/cloud/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=357927>. [Decree of the President of the Russian Federation of July 21, 2020 No. 474 "On the National Development Goals of the Russian Federation for the Period up to 2030". – URL: <https://cloud.consultant.ru/cloud/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=357927>. (In Russian)]
41. World Bank (GDP growth (annual %)), – URL: <https://api.worldbank.org/v2/en/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?downloadformat=excel> (дата обращения 15.04.2024). [Accessed April 15, 2024].
42. Приказ Росстата от 17.12.2021 № 926 «Об утверждении Официальной статистической методологии расчета показателя «Чистые налоги на продукты». – URL: <https://cloud-prom.consultant.ru/cloud/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=407417>. [Order of Rosstat dated 17.12.2021 No. 926 "On Approval of the Official Statistical Methodology for Calculating the Indicator "Net Taxes on Products". – URL: <https://cloud-prom.consultant.ru/cloud/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=407417>. (In Russian)]
43. ВДС годы ОКВЭД2 (с 2011 г.). – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VDS_god_OKVED2_s2011-2023.xlsx (дата обращения 11.11.2024). [Gross value added (GVA) codes OKVED-2007 (since 2011). – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/VDS_god_OKVED2_s2011-2023.xlsx (accessed April 15, 2024). (In Russian)]
44. Инвестиции в основной капитал, методология. Основные понятия. – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/xoCyl4Ia/met-ok.pdf> (дата обращения 15.04.2024). [Investments in fixed assets, methodology. Concepts. – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/xoCyl4Ia/met-ok.pdf> (accessed April 15, 2024). (In Russian)].
45. Структура инвестиций в основной капитал, методология, методология. Основные понятия. – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ptVbsve8/met-str.pdf> (дата обращения 15.04.2024). [Structure of investments in fixed assets, methodology, methodology. Concepts. – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ptVbsve8/met-str.pdf> (accessed April 15, 2024). (In Russian)].
46. Среднегодовая численность занятых по видам экономической деятельности. – М.: Федеральная служба государственной статистики. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05-05_2017-2022.xls (дата обращения 15.04.2024). [Average annual number of employees by type of economic activity. – Moscow: Federal State Statistics Service of the Russian Federation. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05-05_2017-2022.xls (accessed April 15, 2024). (In Russian)].
47. Приказ Минэкономразвития от 28 декабря 2018 г. № 748 «Об утверждении методики расчета показателей производительности труда предприятия, отрасли, субъекта Российской Федерации». – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05-05_2017-2022.xls (дата обращения 15.04.2024). [Order of the Ministry of Economic Development of December 28, 2018 No. 748 "On Approval of the Methodology for Calculating Indicators of Labor Productivity of Enterprises, Industries, and Subjects of the Russian Federation". – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/05-05_2017-2022.xls (accessed April 15, 2024). (In Russian)].



ской Федерации и методики расчета отдельных показателей национального проекта «Производительность труда и поддержка занятости». – URL: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_28_dekabrya_2018_g_748.html?ysclid=m40fgrejsd822904856.

[Order of the Ministry of Economic Development of the Russian Federation of December 28, 2018 No. 748 “On Approval of the Methodology for Calculating Labor Productivity Indicators of an Enterprise, Industry, Constituent Entity of the Russian Federation and the Methodology for Calculating Individual Indicators of the National Project “Labor Productivity and Employment Support”. – URL: https://www.economy.gov.ru/material/dokumenty/prikaz_minekonomrazvitiya_rossii_ot_28_dekabrya_2018_g_748.html?ysclid=m40fgrejsd822904856. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.И. Гераськиным.

Поступила в редакцию 14.05.2024,
после доработки 29.10.2024.
Принята к публикации 25.11.2024.

Дранко Олег Иванович – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва,
✉ drankooi@ipu.ru, olegdranko@gmail.com,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4664-1335>

Резчиков Александр Федорович – д-р техн. наук, чл.-корр. РАН, Институт проблем управления РАН имени В.А. Трапезникова, Москва,
✉ rw4cy@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2618-6029>

Степановская Ираида Александровна – канд. техн. наук, Институт проблем управления РАН имени В.А. Трапезникова, Москва,
✉irstepan@ipu.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-2012-8063>

Богомолов Алексей Сергеевич – д-р техн. наук, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов,
✉ alexbogomolov@yandex.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6972-3181>

Кушников Вадим Алексеевич – д-р техн. наук, ФИЦ «Саратовский научный центр РАН», Саратов,
✉ kushnikoff@yandex.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-9195-2546>

© 2024 г. Дранко О. И., Резчиков А. Ф., Степановская И. А., Богомолов А. С., Кушников В. А.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

SCENARIO MODELING OF ECONOMIC GROWTH BASED ON INDICATIVE PLANNING

O. I. Dranko*, A. F. Rezchikov**, I. A. Stepanovskaya***, A. S. Bogomolov****, and V. A. Kushnikov*****

****Трапезников Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

***** Federal Research Center “Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,” Saratov, Russia

*✉ olegdranko@gmail.com, **✉ rw4cy@mail.ru, ***✉irstepan@ipu.ru, ****✉ alexbogomolov@yandex.ru, *****✉ kushnikoff@yandex.ru

Abstract. This paper considers a multilevel indicative planning model for target indicators in the “World–Country–Industries–Resources–Projects” system. The proposed simulation model implements scenario planning. The problem of analyzing and forecasting the country’s target indicators, using the example of Gross Domestic Product at Purchasing Power Parity (GDP at PPP), is formulated for individual industries. The growth rates of individual industries’ GDP and Gross Value Added (GVA) necessary for implementing the target scenario are estimated. Specific efficiency indicators for financial and human resources are determined: labor productivity and capital intensity. The investment in fixed assets and human resources necessary for implementing the target scenario are estimated. As demonstrated, implementing the target scenario of GVA growth requires measures to accelerate labor productivity growth, and the most important industries in this context are identified. The study is based on initial data provided by the World Bank and the Federal State Statistics Service of the Russian Federation.

Keywords: modeling, forecasting, targeting, indicative planning, management, large-scale systems, system dynamics.

ЗАДАЧА СТИМУЛИРОВАНИЯ В РЕФЛЕКСИВНОЙ ИГРЕ С ТОЧЕЧНОЙ СТРУКТУРОЙ ИНФОРМИРОВАННОСТИ

И. В. Петров*, А. Г. Чхартишвили**

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

*✉ ivpetrov@ipu.ru, **✉ sandro_ch@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена модель коллективного поведения агентов в ситуации игровой неопределенности и неполной информированности. В качестве модели принятия решений агентами используется рефлексивная игра, в которой участники принимают решение на основе иерархии представлений о параметрах игры, представлений о представлениях и т. д. В центре внимания данной работы – рефлексивные игры с точечной структурой информированности и линейным наилучшим ответом игроков. Показано, что информационное равновесие в таких играх аналогично равновесию Нэша в игре на сети; в явном виде записаны выражения для равновесных ответов игроков, указаны условия существования и единственности равновесия. Приводится формулировка задачи стимулирования, аналогичной задаче стимулирования в игре на сети: показана взаимосвязь между равновесием в игре с общим знанием и равновесием в игре с неполной информированностью, в которой центр сообщает новые стимулы игрокам индивидуально.

Ключевые слова: рефлексивные игры, информационное равновесие, игры на сетях, сетевое управление.

ВВЕДЕНИЕ

Информационная рефлексия – процесс и результат размышлений агента о том, каковы значения неопределенных параметров, что об этих значениях знают и думают его оппоненты (другие агенты) [1]. Информационная рефлексия обычно связана с недостаточной взаимной информированностью, и ее результат используется при принятии решений. Одним из способов моделирования принятия решения в ситуации с неполной информированностью являются рефлексивные игры, в которых представления агентов друг о друге формализованы в виде фантомных агентов. Введение понятия фантомного агента позволяет определить рефлексивную игру как игру реальных и фантомных агентов, а также определить информационное равновесие как обобщение равновесия Нэша на случай рефлексивной игры, в рамках которого предполагается, что каждый агент (как реальный, так и фантомный) при вычислении своего субъективного равновесия (равновесия в той игре, в которую

он со своей точки зрения играет) использует имеющуюся у него иерархию представлений об объективной и рефлексивной реальности.

Удобным инструментом исследования концепции решения рефлексивной игры – информационного равновесия – является граф рефлексивной игры, в котором вершины соответствуют реальным и фантомным агентам, а в каждую вершину-агента входят дуги (их число на единицу меньше числа реальных агентов), идущие из вершин-агентов, от действий которых в субъективном равновесии зависит выигрыш данного агента. Ниже на примере рефлексивной игры с точечной структурой показано, что в отдельных случаях, а именно в случаях, когда наилучшие ответы игроков линейно зависят от ответов других связанных с ними агентов, информационное равновесие может быть описано в явном виде в терминах структуры информированности.

Для класса игр с линейным наилучшим ответом ранее [2] была сформулирована задача управления стимулами агентов (англ. *incentive targeting problem*) – случай задачи центра, изменяющего значе-



ние параметра функции полезности агентов, являющийся их предельным выигрышем и не зависящий от действий других агентов. В случае рефлексивной игры с точечной структурой информированности изменение данного параметра возможно двумя способами, каждый из которых может быть реализован различными методами: одновременное сообщение нового параметра всем агентам (что эквивалентно решению исходной задачи стимулирования) либо ситуация, в которой о значении нового параметра узнает лишь часть агентов. В данной работе приведен пример механизма сообщения информации центром, когда обе эти ситуации – случай общего знания и случай неполной информированности агентов – дают эквивалентный ответ.

В § 1 описана рефлексивная игра с точечной структурой информированности из работы [3]. В § 2 показано, что информационное равновесие в такой игре аналогично равновесию Нэша в игре на сети с линейным наилучшим ответом из статьи [4] и может быть сформулировано в терминах структуры информированности; в явном виде записаны выражения для равновесных ответов игроков, указаны условия существования и единственности равновесий. Такая формулировка позволяет рассматривать произвольную структуру связей между игроками и получить равновесие в явном виде. В § 3 приводится формулировка задачи информационного управления, аналогичной задаче стимулирования в игре на сети: показана взаимосвязь между равновесием в игре на сети с общим знанием и равновесием в игре с неполной информированностью, в которой центр сообщает новые стимулы игрокам индивидуально.

1. РЕФЛЕКСИВНЫЕ ИГРЫ И СТРУКТУРА ИНФОРМИРОВАННОСТИ АГЕНТОВ

Рефлексивная игра Γ_I с конечной структурой информированности I задается кортежем $\Gamma_I = \{N, (X_i)_{i \in N}, f_i(\cdot)_{i \in N}, \Theta, G_I\}$, где N – множество реальных агентов; X_i – множество допустимых действий i -го реального агента; Θ – множество возможных значений неопределенного параметра («состояний природы»); $f_i(\cdot): \Theta \times X \rightarrow \mathbb{R}^1$ – целевая функция i -го реального агента, $i \in N$; G_I – граф рефлексивной игры.

Неформально рефлексивная игра представляет собой взаимодействие агентов, рефлексизирующих относительно параметра $\theta \in \Theta$. Агенты имеют друг о друге некоторые представления – истинные

(тогда соответствующий агент является реальным) или ложные (тогда агент является фантомным). Например, в сознании второго агента присутствует экземпляр («образ») первого агента, который либо совпадает с реальным первым агентом, либо не совпадает; в случае несовпадения экземпляр первого агента является фантомным.

Граф рефлексивной игры, вершины которого соответствуют агентам, а связи – их взаимным представлениям друг о друге, состоит из следующих элементов:

A_i – множество вершин, соответствующих возможным экземплярам i -го агента, $i \in N = \{1, \dots, n\}$; ровно один из них является реальным, прочие (если они есть) являются фантомными агентами;

$A = A_1 \cup \dots \cup A_n$ – множество всех вершин графа, представляющее всех агентов (не будем далее различать агентов и вершины графа);

$\theta(a)$ – состояние природы с точки зрения агента a , $a \in A$, $\theta \in \Theta$;

$v(a)$ – множество не совпадающих с a агентов, которых агент $a \in A$ считает реальными, что отражается на графе в виде стрелок (направленных связей) от этих агентов к a ; множество $v(a) \subset A$ для данного агента $a \in A_i$ состоит из элементов в количестве $(n-1)$, которые принадлежат соответственно множествам $A_1 \cup \dots \cup A_{i-1} \cup A_{i+1} \cup \dots \cup A_n$.

Будем считать, что целевые функции всех экземпляров одного и того же реального агента совпадают, т. е. агент $a \in A_i$ стремится максимизировать функцию $f_i(\cdot)$. В этом случае можно определить информационное равновесие – набор действий агентов $x_a, a \in A$, таких, что для всех $i \in N$, $a \in A_i$

$$x_a \in \underset{x \in X_i}{\text{Argmax}} f_i(\theta(a), x, x_{-a}),$$

где через x_{-a} обозначен набор действий агентов из множества $v(a)$.

В работе [3] в качестве примера была рассмотрена рефлексивная игра с целевой функцией агентов

$$f_i(\theta, x_1, x_2, x_3) = (\theta - x_1 - x_2 - x_3)x_i - \frac{x_i^2}{2}, \quad (1)$$

где $x_i \geq 0$, $i \in N = \{1, 2, 3\}$; $\theta \in \Theta = \{1, 2\}$. Далее, в зависимости от различной информированности игроков, для нахождения информационного равновесия необходимо из условий первого порядка

$\partial f_i / \partial x_i = 0$ найти наилучшие ответы игроков и решить систему линейных уравнений. Переходя к произвольному числу агентов, можно обобщить целевую функцию (1) агента i в виде

$$f_a(\theta, x_a, x_{-a}, G_I) = \left(\theta(a) - \beta \sum_b g_{ab} x_b \right) x_a - \frac{x_a^2}{2}, \quad (2)$$

где G_I – граф рефлексивной игры, в котором $g_{ab} = 1$ при $b \in v(a)$, иначе $g_{ab} = 0$, $g_{aa} = 0$. Параметр $\beta > 0$ отражает характер зависимости от действий соседей. Система наилучших ответов игроков с функцией (2) записывается как

$$x_a = \theta(a) - \beta \sum_b g_{ab} x_b,$$

а в матричном виде

$$x = \theta - \beta G_I x,$$

или

$$(I + \beta G_I) x = \theta,$$

где I – единичная матрица¹. Воспользовавшись результатами работы [4], можно сформулировать следующее утверждение, позволяющее найти равновесие в рефлексивной игре с точечной структурой информированности и функцией выигрыша игроков (2) в явном виде.

Утверждение 1. Если $\beta \lambda_{\min} \left(\frac{G_I + G_I^T}{2} \right) < 1$, то информационное равновесие в рефлексивной игре с точечной структурой информированности $G_I = \{N, (X_i)_{i \in N}, v_i(\cdot)_{i \in N}, G_I\}$ и функцией выигрыша агента (2) существует и единственно:

$$x^* = (I + \beta G_I)^{-1} \theta.$$

Доказательство эквивалентно доказательству утверждения 2 в статье [4] и основывается на свойстве игры быть потенциальной: игра с функцией выигрыша (2) обладает потенциальной функцией $\varphi(x) = x^T 1 - \frac{1}{2} x^T (I - \beta G_I) x$, максимум которой является равновесием Нэша. Достаточным условием существования

¹ Нетрудно проверить, что в таком виде модель из оригинальной статьи [3] можно представить как

$$f_i(\theta, x_a, x_{-a}, G_I) = \left(\theta(a) - \sum_b g_{ab} x_b \right) x_a - \frac{x_a^2}{2},$$

а система наилучших ответов принимает вид

$$x_a = \frac{\theta(a) - \sum_b g_{ab} x_b}{3}, \text{ или } (3I + G_I) x = \theta.$$

единственного решения является вогнутость потенциальной функции. Матрица вторых производных имеет вид $\nabla^2 \varphi = -(I - \beta G_I)$, а функция φ строго вогнута тогда и только тогда, когда матрица $I - \beta G_I$ положительно определена: для любого $y \neq 0$, $y^T (I - \beta G_I) y > 0$, что эквивалентно условию $\beta \lambda_{\min}(G_I) < 1$, где $\lambda_{\min}(G_I)$ – наименьшее собственное значение матрицы G_I . Так как матрица G_I несимметрична, речь идет о наименьшем собственном значении эрмитовой компоненты матрицы G_I , $\lambda_{\min} \left(\frac{G_I + G_I^T}{2} \right)$. ♦

В такой постановке игра полностью соответствует довольно популярной среди зарубежных исследователей игре локального общественного блага [4–6]. А именно, равновесие Нэша в игре локального общественного блага имеет вид $x^* = (I + \beta E)^{-1} \theta$, где в качестве сети взаимодействия выступает матрица $E = \{e_{ij}\} \in \{0, 1\}^{n \times n}$ – граф взаимного влияния агентов (например, сеть знакомств, конкуренции и др.), а информационное равновесие в рефлексивной игре записывается как $x^* = (I + \beta G_I)^{-1} \theta$, где в качестве сети взаимодействия используется граф G_I рефлексивной игры. Равновесие в такой игре существует и при $\beta \lambda_{\min} \left(\frac{G_I + G_I^T}{2} \right) > 1$, но ниже ограничимся только случаем утверждения 1.

Похожие модели рассматривались в работах [7–9], где они дополнялись параметром r_i , характеризующим тип i -го агента – эффективность или квалификацию его деятельности. Равновесие для игры [7] с функцией $f_i(\theta, x_i) = \left(\theta_i - \sum_{j \in N} x_j \right) x_i - \frac{x_i^2}{2r_i}$ на произвольном графе G можно представить как

$$x^* = (I r^{-1} + \beta G)^{-1} b,$$

а равновесие для игры [8], в которой агенты с функцией выигрыша $f_i(\theta, x_i) = \left(\sum_{j \in N} x_j - h \right) x_i - \frac{x_i^2}{2r_i}$ прикладывают усилия x_i к некоторому совместному действию, которое дает положительный вклад в целевые функции агентов в случае, если сумма усилий превышает некоторый порог h , на произвольном графе G можно представить как

$$x^* = (-I r^{-1} + \beta G)^{-1} h.$$



2. ЗАДАЧА СТИМУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕФЛЕКСИВНОЙ ИГРЫ

Для игры локального общественного блага в работе [2] была предложена задача стимулирования² – управления вектором θ – для максимизации функции общественного благосостояния:

$$W(\theta, G) = \sum_{i \in N} f_i \rightarrow \max_{\theta}$$

Рассмотрим аналогичную задачу для рефлексивной игры с точечной структурой информированности:

$$W(\theta, G_I) = \sum_{i \in N} f_i \rightarrow \max_{\theta}$$

Будем считать, что в данной ситуации изменение стимулов возможно только для реальных агентов (заметим, что «стимулирование фантомных агентов» является, по сути, информационным управлением), однако управляющий орган (центр) может по-разному информировать реальных агентов, тем самым изменяя структуру информированности и порождая новых фантомных агентов. А именно, рассмотрим случай, когда в начале имело место общее для агентов знание, а далее происходит следующий многошаговый информационный процесс: на каждом шаге центр индивидуально сообщает об изменении состояния $\theta_i \rightarrow \hat{\theta}_i$ всем i -м реальным агентам.

Это влияет на граф рефлексивной игры следующим образом. Предположим, что в начальный момент времени агенты $N = \{1, 2, 3\}$ связаны графом взаимного влияния $E = \{e_{ij}\}$ (рис. 1, а, стрелками $i \sim j$ отражена зависимость выигрыша i -го агента от действий j -го агента) и все три агента одинаково информированы: состояние природы с точки зрения каждого из агентов $\theta_i = \theta$ для всех i . После первого сообщения центра о новом значении параметра $\hat{\theta}_i$ каждому из игроков индивидуально граф взаимного влияния остается без изменений, в графе рефлексивной игры реальные агенты становятся фантомными, а новыми реальными агентами становятся вершины, возникающие в графе рефлексивной игры путем добавления узла i и связей с теми же вершинами, с которым связан фантомный агент i' в графе взаимного влияния E . При этом для реальных агентов $\theta_i = \hat{\theta}$, а для фантомных $\theta_{i'} = \theta$. Процедуру создания новых связей, возникающих в процессе изменения структуры информированности при $\theta_i \rightarrow \hat{\theta}_i$, можно представить в виде двудольного графа: если вершины i и j связаны в исходном графе E , тогда в новом двудольном графе одна доля – это исходный граф E , а вторая – E' , и имеется связь между вершинами $i \sim j'$ (рис. 1, б).

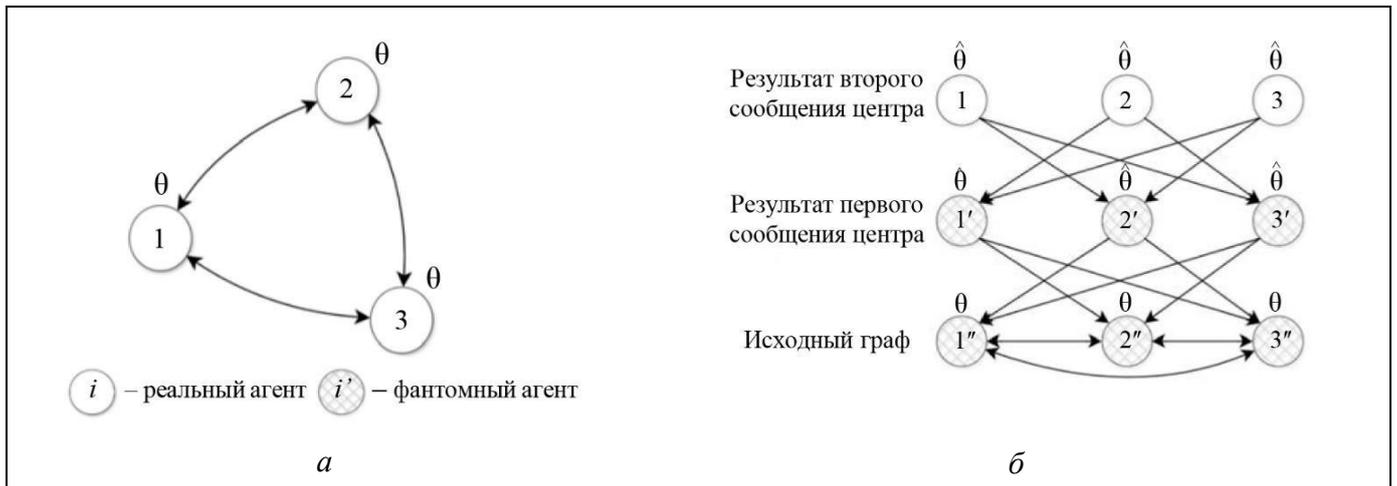


Рис. 1. Процедура передачи сообщений центром и изменение графа рефлексивной игры: а – исходный граф E взаимодействия агентов; б – граф G_I рефлексивной игры, являющийся результатом сообщений центра агентам о новом значении параметра θ_i

² Формально в работе [2] изложена задача стимулирования для игры с равновесием $x^* = (I - \beta G)^{-1} \theta$ [10], где параметр β отражает характер зависимости от действий соседей: при $\beta > 0$ действия игроков комплементарны (англ. *strategic complements*), при $\beta < 0$ действия соседей заменяют друг друга (англ. *strategic substitutes*). Таким образом, рассматриваемой задаче соответствует случай игры в статье [2] при $\beta < 0$.

Тогда в начальный момент множества A_1, \dots, A_n являются одноэлементными, а структура информированности G_I совпадает с графом взаимного влияния E . Далее на каждом шаге в каждое из множеств A_i , $i \in N$, добавляется один экземпляр \hat{a}_i , который становится реальным агентом; при этом $\theta(\hat{a}_i) = \hat{\theta}_i$, а множество $v(\hat{a}_i)$ составляют экземпляры агентов, реальных на предыдущем шаге. Формально равновесные ответы игроков можно представить следующим образом: равновесие реальных агентов в начальный момент (без сообщений центра) записывается в виде

$$x^* = (I + \beta E)^{-1} \theta.$$

Равновесные ответы реальных агентов после первого сообщения центра имеют вид

$$x^{*(1)} = \hat{\theta} - \beta E x^*,$$

а после второго

$$x^{*(2)} = \hat{\theta} - \beta E x^{*(1)}.$$

Равновесные ответы реальных агентов после k -го сообщения центра таковы:

$$x^{*(k)} = \hat{\theta} - \beta E x^{*(k-1)}.$$

При этом число вершин в графе рефлексивной игры после k -го сообщения центра равно kN . Следующее утверждение позволяет описать результат воздействия центра в терминах исходного графа взаимного влияния E .

Утверждение 2. Если информационное равновесие в рефлексивной игре с точечной структурой информированности Γ_I существует и единственно, то многошаговая процедура изменения структуры информированности G_I сходится к равновесию в игре с полной информированностью агентов Γ , а именно при $k \rightarrow \infty$

$$x^{*(k)} \rightarrow (I + \beta E)^{-1} \hat{\theta}.$$

Доказательство. Путем подстановки нетрудно убедиться, что при $k > 0$ результатом k -го сообщения центра является структура G_I , порождающая следующие равновесные действия агентов:

$$x^{*(k)} = \sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j \beta^j E^j \hat{\theta} + (-1)^k \beta^k E^k x^*.$$

При $k \rightarrow \infty$ второе слагаемое $(-1)^k \beta^k E^k x^*$ стремится к нулю в силу ограничения $\beta \lambda_{\min}(E) < 1$. Выражение

$\sum_{j=0}^{k-1} (-1)^j \beta^j E^j$ в первом слагаемом является разложением

матрицы $(I + \beta E)^{-1}$ в ряд Неймана [11]. ♦

3. ПРИМЕР

В целях иллюстрации полученных результатов рассмотрим пример, аналогичный приведенному в работе [3]: выигрыш f_i игрока i характеризуется функцией

$$f_i = (\theta_i - x_1 - x_2 - x_3) x_i - \frac{x_i^2}{2}$$

для случая трех агентов. Наилучшие ответы игроков таковы:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{\theta_i - x_2 - x_3}{3}, \\ x_2 = \frac{\theta_i - x_1 - x_3}{3}, \\ x_3 = \frac{\theta_i - x_1 - x_2}{3}. \end{cases}$$

Исследуем значения $W(U, \theta) = \sum_{i \in \{1,2,3\}} x_i$ в зависимости

от числа сообщений центра (табл. и рис. 2). При $\theta_{i \in \{1,2,3\}} = 1$ равновесные ответы игроков $x_{i \in \{1,2,3\}}^* = 0,2$,

а значение функции общественного благосостояния $W(\theta) = 0,6$. Пусть центр меняет исходные значения

$\theta_{i \in \{1,2,3\}} = 1$ на новые $\hat{\theta}_{i \in \{1,2,3\}} = 2$. В случае общего знания об изменении $\theta_i \rightarrow \hat{\theta}_i$ равновесные ответы игроков

$x_{i \in \{1,2,3\}}^* = 0,4$, а значение функции общественного благосостояния $W(\hat{\theta}) = 1,2$. Однако в ситуации индивидуального информирования агентов об изменении $\theta_i \rightarrow \hat{\theta}_i$

на каждой итерации центр сообщает индивидуально каждому агенту ситуацию, которая имела место на предыдущем шаге. В результате этих сообщений структура информированности меняется. Равновесные ответы игроков и значение функции общественного благосостояния также меняются, в пределе достигая значений для случая общего знания.

Равновесные ответы игроков в зависимости от числа сообщений центра

№	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
θ	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
x_i^*	0,2	0,53	0,31	0,45	0,36	0,42	0,38	0,41	0,39	0,40	0,39	0,40
W	0,6	1,6	0,93	1,37	1,08	1,27	1,14	1,23	1,17	1,21	1,18	1,20

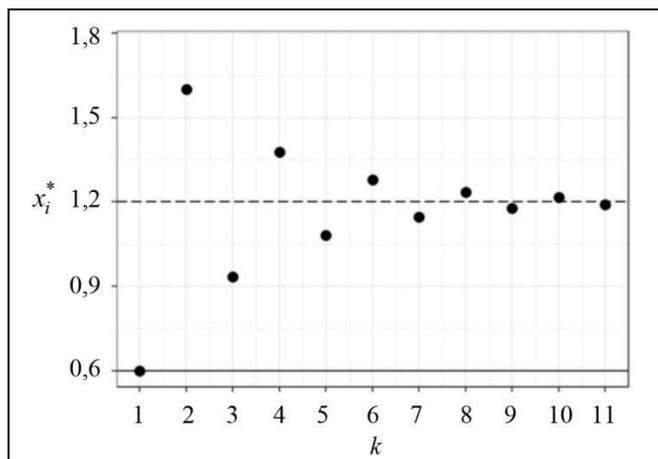


Рис. 2. Равновесные ответы игроков в зависимости от числа

сообщений центра k . Точками отмечены ответы игрока x_i^* в зависимости от сообщений центра. Сплошной линией отмечены равновесные ответы агентов в игре с общим знанием при

$$\theta_{i \in \{1,2,3\}} = 1, \text{ пунктиром при } \hat{\theta}_{i \in \{1,2,3\}} = 2$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена модель коллективного поведения агентов в ситуации игровой неопределенности и неполной информированности. Для рефлексивной игры с точечной структурой информированности показано, что в случае, когда наилучшие ответы игроков линейно зависят от других связанных с ними агентов, информационное равновесие может быть описано в явном виде в терминах структуры информированности. Такой подход позволяет интерпретировать пример рефлексивной игры из работы [3] как игру локального общественного блага с неполной информированностью агентов и описать в матричном виде равновесие в рефлексивной игре с точечной структурой информированности и линейным наилучшим ответом.

Кроме того, на основе полученных в данной работе результатов появляется возможность провести сравнительное описание решений задач управления для случаев общего знания и неполной информированности агентов. В качестве примера приводится формулировка задачи информационного управления, аналогичной задаче стимулирования в игре локального общественного блага на сети: в работе показан пример механизма сообщения информации центром, когда случай общего знания и случай неполной информированности агентов в пределе дают одинаковый ответ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Рефлексия и управление: математические модели. – М.: Издательство физико-

математической литературы, 2013. – 412 с. [Novikov, D. A., Chkhartishvili, A.G. Reflexion and Control: Mathematical Models. – Leiden: CRC Press, 2014. – 298 p.]

- Galeotti, A., Golub, B., Goyal, S. Targeting Interventions in Networks // *Econometrica*. – 2020. – Vol. 88, no. 6. – P. 2445–2471.
- Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Информационное равновесие: точечные структуры информированности // *Автоматика и телемеханика*. – 2003. – №. 10. – С. 111–122. [Novikov, D.A., Chkhartishvili, A.G. Information Equilibrium: Punctual Structures of Information Distribution // *Automation and Remote Control*. – 2003. – Vol. 64, no. 10. – P. 1609–1619.]
- Bramoullé, Y., Kranton, R., D'amours, M. Strategic Interaction and Networks // *American Economic Review*. – 2014. – Vol. 104, no. 3. – P. 898–930.
- Bramoullé, Y., Kranton, R. Public Goods in Networks // *Journal of Economic Theory*. – 2007. – Vol. 135, no. 1. – P. 478–494.
- Bramoullé, Y., Kranton, R. Games Played on Networks / In: *The Oxford Handbook on the Economics of Networks*. Ed. by Y. Bramoullé, A. Galeotti, B.W. Rogers. – New York: Oxford University Press, 2016. – P. 83–112.
- Fedyanin, D., Dranov, E. Random Beliefs in Cournot Competition / *Proceedings of the 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*. – Lipetsk, 2023. – P. 464–469. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10349382>.
- Федянин Д.Н., Чхартишвили А.Г. Об одной модели информационного управления в социальных сетях // *Управление большими системами*. – 2010. – Вып. 31. – С. 265–275. [Fedyanin, D.N., Chkhartishvili, A.G. On a Model of Informational Control in Social Networks // *Automation and Remote Control*. – 2011. – Vol. 72, no. 10. – P. 2181–2187.]
- Fedyanin, D. The Complex Mechanism of Belief Control for Cost Reduction under Stability Restriction. *Cournot Competition Example*. // *IFAC-PapersOnline*. – 2019. – Vol. 52, iss. 25. – P. 269–274.
- Ballester, C., Calvo-Armengol, A., Zenou, Y. Who's Who in Networks. Wanted: The Key Player // *Econometrica*. – 2006. – Vol. 74, no. 5. – P. 1403–1417.
- Ланкастер П. Теория матриц. – М.: Наука, 1978. [Lancaster, P. *Theory of Matrices*. – New York: Academic Press, 1969.]

Статья представлена к публикации руководителем РРС М. И. Гераськиным.

Поступила в редакцию 09.10.2024,

после обработки 11.11.2024.

Принята к публикации 11.11.2024.

Петров Илья Владимирович – науч. сотрудник,

✉ ivpetrov@ipu.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1073-6922>

Чхартишвили Александр Гедеванович – д-р физ.-мат. наук,

✉ sandro_ch@mail.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2970-1244>

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



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.

THE INCENTIVE-TARGETING PROBLEM IN A REFLEXIVE GAME WITH A POINT-TYPE AWARENESS STRUCTURE

I. V. Petrov* and A. G. Chkhartishvili**

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ ivpetrov@ipu.ru, **✉ sandro_ch@mail.ru

Abstract. This paper considers a collective behavior model of agents under strategic uncertainty and incomplete awareness. Decision-making is modeled by a reflexive game in which participants choose their actions based on a hierarchy of beliefs about the game parameters, beliefs about beliefs, and so on. The study is focused on reflexive games with a point-type awareness structure and the linear best response of players. As shown below, the informational equilibrium in such games is analogous to the Nash equilibrium in a game on a network. Explicit expressions for the equilibrium responses of players are derived and conditions for the existence and uniqueness of equilibria are established. An incentive-targeting problem similar to that in a corresponding game on a network is formulated: a relationship is obtained between the equilibria in the game with common knowledge and the game with incomplete awareness in which the Principal individually reports new incentives to the players.

Keywords: reflexive game, informational equilibrium, games on networks, networked control.

ФУНКЦИОНАЛЬНО-ВОКСЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДВИЖЕНИЯ К ЦЕЛИ НА ОСНОВЕ R -ФУНКЦИЙ

А. В. Толлок*, Н. Б. Толлок**

*,**Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН

*✉ tolok_61@mail.ru, **✉ nat_tolok@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются аналитические подходы к решению задач прокладки пути с учётом препятствий. Сравняются два принципа аналитического моделирования препятствий на сцене: с применением метода потенциалов и путём R -функционального моделирования. Приводится принцип функционально-воксельного конструирования сложных вычислительных процессов на примере моделирования R -функции объединения или пересечения области двух функций. Разбираются основы арифметических операций над локальными геометрическими характеристиками, описывающими компоненты однородного единичного вектора локальной функции. Демонстрируется принцип денормирования таких компонент для применения в арифметических действиях, составляющих R -функцию. Рассматривается моделирование сцены в виде компоновки концентрических объектов и локальной функции описания цели поверхностью воронки в указанной точке. Рассматривается алгоритм динамического формирования итоговой локальной функции объединения поверхности воронки с поверхностью сцены в текущей точке. На основе итоговой локальной функции определяются компоненты вектора направления градиентного движения к заданной цели.

Ключевые слова: R -функция, функционально-воксельное моделирование, локальная геометрическая характеристика, локальная функция, градиент, однородный вектор, задача построения пути с препятствиями.

ВВЕДЕНИЕ

Постановка задачи поиска пути уже имеет множество решений пространственного определения препятствий и построения обходящего их маршрута [1–3]. Большинство из алгоритмов поиска пути основываются на принципе «движение до упора» из-за отсутствия необходимой для анализа информации в каждой точке. К таким алгоритмам можно отнести эвристические алгоритмы, в частности муравьиный алгоритм, метод роя частиц, а также эволюционный генетический алгоритм [4], которые зачастую строят путь, не обеспечивающий гладкость, и не могут применяться в ряде прикладных задач, требующих сглаженной траектории движения. К таким алгоритмам также можно отнести волной алгоритм и алгоритм A^* . Поэтому не случайно то, что особое внимание полу-

чили аналитические подходы к описанию среды для решения задачи обхода препятствий. Такой способ позволяет описывать геометрические модели с максимальной точностью и отображать геометрические свойства объектов среды для каждой точки заданной области сцены.

Аналитический подход к решению задач построения маршрута с учётом сложной конфигурации препятствий традиционно сводится к задачам построения и анализа рельефа поверхности функции $f(x, y) = z$, где множество точек $f(x, y) = 0$ определяет границу огибаемого препятствия. Изучение подходов к построению такого рельефа позволило выделить два принципиальных направления развития: R -функциональное построение рельефа поверхности как основы движения по градиенту и построение потенциального поля как суммы точечных источников распределяемого потенциала – метод потенциалов.

Метод потенциалов рассматривает сумму «гиперболоидных» функций притяжения к цели и отталкивания от отдельно взятых точек – объектов препятствий. Применение метода *R*-functional modeling (RFM) [5–7] служит для единого функционального описания сложной геометрии сцены с препятствиями на основе *R*-функционального объединения «параболоидных» функций. При этом для построения области задания потенциалов не требуется осуществлять сложные вычисления, а достаточно обойтись последовательным суммированием их значений. В *R*-функциональном моделировании для включения очередного объекта сцены применяются *R*-функции объединения. Этот факт значительно увеличивает время расчёта по сравнению с методом потенциалов, но позволяет описывать объекты сложной геометрической формы, что не получается сделать с помощью метода потенциалов. Поэтому рекомендуется применение сразу обоих методов, где *R*-функциональная модель описывает статическую детерминированную среду сложной геометрии, а «потенциалы» можно динамически добавлять в любом месте сцены, суммируя их с *R*-функциональной поверхностью.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Представленное исследование направлено на изучение возможности применения функционально-воксельной модели для компьютерного представления области *R*-функции в решении задачи прокладки пути с обходом препятствий с применением градиентных свойств этой модели. При этом следует отметить, что требование к оптимальному, т. е. кратчайшему пути, здесь намеренно не предъявляется, поскольку принцип обтекания предметов зачастую обеспечивает продолжительность заслонения агента по отношению к конечной точке и лишь выход на открытое пространство потребует выравнивания движения к цели. Именно такие свойства приобретает локальная оптимизация движения по градиенту (рис. 1).

Рассмотрим утверждение о том, что функционально-воксельная модель для двух различных функций, заданных единой областью, позволяет проводить арифметические действия над их значениями [8–10], т. е. функционально-воксельное моделирование [10] позволяет реализовывать сложные алгебраические выражения на основе арифметических действий на уровне вычисления локальных геометрических характеристик. В качестве примера рассмотрим функционально-воксельное моделирование *R*-функции пересечения/объединения $\omega(x, y)$ как функции, аргументами которой

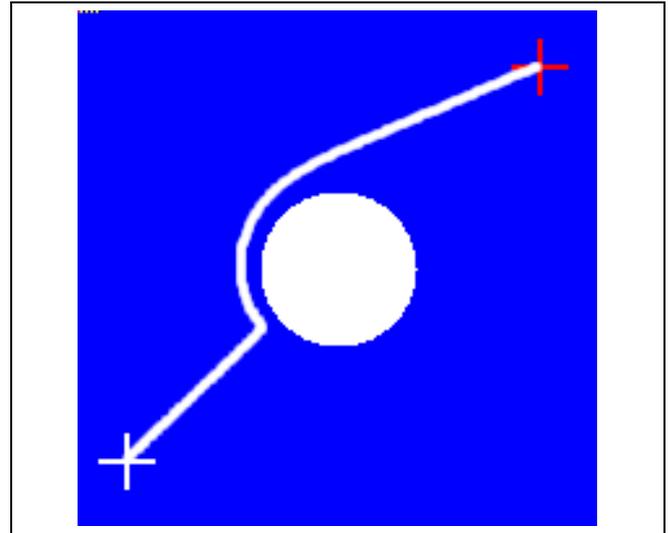


Рис. 1. Движение по градиенту к цели с обходом препятствия (красный крест – цель, белый крест – агент)

также являются значения функций $\omega_1(x, y)$ и $\omega_2(x, y)$ [5–7]:

$$\omega(x, y) = \omega_1(x, y) + \omega_2(x, y) \mp \sqrt{\omega_1^2(x, y) + \omega_2^2(x, y)}. \quad (1)$$

Выражение (1) включает в себя следующие арифметические конструкции: сумму функций, разность, возведение в степень и извлечение корня. Рассмотрим отдельно каждую из этих процедур.

Принцип функционально-воксельного моделирования основан на компьютерном представлении локальными функциями $L(A_{m+1}, X_m) = 0$ заданной области исходной сложной функции $F(X_{m+1}) = 0$, где A_i – локальная геометрическая характеристика, показывающая отклонение единичного однородного вектора нормали в рассматриваемой точке и закодированная цветом m -мерного образа. При этом локальная функция линейна и раскладывается в многочлен:

$$L(A_{m+1}, X_m) = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_mx_m + a_{m+1} = 0.$$

Рассмотрим необходимые арифметические действия, включённые в состав *R*-функции для вычисления её локальных геометрических характеристик в точках заданной области. Для примера зададимся двумерной областью с двумя локальными функциями в каждой точке (x, y) :

$$\begin{aligned} L_1(x, y, z) &= a_1^{(1)}x + a_2^{(1)}y + a_3^{(1)}z + a_4^{(1)} = 0, \\ L_2(x, y, z) &= a_1^{(2)}x + a_2^{(2)}y + a_3^{(2)}z + a_4^{(2)} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Условимся, что верхний индекс обозначения локальной геометрической характеристики, за-



ключённый в скобки, описывает номер функции. Тогда для упрощения расчётов поделим все коэффициенты уравнения, включая свободный, на коэффициент при аргументе z :

$$L_1(x, y, z) = \frac{a_1^{(1)}}{a_3^{(1)}}x + \frac{a_2^{(1)}}{a_3^{(1)}}y + \frac{a_3^{(1)}}{a_3^{(1)}}z + \frac{a_4^{(1)}}{a_3^{(1)}} =$$

$$= l_1^{(1)}x + l_2^{(1)}y + z + l_4^{(1)} = 0,$$

$$L_2(x, y, z) = \frac{a_1^{(2)}}{a_3^{(2)}}x + \frac{a_2^{(2)}}{a_3^{(2)}}y + \frac{a_3^{(2)}}{a_3^{(2)}}z + \frac{a_4^{(2)}}{a_3^{(2)}} =$$

$$= l_1^{(2)}x + l_2^{(2)}y + z + l_4^{(2)} = 0.$$

При этом значение компонент однородного вектора, как правило, возрастает, что приводит к его денормированию (увеличению длины вектора нормали).

Для получения значений локальных характеристик l_i для суммы аргументов $z = z^{(1)} + z^{(2)}$ достаточно попарно сложить все характеристики уравнения. Докажем это следующим образом:

$$z = z^{(1)} + z^{(2)} =$$

$$= (-l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)}) + (-l_1^{(2)}x - l_2^{(2)}y - l_4^{(2)}) =$$

$$= -(l_1^{(1)} + l_1^{(2)})x - (l_2^{(1)} + l_2^{(2)})y - (l_4^{(1)} + l_4^{(2)}).$$

Аналогично для процедуры вычитания:

$$z = z^{(1)} - z^{(2)} =$$

$$= (-l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)}) - (-l_1^{(2)}x - l_2^{(2)}y - l_4^{(2)}) =$$

$$= -(l_1^{(1)} - l_1^{(2)})x - (l_2^{(1)} - l_2^{(2)})y - (l_4^{(1)} - l_4^{(2)}).$$

При этом $l_3^{(1)} = l_3^{(2)} = 1$.

Отсюда можно сделать вывод о том, что локальные геометрические характеристики, приводящие к ликвидации коэффициента l_3 при вычислении аргументе z в сумме или разности, формируют локальную функцию сложения или вычитания соответственно. Другими словами, для получения слагаемых операций над локальными функциями достаточно сложить их коэффициенты.

Чтобы сохранить линейное свойство локальной функции при операции умножения, достаточно одну из этих функций заменить на значение аргумента z , например:

$$z = z^{(1)}z^{(2)} =$$

$$= (-l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)})(-l_1^{(2)}x - l_2^{(2)}y - l_4^{(2)}) =$$

$$= (-l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)})z^{(2)} =$$

$$= -(l_1^{(1)}z^{(2)})x - (l_2^{(1)}z^{(2)})y - (l_4^{(1)}z^{(2)}).$$

Получить значение подкоренного выражения можно, задавшись следующим свойством:

$$\sqrt{z^{(1)}} = \frac{z^{(1)}}{\sqrt{z^{(1)}}} = \frac{-l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)}}{\sqrt{-l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)}}} =$$

$$= \frac{-l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)}}{\sqrt{z^{(1)}}} = -\frac{l_1^{(1)}}{\sqrt{z^{(1)}}}x - \frac{l_2^{(1)}}{\sqrt{z^{(1)}}}y - \frac{l_4^{(1)}}{\sqrt{z^{(1)}}}.$$

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ R-ФУНКЦИИ ДЛЯ ФВ-МОДЕЛИ

Для наглядности отображения процесса моделирования R -функции пересечения возьмём за исходные функции $z^{(1)}(x, y)$ и $z^{(2)}(x, y)$.

$z^{(1)} = 1 - y^2$ – алгебраическая функция геометрического объекта «симметричная полоса положительных значений x вдоль оси Ox » (рис. 2).

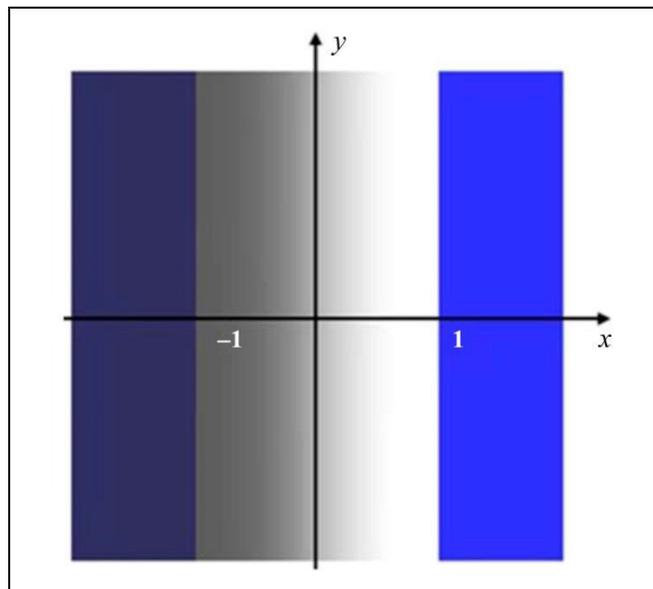


Рис. 2. Воксельное отображение положительной области функции $z^{(1)}$ (синий цвет – отрицательная область значений)

На рис. 3 изображена ФВ-модель для функции $z^{(1)}$.

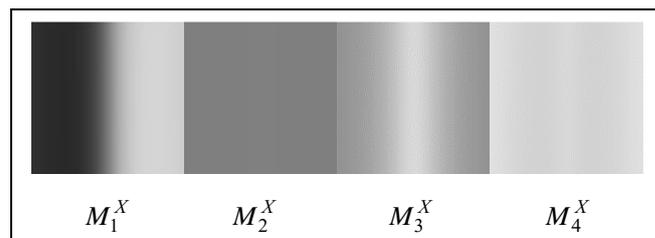


Рис. 3. Воксельное отображение компонент нормали функции $z^{(1)}$

$z^{(2)} = 1 - x^2$ – алгебраическая функция геометрического объекта «симметричная полоса положительных значений y вдоль оси Oy » (рис. 4).

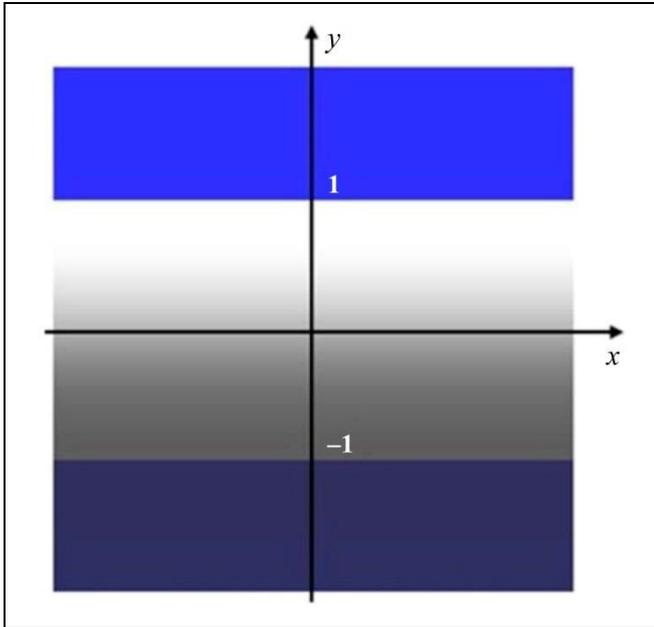


Рис. 4. Воксельное отображение положительной области функции $z^{(2)}$ (синий цвет – отрицательная область значений)

На рис. 5 изображена ФВ-модель для функции $z^{(2)}$.

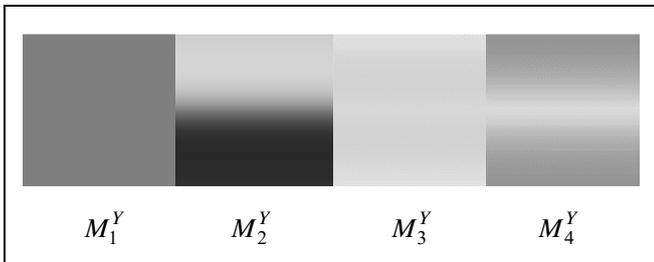


Рис. 5. Воксельное отображение компонентов нормали функции $z^{(2)}$

Представленная на рис. 3 и 5 графическая информация позволяет получить по четыре локальных геометрических характеристики в каждой отдельно взятой точке области и сформировать две локальных функции $L^{(1)}$ и $L^{(2)}$ (2).

Предварительно упростим вычисления. Поделим все коэффициенты локального уравнения на коэффициент a_3 . При этом третий коэффициент приобретает единичное значение:

$$l_{1,2,4}^{(1)} = \frac{a_{1,2,4}^{(1)}}{a_3^{(1)}}, l_{1,2,4}^{(2)} = \frac{a_{1,2,4}^{(2)}}{a_3^{(2)}}, l_3^{(1)} = l_3^{(2)} = 1.$$

Получим значения z для обеих функций на основе рассчитанных коэффициентов:

$$z^{(1)} = -l_1^{(1)}x - l_2^{(1)}y - l_4^{(1)}, z^{(2)} = -l_1^{(2)}x - l_2^{(2)}y - l_4^{(2)}.$$

Приведем окончательную формулировку закона для определения локальных геометрических характеристик R -функции пересечения/объединения:

$$l_i^R = l_i^{(1)} + l_i^{(2)} \mp \left(\frac{l_i^{(1)}z^{(1)} + l_i^{(2)}z^{(2)}}{\sqrt{(z^{(1)})^2 + (z^{(2)})^2}} \right), l_3^R = 1, i = 1, 2, 4.$$

Путём нормирования полученных коэффициентов l_i^R четырёхкомпонентной нормой $N_4 = \sqrt{(l_1^R)^2 + (l_2^R)^2 + (l_3^R)^2 + (l_4^R)^2}$ и приведения к соответствию градации монохромной палитры получим требуемые четыре M -образа функции пересечения (рис. 6).

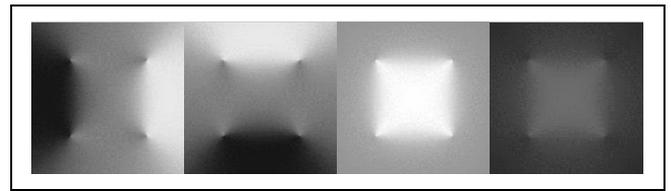


Рис. 6. Воксельное отображение локальных геометрических характеристик на образах M_i

На рис. 7 изображен результат моделирования положительной z -области квадрата со стороной 2.

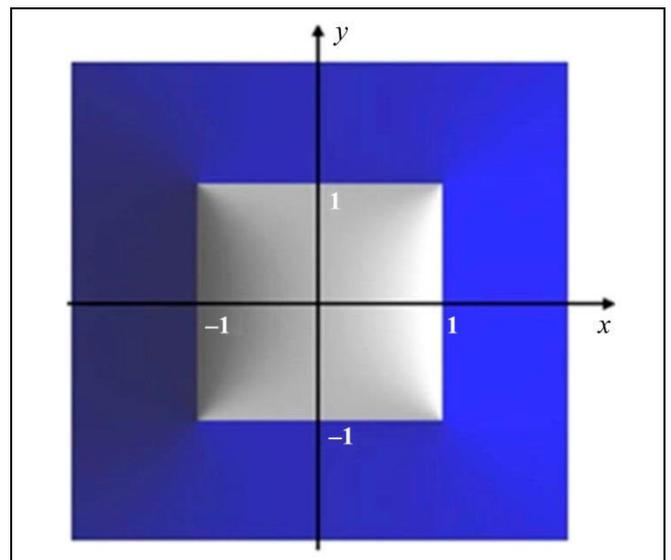


Рис. 7. Воксельное отображение положительной области функции $L^{(1)} \wedge L^{(2)}$ (синий цвет – отрицательная область значений)



3. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПУТИ К ЗАДАННОЙ ЦЕЛИ В ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ СРЕДЕ

Для применения принципов функционально-воксельного моделирования необходимо формализовать описание сцены, в которой будет действовать агент, и описать закон притяжения к заданной точке – цели. Если цель динамически задаваема в работе будущего алгоритма, то сцена может иметь различную сложную конфигурацию и подготавливается заранее в специализированной системе по алгоритму, представленному в работах [11, 12].

Для примера опишем сцену функцией на заданной области 20×20 , где начало координат размещено в центре сцены. Функция сцены будет содержать три концентрических объекта единичного радиуса, расположенных, как показано на рис. 8. Формализация функции сцены будет содержать вложенную структуру следующих функций:

$$z^S = z^{(3)} + z^{(12)} + \sqrt{(z^{(3)})^2 + (z^{(12)})^2},$$

$$z^{(12)} = z^{(1)} + z^{(2)} + \sqrt{(z^{(1)})^2 + (z^{(2)})^2},$$

$$z^{(1)} = 1 - (x+4)^2 - (y-2)^2,$$

$$z^{(2)} = 1 - (x-2)^2 - (y+4)^2,$$

$$z^{(3)} = 1 - (x-4)^2 - (y-4)^2.$$

Чтобы не менять ранее принятые обозначения номера объекта верхним индексом, для удобства демонстрации возведения в квадрат элемент с верхним индексом будем помещать в скобки.

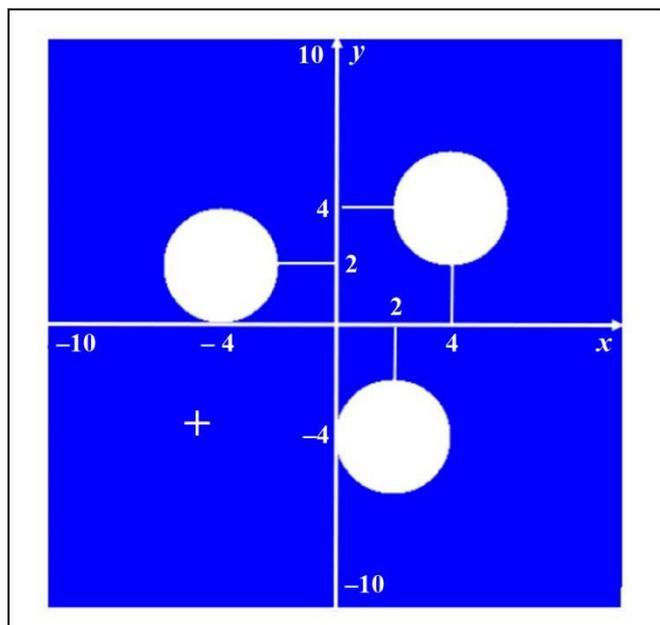


Рис. 8. Сцена, описанная функцией $z^S(x, y)$

Для задания цели необходимо указать на области сцены точку с координатами (x_C, y_C) , которая на рис. 8 изображена крестиком. Теперь любая другая точка сцены должна лежать на поверхности функции перевернутого конуса с вершиной в точке (x_T, y_T) . Путём объединения функции такого конуса с функцией сцены z^S формируется функция поверхности решения поставленной задачи z^G (рис. 9). Любая точка, движущаяся по градиенту такой поверхности, будет стремиться к точке (x_T, y_T) , обходя концентрические объекты.

При построении функционально-воксельной модели вместо структурно вложенной функции $z^S(x, y)$ мы получаем в каждой точке области локальную функцию L^S с локальными геометрическими характеристиками $a_1^S, a_2^S, a_3^S, a_4^S$. Поэтому функцию цели имеет смысл сразу формировать локальными геометрическими характеристиками $a_1^T, a_2^T, a_3^T, a_4^T$.

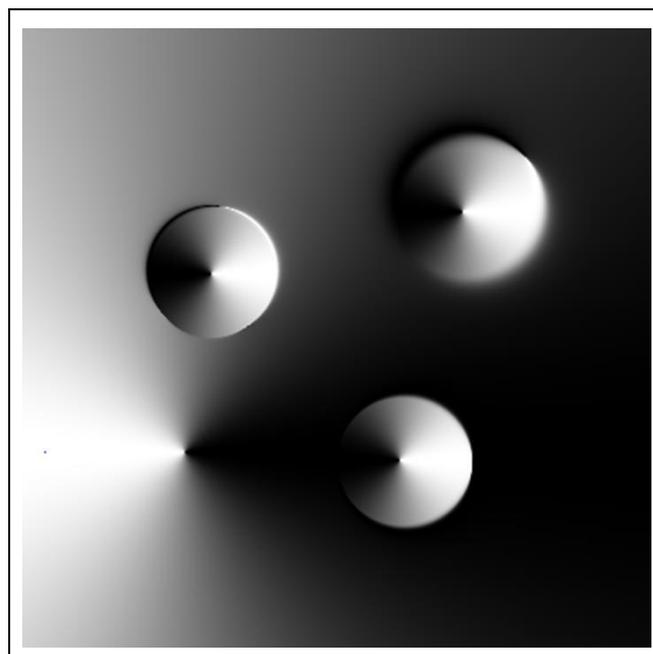


Рис. 9. Сцена, описанная функцией $z^G(x, y)$

Для этого зададимся некоторой текущей точкой положения агента на области сцены (x_A, y_A) . Далее определим для этой точки локальные геометрические характеристики локальной функции цели $L^T(x_A, y_A)$. Зададимся уровнем точки цели, т. е. высотой перевернутого конуса $z_T = -0,001$. Это говорит о том, что поверхность конуса будет мак-

симально развёрнутой относительно плоскости xOy . Тогда расстояние между текущей точкой агента и точкой цели определяется как

$$d = \sqrt{(x_T - x_A)^2 + (y_T - y_A)^2 + (2z_T)^2},$$

а локальные геометрические характеристики в точке агента выражаются следующим образом:

$$a_1^T = \frac{x_T - x_A}{d},$$

$$a_2^T = \frac{y_T - y_A}{d},$$

$$a_3^T = \frac{2z_T}{d},$$

$$a_4^T = -a_1^T x_T - a_2^T y_T - a_3^T \cdot 10^{-3}.$$

Проведём нормировку характеристик $a_1^T, a_2^T, a_3^T, a_4^T$:

$$N_4^T = \sqrt{(a_1^T)^2 + (a_2^T)^2 + (a_3^T)^2 + (a_4^T)^2},$$

$$n_i^T = \frac{a_i^T}{N_4^T}, \quad i = 1, \dots, 4.$$

Подготовим полученные характеристики $n_1^T, n_2^T, n_3^T, n_4^T$, а также взятые из функционально-воксельной модели сцены характеристики $a_1^S, a_2^S, a_3^S, a_4^S$ локальной функции $L^S(x_A, y_A)$ для моделирования результирующей локальной функции $L^G(x_A, y_A)$ конструкцией объединения:

$$l_{1,2,4}^T = \frac{n_{1,2,4}^T}{n_3^T}, \quad l_{1,2,4}^S = \frac{a_{1,2,4}^S}{a_3^S}, \quad l_3^T = l_3^S = 1.$$

Находим локальные геометрические характеристики локальной функции $L^G(x_A, y_A)$:

$$z^T = -l_1^T x - l_2^T y - l_4^T, \quad z^S = -l_1^S x - l_2^S y - l_4^S.$$

$$l_i^G = l_i^T + l_i^S + \left(\frac{l_i^T z^T + l_i^S z^S}{\sqrt{(z^T)^2 + (z^S)^2}} \right),$$

$$l_3^G = 1, \quad i = 1, 2, 4.$$

Получив локальные геометрические характеристики в точке поверхности решения $z^G(x_A, y_A)$, определяем следующую точку направленного отрезка движения по градиенту с шагом S . Чтобы получить косинусы отклонения вектора нормали в плоскости xOy , необходимо привести к двумерной норме $N_2^G = \sqrt{(l_1^G)^2 + (l_2^G)^2}$ две локальных геометрических характеристики:

$$n_i^G = \frac{l_i^G}{N_2^G}, \quad i = 1, 2.$$

Затем необходимо вычислить координаты новой текущей точки положения агента в сцене:

$$x'_A = x_A + S n_1^G, \quad y'_A = y_A + S n_2^G.$$

На рис. 10 демонстрируется работа алгоритма движения по градиенту от точки положения агента к точке цели с учётом обхода трёх концентрических препятствий. Цель отображается красным крестиком, а агент – белым.

Здесь следует отметить, что функционально-воксельная модель сцены описывается и моделируется отдельно, и скорость работы представленного алгоритма не зависит от количества и размеров объекта, помещаемого в ней.

В работу алгоритма поступают четыре образа, описывающие область функции сцены в одинаковом формате – набором локальных функций, что делает алгоритм независимым от сложности состава сцены. Скорость работы такого алгоритма зависит от точности представления функционально-воксельной модели (разрешения образов), а также от параметра S – длины шага смещения по градиенту.

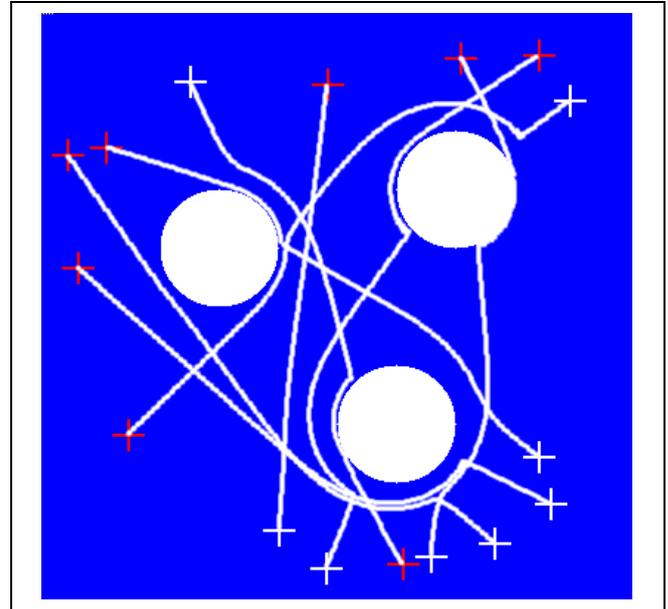


Рис. 10. Пример прокладки пути для движения агентов в сцене с тремя препятствиями

На рис. 11 демонстрируется движение к цели по градиенту для сцены с 25-ю регулярно распределёнными концентрическими объектами.

На рис. 12 демонстрируется движение к цели по градиенту для сцены сложной геометрии.

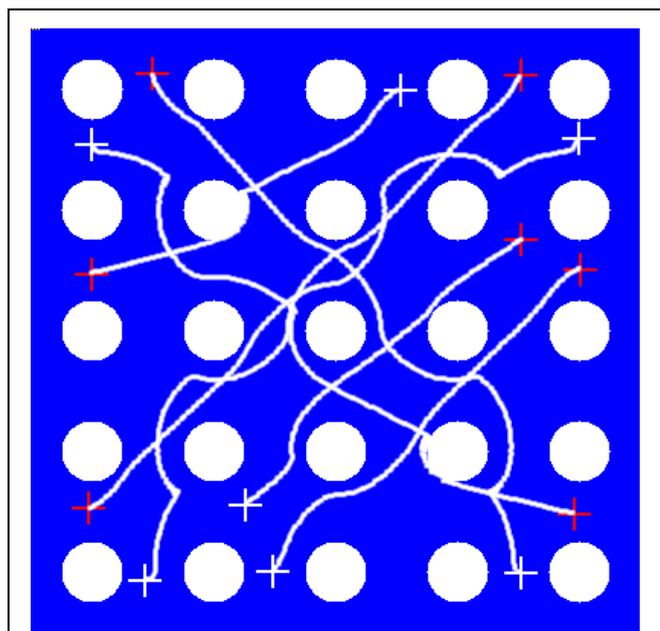


Рис. 11. Пример прокладки пути для движения агентов в сцене с 25-ю препятствиями

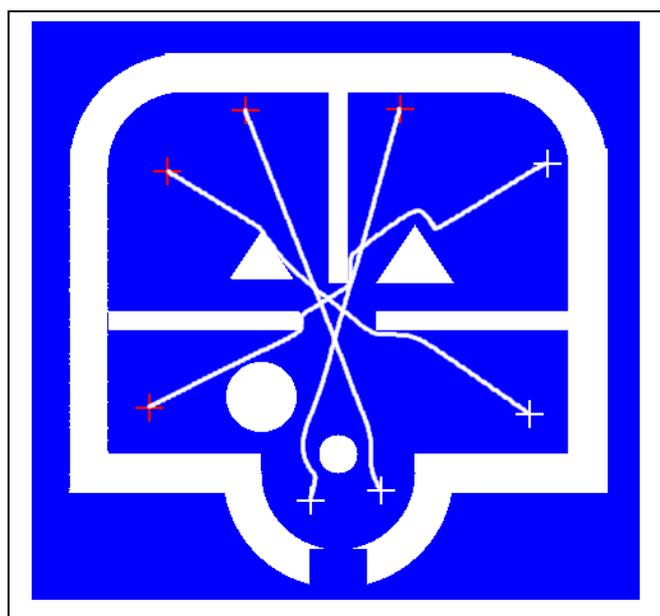


Рис. 12. Пример прокладки пути для движения агентов в сцене сложной геометрии

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученный результат позволяет использовать новый инструмент функционально-воксельного моделирования, обеспечивающий теоретико-множественные операции над локальными функциями, составляющими прямоугольную область. Он даёт возможность оперировать данными локальной геометрии объекта в реализации описания

сложных аналитических конструкций на компьютере для дальнейшего применения в динамических алгоритмах аналитического конструирования оптимизационных задач. Предложенный алгоритм градиентного движения позволяет подбором параметров моделирования конусной поверхности для градиентного движения изменять траекторию пути внедрением объектов сложной формы, обеспечивая конечный результат прибытия агента к цели. С помощью функционально-воксельной модели можно путём применения расчёта R -объединения локальных функций оперативно решать задачу внедрения нового объекта сцены, такую как конусная поверхность цели, для динамического управления движением агента в сложной геометрической среде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ющенко А.С. Интеллектуальное планирование в деятельности роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2005. – № 3. – С. 5–18. [Yushchenko, A.S. Intellectually planning in the activity of robots // *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*. – 2005. – No. 3. – S. 5–18. (In Russian)]
2. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями // Математика и математическое моделирование. – 2018. – № 01. – С. 15–58. [Liu, W. Path Planning Methods in an Environment with Obstacles (A Review) // *Mathematics & Mathematical Modeling*. – 2018. – No. 01. – P. 15–58. (In Russian)]
3. Васильев С.Н., Локтев М.А., Толок А.В., Толок Н.В. К планированию маршрутов в 3D-среде с многовариантной моделью // Труды СПИИРАН. – 2016. – Вып. 2 (45). – С. 5–25. [Vassilyev, S.N., Loktev, M.A., Tolok, A.V., Tolok, N.B. Route Planning in 3D Environment with Multivariant Model // *SPIIRAS Proceedings*. – 2016. – Iss. 2(45). – P. 5–25. (In Russian)]
4. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Под. ред. В.Х. Пшихопова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 300 с. [Intellectual planning of trajectories of mobile objects in environments with obstacles / Ed. by V.H. Pshihopova. – M.: FIZMATLIT, 2014. – 300 s. (In Russian)]
5. Максименко-Шейко К.В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов и физических полей: Монография. – Харьков: ИПМаш НАН Украины, 2009. – 306 с. [Maksimenko-Shejko, K.V. R-funkcii v matematicheskom modelirovanii geometricheskikh ob'ektov i fizicheskikh polej: Monografija. – Har'kov: IPMash NAN Ukrainy, 2009. – 306 s. (In Russian)]
6. Рвачёв В.Л. Геометрические приложения алгебры логики. – Киев: Техника, 1967. – 212 с. [Rvachjov, V.L. Geometricheskie prilozhenija algebry logiki. – Kiev: Tehnika, 1967. – 212 s. (In Russian)]
7. Рвачёв В.Л., Шейко Т.И. Введение в теорию R-функций // Проблемы машиностроения. – 2001. – Т. 4. – № 1-2. – С. 46–58. [Rvachjov, V.L., Shejko, T.I. Vvedenie v teoriju R-funkcij // *Problemy mashinostroenija*. – 2001. – T. 4. – No 1-2. – S. 46–58. (In Russian)]
8. Толок А.В. Локальная компьютерная геометрия. Уч. пособие. – М.: Ай Пи Ар Медиа, 2022. – 147 с. [Tolok, A.V. Local computer geometry. Study manual. – M.: Ai Pi Ar Media, 2022. – 147 s.]

- Lokal'naja komp'juternaja geometrija. Uch. poso-bie. – M.: IPR-Media, 2022. – 147 s. (In Russian)]
9. Толлок А.В. Функционально-воксельный метод в компьютерном моделировании. – М.: Физматлит, 2016. – 112 с. [Tolok, A.V. Funkcional'no-voksel'nyj metod v komp'juternom modelirovanii. – M.: Fizmatlit, 2016. – 112 s.]
10. Tolok A.V., Tolok N.B. Arithmetic in Functional-Voxel Modeling // Scientific Visualization. – 2022. – Vol. 14, no. 3. – P. 107–121. – URL: <http://sv-journal.org/2022-3/08/en.pdf>.
11. Masłowski, A. Training in Military Robotics and EOD Unmanned Systems // NATO EOD Demonstrations and Trials 2014. – Trenčín, 2014. – URL: https://www.codcoe.org/files/en/events/nato-eod-demonstrations-trials-2014/3-nato_eod_trenčin-09_2014-masłowski-opt.pdf.
12. Zhong, M., Yang, Y., Dessouky, Y., Postolache, O. Multi-AGV scheduling for conflict-free path planning in automated container terminals // Comput. Ind. Eng. – 2020. – Vol. 142. – Art. no. 106371.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.Я. Рубиновичем.

Поступила в редакцию 16.09.2024,
после доработки 08.10.2024.
Принята к публикации 24.10.2024.

Толок Алексей Вячеславович – д-р техн. наук,
✉ tolok_61@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7257-9029>

Толок Наталия Борисовна – канд. техн. наук,
✉ nat_tolok@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5511-4852>

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

© 2024 г. Толок А. В., Толок Н. Б.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

FUNCTIONAL VOXEL MODELING OF A PATH PLANNING ALGORITHM TO A TARGET BASED ON R-FUNCTIONS

A. V. Tolok* and N. B. Tolok**

***Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ tolok_61@mail.ru, **✉ nat_tolok@mail.ru

Abstract. This paper is devoted to analytical approaches to path planning with obstacles. Two analytical modeling principles are compared for obstacles in a scene: the methods of potentials and R -functional modeling. The functional voxel design principle of complex computational processes is presented on an illustrative example of modeling of the R -function for the union/intersection of the domains of two functions. The fundamentals of arithmetic operations over local geometrical characteristics describing the components of a homogeneous unit vector of a local function are discussed. The denormalization principle of such components is demonstrated for application in arithmetic operations constituting an R -function. The scene is modeled by the layout of concentric objects and a local function describing the target by a funnel surface at a given point. A dynamic formation algorithm is considered for the final local function of the union of the funnel and scene surfaces at a current point. The final local function is used to determine the components of the direction vector of gradient-based motion to the target.

Keywords: R -function, functional voxel modeling, local geometrical characteristic, local function, gradient, homogeneous vector, path planning with obstacles.

ПРОГРАММНАЯ 3D-ТРАЕКТОРИЯ ЗАЩИТНИКА В АДТ-ИГРЕ ПРИ НЕПОЛНОЙ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ У ЦЕЛИ[#]

А. П. Потапов*, Е. Я. Рубинович**

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

*✉ potapov@ipu.ru, **✉ rubinvch@gmail.com

Аннотация. В трехмерном пространстве рассматривается АДТ-игра (англ. *Attacker–Defender–Target*), в которой Цель (*Target*) совершает плоское движение по окружности с постоянной скоростью. Атакующий игрок (*Attacker*) движется равномерно и прямолинейно из произвольной точки верхней полусферы. Специфика постановки состоит в том, что на борту Цели имеется мобильный Защитник (*Defender*), в задачу которого входит перехват всех возможных опасных для Цели (в смысле точечной встречи) траекторий движения Атакующего. Задача осложняется тем, что Цель и Защитник в процессе движения не видят атакующего игрока. Им известен лишь начальный пеленг, в то время как текущий пеленг, начальная и текущая дистанции до Атакующего им не известны. По этой причине движение Цели и Защитника предполагается программным.

Ключевые слова: АДТ-игра, программные движения, ограничения на кривизну траектории.

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к математической формализации процессов взаимодействия мобильных объектов типа беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) или автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) в последнее время постоянно растет. Этот тренд обусловлен рядом всем известных объективных причин.

Одной из таких формализаций являются так называемые МДТ- или АДТ-игры (англ. *Missile–Defender–Target* или *Attacker–Defender–Target*). В них кроме традиционных для игр преследования – уклонения участников (как собственно преследователя, так и преследуемого им уклоняющегося игрока-цели) принимает участие третий игрок – Защитник. Защитник и уклоняющийся игрок-цель, действуя согласованно, образуют коалицию, которая играет против атакующего игрока. В задачу Защитника входит перехват Атакующего на траектории его движения или отвлечение Атакующего

от намеченной им траектории преследования в случаях, когда Защитник играет роль ложной цели.

В этих задачах особое место занимает вопрос об априорной и текущей информации, доступной игрокам в процессе преследования и уклонения.

В статье [1] решается плоская дифференциальная игра одного преследователя против коалиции двух целей – истинной и ложной. В этой игре преследователь, имеющий круговую зону обнаружения радиуса R , минимизирует время до момента пересечения круга обнаружения с ложной целью; истинная цель, имеющая начальное положение вне зоны обнаружения, максимально увеличивает минимальное расстояние до преследователя.

В работе [2] задача перехвата решена для случая, когда преследователь оборудован зоной обнаружения, где опасными для Цели являются все те траектории движения преследователя, по которым Цель входит в эту зону. В данной работе решается задача построения и оптимизации траектории ложной цели при не полностью известных фазовых координатах преследователя. Публикация [2] является продолжением работы, начатой в статьях [3–5].

[#] Работа выполнена при частичной поддержке РФФ, грант № 23-29-00448.

Основная идея, предложенная в работе [2] и используемая в настоящей работе, заключается в том, что траектория ложной цели строится таким образом, чтобы перехватывать преследователя на тех траекториях, на которых создается опасность для истинной цели, движущейся по выбранному пути уклонения. В данном случае в статье [2] опасной для истинной цели является та единственная траектория преследователя, на которой реализуется его задача: встреча с истинной целью на выбранной прямолинейной траектории уклонения.

Результаты последних исследований представлены в работах [6–22]. В этих статьях все утверждения касаются проблем с точной информацией о текущих позициях игроков. Проблема, рассматриваемая в этой статье, связана с неполнотой информацией. Цель знает о нападающем только два параметра: его скорость и начальный пеленг. Важная информация о расстоянии до преследователя недоступна.

Эта формулировка является простейшей математической формализацией последующих действий в следующих реальных жизненных ситуациях.

- Тяжелый бомбардировщик уклоняется от атаки ракетой класса «воздух – воздух». Предполагаемая схема передачи информации соответствует тому, что самолет оснащен (пассивным) электронно-оптическим датчиком.

- Подводная лодка уклоняется от торпедной атаки.

- Подводная лодка уклоняется от мобильной поисковой системы.

Следует отметить, что настоящая работа является продолжением работы Р. Бойелла [4, 5]. Однако это не теоретико-игровой анализ сценария защиты Цели, и основное внимание уделяется кинематике боя в условиях неполной априорной информации. Еще раз подчеркнем, преследователь не маневрирует – он сохраняет курс – но курс преследователя и расстояние до преследователя неизвестны коалиции, защищающей Цель.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается игра трех игроков в трехмерном пространстве – Атакующего A , Защитника D и Цели T . Известно, что Цель движется по окружности фиксированного радиуса R с постоянной линейной скоростью v_T .

В начальный момент времени Цель получает информацию о том, что с выделенной прямой (линия начального пеленга) по Цели был выпущен атакующий объект A . При этом точка старта Ата-

кующего для Цели не известна, однако известно, что Атакующий движется из верхней полусферы по заранее выбранной прямой с постоянной скоростью $v_A > v_T$. В ответ на это в тот же момент времени Цель выпускает Защитника, движение которого программно, а скорость v_D постоянна, причем $v_T < v_D < v_A$.

Требуется построить такую траекторию движения Защитника, которая перехватывала бы Атакующего на всех возможных опасных для Цели (в смысле точечной встречи Цели и атакующего игрока) траекториях его движения.

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Обозначим параметрическое время задачи через τ и предположим, что Защитник планирует перехватить Атакующего в некоторый упреждающий момент времени $t = t(\tau)$. Зафиксируем τ и рассмотрим рис. 1, иллюстрирующий геометрическое описание задачи.

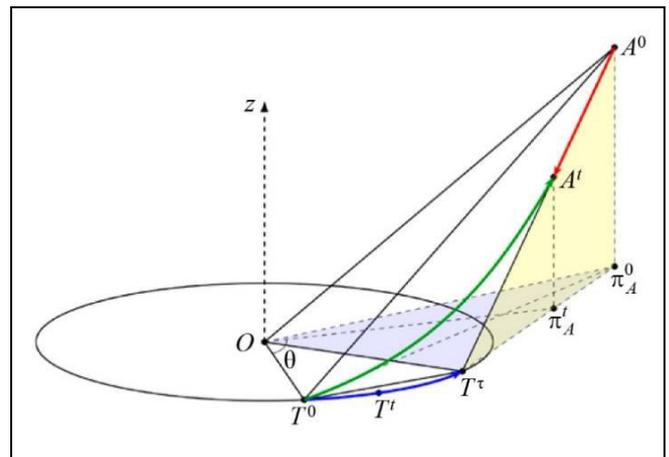


Рис. 1. Геометрическое описание задачи

Точкой O обозначим центр окружности, по которой движется Цель. Точками A и T обозначены положения Атакующего и Цели соответственно, причем верхним индексом отмечен момент времени, в который соответствующий игрок находился в данной точке пространства. Например, T^0 и A^0 – точки, в которых находились Цель и Атакующий соответственно в начальный момент времени ($\tau = 0$). Точки π_A^0 и π_A^t , в свою очередь, суть проекции точек A^0 и A^t на плоскость OT^0T^t соответственно.

Выделенная на рис. 1 синим дуга $\cup T^0T^tT^t$ – траектория движения Цели за время τ . Пусть v



момент времени $\tau=0$ Цель получила информацию, что из некоторой неизвестной начальной точки A^0 в верхней полусфере, расположенной на известном луче, выходящем из точки T^0 , прямолинейно с постоянной скоростью движется атакующий объект. Наклон прямой A^0T^0 при этом задается двумя углами: $\angle OT^0\pi_A^0 = \gamma$, $\angle A^0T^0\pi_A^0 = \lambda$.

Тогда для перехвата Цели в точке T^τ в момент времени τ Атакующий, начав движение из точки A^0 , должен двигаться по отрезку A^0T^τ . При этом длина пройденного Атакующим пути с момента старта будет составлять $A^0T^\tau = v_A\tau$.

Для противодействия Атакующему (чтобы он не перехватил Цель в точке T^τ) Цель выпускает в начальный момент времени $\tau=0$ Защитника, задача которого – перехватить Атакующего в упреждающей точке A^t в некоторый момент времени $t(\tau) \leq \tau$.

Для аналитического описания этого эпизода введем цилиндрическую систему координат с центром в точке O , осью Oz , направленной вверх перпендикулярно плоскости OT^0T^τ , и углом θ , отсчитываемым от прямой OT^0 в направлении движения Цели.

3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Найдем координаты точки A^t в выбранной цилиндрической системе координат. Для этого рассмотрим треугольник ΔOT^0T^τ . Для него верны соотношения

$$\angle T^0OT^\tau = \eta = \frac{v_T}{R}\tau, T^0T^\tau = L = 2R\sin\frac{\eta}{2}. \quad (1)$$

Тогда угол

$$\angle T^\tau T^0\pi_A^0 = \zeta = \frac{\pi - \eta}{2} - \gamma.$$

Обозначим отрезок $T^0T^\tau = v$. Тогда по теореме косинусов для треугольника ΔOT^0T^τ

$$v^2 \cos^2 \lambda + L^2 - 2Lv \cos \lambda \cos \zeta = (T^\tau \pi_A^0)^2.$$

С другой стороны,

$$(T^\tau \pi_A^0)^2 + (A^0 \pi_A^0)^2 = v_A^2 \tau^2, \text{ где } A^0 \pi_A^0 = v \sin \lambda$$

что приводит к следующему квадратному уравнению относительно v :

$$v^2 - 2Lv \cos \lambda \cos \zeta + L^2 - v_A^2 \tau^2 = 0.$$

Его решение имеет вид

$$v = L \cos \lambda \cos \zeta \pm \sqrt{L^2 (\cos^2 \lambda \cos^2 \zeta - 1) + v_A^2 \tau^2}.$$

Утверждение. При $v_A > v_T \forall \tau \geq 0$ справедливо неравенство

$$v_1 = L \cos \lambda \cos \zeta - \sqrt{L^2 (\cos^2 \lambda \cos^2 \zeta - 1) + v_A^2 \tau^2} \leq 0.$$

Доказательство.

В случае, если первое слагаемое меньше нуля, неравенство автоматически верно. Поэтому рассмотрим случай, когда первое слагаемое неотрицательно.

Перенесем корень в правую часть неравенства и возведем в квадрат полученное выражение. Тогда получим неравенство

$$L^2 \cos^2 \lambda \cos^2 \zeta \leq L^2 (\cos^2 \lambda \cos^2 \zeta - 1) + v_A^2 \tau^2.$$

Очевидно, что это неравенство равносильно следующему:

$$L^2 \leq v_A^2 \tau^2.$$

С учетом равенств (1) последнее неравенство эквивалентно

$$2R \sin\left(\frac{v_T}{2R}\tau\right) \leq v_A \tau.$$

С учетом вида функций в левой и правой части неравенство будет верным, если верным является соответствующее неравенство для производных левой и правой частей при $\tau=0$:

$$v_T \leq v_A,$$

что действительно верно по условиям теоремы. ♦

В таком случае из подобия треугольников $\Delta T^\tau \pi_A^0 A^0$ и $\Delta T^\tau \pi_A^t A^t$ (выделены желтым на рис. 1) координата z точки A^t выражается как

$$z = \pi_A^t A^t = v \sin \lambda \cdot \frac{\tau - t}{\tau}.$$

Следующим шагом найдем косинус угла $\angle OT^\tau \pi_A^0 = \omega$. Для этого запишем теорему косинусов для треугольников $\Delta OT^0 \pi_A^0$ и $\Delta OT^\tau \pi_A^0$:

$$(O\pi_A^0)^2 = R^2 + v^2 \cos^2 \lambda - 2Rv \cos \lambda \cos \gamma,$$

$$(O\pi_A^0)^2 = R^2 + v_A^2 \tau^2 - v^2 \sin^2 \lambda -$$

$$- 2R\sqrt{v_A^2 \tau^2 - v^2 \sin^2 \lambda} \cos \omega.$$

Приравняв правые части равенств, получаем выражение для $\cos \omega$:

$$\cos \omega = \frac{v_A^2 \tau^2 + 2Rv \cos \lambda \cos \gamma - v^2}{2R\sqrt{v_A^2 \tau^2 - v^2 \sin^2 \lambda}}.$$

Далее, записывая теорему косинусов для треугольника $\Delta OT^\tau \pi_A^t$, выводим следующее выражение для отрезка:

$$(O\pi_A^t)^2 = r^2 = R^2 + v_A^2 (\tau - t)^2 -$$

$$- z^2 - 2R\sqrt{v_A^2 (\tau - t)^2 - z^2} \cos \omega.$$

Аналогично, записывая для этого же треугольника теорему синусов, находим

$$\sin \varphi = \frac{\sqrt{v_A^2 (\tau - t)^2 - z^2}}{r} \sin \omega, \text{ где } \varphi = \angle T^\tau O \pi_A^t.$$

Таким образом, получаем следующие выражения для локализации точки A^t в цилиндрической системе координат:

$$z = v \sin \lambda \cdot \frac{\tau - t}{\tau}, \quad (2)$$

$$r^2 = R^2 + v_A^2 (\tau - t)^2 - z^2 - 2R \sqrt{v_A^2 (\tau - t)^2 - z^2} \cos \omega, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \theta &= \eta + \varphi \\ &= \eta + \arcsin \frac{\sqrt{v_A^2 (\tau - t)^2 - z^2}}{r} \sin \omega. \end{aligned} \quad (4)$$

Замечание. Имеет место также другой случай расположения прямой $O\pi_A^0$, отличный от представленного на рис. 1 – когда эта прямая пересекает отрезок $T^0 T^\tau$. Такая конфигурация геометрических объектов приводит к тому, что в последней формуле итоговый координатный угол θ будет выражаться разностью углов (5), а не суммой (4), что нужно учитывать при моделировании:

$$\theta = \eta - \varphi. \quad (5)$$

Непосредственной проверкой также можно убедиться, что изменения других величин, например, угла ζ , на конечный результат влияния не оказывают. ♦

Таким образом, в момент времени t защитник должен находиться в точке A^t с координатами, удовлетворяющими уравнениям (2)–(4). При этом известно, что в цилиндрической системе координат квадрат модуля скорости удовлетворяет равенству [23]

$$v_D^2 = \dot{r}^2 + r^2 \dot{\theta}^2 + \dot{z}^2, \quad (6)$$

где точка означает оператор производной $\frac{d}{d\tau}$.

С учетом того, что $r = r(t(\tau), \tau)$, $\theta = \theta(t(\tau), \tau)$, $z = z(t(\tau), \tau)$, подстановка выражений (2)–(4) в формулу (6) приводит к следующему уравнению динамики для времени перехвата $t(\tau)$:

$$A(t(\tau), \tau) \dot{t}^2 + B(t(\tau), \tau) \dot{t} + C(t(\tau), \tau) = 0. \quad (7)$$

Коэффициенты уравнения (7) получаются путем дифференцирования равенств (2)–(4). Собственно аналитические выражения для этих коэф-

фициентов были получены при помощи пакета символьных вычислений Maple; в частности, оказалось, что $A(t(\tau), \tau) = v_A^2$. Другие же коэффициенты, ввиду их громоздкости, здесь не приводятся.

Уравнение (7), как квадратное по $\dot{t}(\tau)$, можно записать в виде, разрешенном относительно производной

$$\begin{aligned} \dot{t}(\tau) &= (-B(t(\tau), \tau) \pm \\ &\pm \sqrt{B^2(t(\tau), \tau) - 4A(t(\tau), \tau)C(t(\tau), \tau)}) \times \\ &\times (2A(t(\tau), \tau))^{-1}. \end{aligned}$$

В качестве начального условия выберем $t(0) = 0$. Это делается из тех соображений, что для перехвата Цели в момент времени $\tau = 0$ Атакующий и Цель должны находиться в одной точке пространства. Это означает, что позиция Защитника должна совпадать с положением Цели и Атакующего в один и тот же момент времени, т. е. время перехвата равно нулю.

4. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Выберем следующие значения параметров модели:

$$\begin{aligned} R &= 1, v_A = 1, v_D = \frac{3}{4}, v_T = \frac{1}{2}, \\ \gamma &= \frac{\pi}{6}, \lambda = 0,05\pi, \tau \in [0; 3,5]. \end{aligned}$$

При таких значениях параметров численное моделирование дает результат, представленный на рис. 2. На нем серым цветом выделен цилиндр радиуса R , построенный на окружности O , по которой уклоняется Цель. Толстой синей линией (дуга $\cup T^0 T^\tau$) выделена траектория движения Цели, толстой красной линией (отрезок $\hat{A}^0 A^t$) выделена траектория движения Атакующего, толстой зеленой линией ($T^0 A^t$) выделена траектория движения Защитника. При этом пунктиром выделена часть траектории, лежащая внутри цилиндра.

Прямая $T^0 \hat{A}^0$ – линия начального пеленга, \hat{A}^0 – точка, из которой должен начать движение Атакующий, чтобы перехватить Цель в точке T^τ , а точка π_A^0 есть проекция точки \hat{A}^0 на плоскость окружности O .

Проведем моделирование при тех же значениях параметров, но увеличим время моделирования до 5. Результаты приведены на рис. 3 и 4.

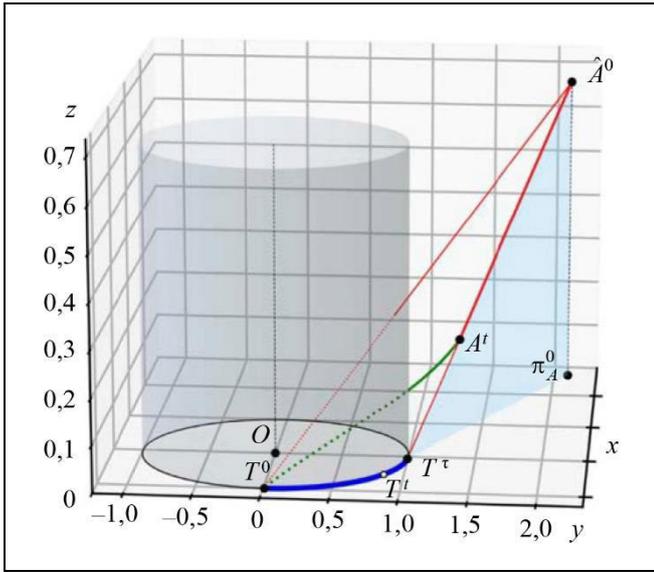


Рис. 2. Результаты численного моделирования при $\tau \in [0; 3,5]$

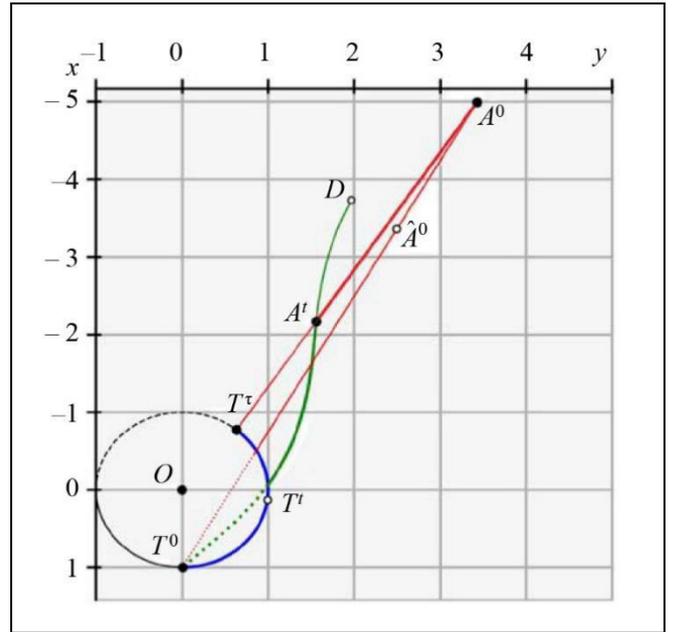


Рис. 4. Результаты численного моделирования при $\tau \in [0; 5]$ в проекции на плоскость xy

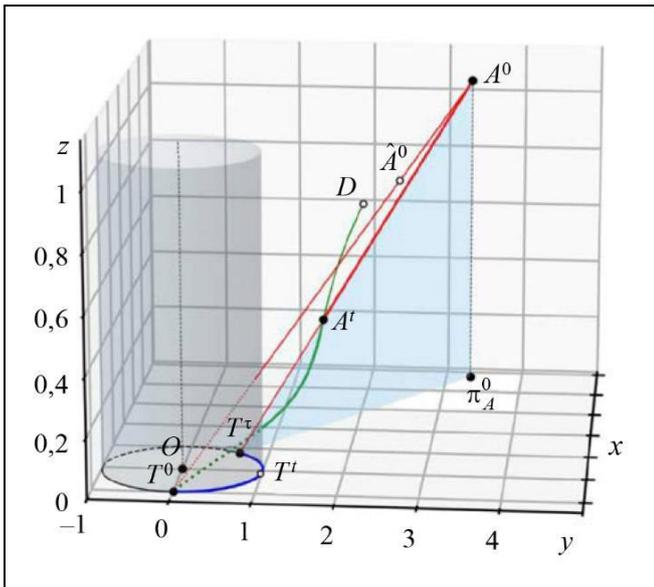


Рис. 3. Результаты численного моделирования при $\tau \in [0; 5]$

На рис. 3 и 4 введены те же обозначения, что и на рис. 2, но здесь \hat{A}^0 – точка, из которой должен начать движение Атакующий, чтобы перехватить Цель в момент времени $\tau = 3,5$ (т. е. совпадающая с точкой \hat{A}^0 на рис. 2), а A^0 есть точка, из которой должен начать движение Атакующий, чтобы перехватить Цель в точке T^t при $\tau = 5$.

При этом, если провести моделирование до $\tau = 7$, то после точки A^t Защитник продолжит движение по кривой A^tD до некоторой точки D и далее.

Интересным представляется также случай использования двух или более защитников. В рассмотренной постановке это не имеет смысла, так как точку возможного перехвата можно восстановить однозначно, используя имеющуюся информацию о движении атакующего. Однако, например, если скорость атакующего неизвестна, но может принимать лишь ограниченное число значений, то можно построить множество точек возможного перехвата, которые, в свою очередь, можно распределить по защитникам и к каждой применить описанный выше алгоритм. Более того, в такой постановке имеет смысл распределение атакующих объектов по степени опасности, что будет рассмотрено в дальнейшем.

Известным может быть в том числе и диапазон значений скорости атакующего. В таком случае имеет смысл постановка оптимизационной задачи, решением которой была бы траектория защитника, обеспечивающая минимальную вероятность перехвата цели. Естественно предположить, что использование более чем одного защитника в такой задаче может существенно повысить выживаемость защищаемого объекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен маневр уклонения равномерно движущейся по окружности на плоскости Цели от атаки из верхней полусферы равномерно и прямо-

линейно движущегося атакующего игрока. Для срыва атаки Цель использует мобильного Защитника, который, двигаясь программно, по угловой информации об Атакующем в момент начала преследования, строит свой маневр так, чтобы перехватывать все опасные для Цели (в смысле точечной встречи с Преследователем) траектории движения Преследователя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanov, M.N., Maslov, E.P.* On One Problem of Deviation // Automation and Remote Control. – 1984. – Vol. 45, no. 8. – P. 1008–1014.
2. *Zheleznov, V.S., Kryakovskii B.S., Maslov, E.P.* On a Catch Problem // Automation and Remote Control. – 1996. – Vol. 57, no. 8. – P. 1072–1078.
3. *Rubinovich, E.Ya.* Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a Priori Information // Dynamic Games and Applications. – 2019. – Vol. 9. – P. 851–857.
4. *Boydell, R.L.* Defending a Moving Target against Missile or Torpedo Attack // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1976. – Vol. AES-12, no. 4. – P. 582–586.
5. *Boydell, R.L.* Counterweapon Aiming for Defence of a Moving Target // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1980. – Vol. AES-16, no. 3. – P. 402–408.
6. *Shneydor, N.A.* Comments on “Defending a Moving Target against Missile or Torpedo Attack” // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 1977. – Vol. AES-13, no. 3. – P. 321–321.
7. *Garcia, E., Casbeer, D.W., Pham, K. and Pachter, M.* Cooperative Aircraft Defense from an Attacking Missile // Proc. of the 53th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). – Los Angeles, USA, 2014. – P. 2926–2931.
8. *Pachter, M., Garcia, M., and Casbeer, D.W.* Active Target Defense Differential Game // Proceedings of 52nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. – Allerton, 2014. – P. 46–53.
9. *Perelman, A., Shima, T., and Rusnak, I.* Cooperative Differential Games Strategies for Active Aircraft Protection from a Homing Missile // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2011. – Vol. 34, no. 3. – P. 761–773.
10. *Rusnak, I., Weiss, H., and Hexner, G.* Guidance Laws in Target-Missile-Defender Scenario with an Aggressive Defender // Proc. of the 18th IFAC World Congress. – Milano, Italy, 2011. – P. 9349–9354.
11. *Rusnak, I.* The Lady, the Bandits and the Body-Guards – a Two Team Dynamic Game // Proc. of the 16th IFAC World Congress. – Prague, Czech Republic, 2005. – P. 441–446.
12. *Shima, T.* Optimal Cooperative Pursuit and Evasion Strategies against a Homing Missile // AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2011. – Vol. 34, no 2. – P. 414–425.
13. *Yamasaki, T., and Balakrishnan, S.N.* Terminal Intercept Guidance and Autopilot for Aircraft Defense against an Attacking Missile via 3D Sliding Mode Approach // Proc. of the 2012 American Control Conference (ACC). – Montreal, 2012. – P. 4631–4636.
14. *Yamasaki, T., Balakrishnan, S.N., and Takano, H.* Modified Command to Line-of-Sight Intercept Guidance for Aircraft Defense // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2013. – Vol. 36, no. 3. – P. 898–902.
15. *Liu, Y., Qi, N., and Shan, J.* Cooperative Interception with Double-Line-of-Sight-Measuring // Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference. – Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013. – Art. no. AIAA 2013-5112.
16. *Qi, N., Sun, Q., Zhao, J.* Evasion and Pursuit Guidance Law against Defended Target // Chinese Journal of Aeronautics. – 2017. – Vol. 30, no. 6. – P. 1958–1973.
17. *Weissand, M., Shimazand, T., Rusnak, I.* Minimum Effort Intercept and Evasion Guidance Algorithms for Active Aircraft Defense // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2016. – Vol. 39, no. 10. – P. 2297–2311.
18. *Garcia, E., Casbeer, D.W., Pachter, M.* Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // IET Control Theory and Applications. – 2017. – Vol.11, no. 17. – P. 2985–2993.
19. *Garcia, E., Casbeer, D.W., Pachter, M.* The Complete Differential Game of Active Target Defense // Journal of Optimization Theory and Applications. – 2021. – Vol. 191. – P. 1–25.
20. *Gong, X., Chen, W., Chen, Z.* Intelligent Game Strategies in Target-Missile-Defender Engagement Using Curriculum-Based Deep Reinforcement Learning // Aerospace. – 2023. – Vol. 10, no. 2. – Art. no. 133.
21. *Галяев А.А., Самохин А.С., Самохина М.А.* Моделирование отсрочки поимки цели в АДТ-игре с использованием одного или двух защитников // Проблемы управления. – 2024. – № 2. – С. 83–94. [*Galyaev, A.A., Samokhin, A.S., Samokhina, M.A.* Modeling of Target’s Interception Delay in an ADT Game with One or Two Defenders // Control Sciences. – 2024. – No. 2. – P. 72–87.]
22. *Потапов А.П., Галяев А.А.* Противодействие алгоритму наведения в игре трех игроков. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2024. – Т. 25, № 11. – С. 575–584. [*Potapov, A.P., Galyaev, A.A.* Countermeasures Against the Attacker’s Homing Algorithm in a Game of Three Players // Mekhatronika, Avtomatizatsia, Upravlenie. – 2024. – Vol. 25, no. 11. – P. 575–584. (In Russian)]
23. *Маркеев А.П.* Теоретическая механика: Учебник для университетов. – М.: ЧеРо, 1999. – 572 с. [*Markeev, A.P.* Teoreticheskaya mekhanika: Uchebnik dlya universitetov. – М.: ЧеРо, 1999. – 572 s. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Афанасьевым.

Поступила в редакцию 31.10.2024,
после доработки 04.12.2024.
Принята к публикации 05.12.2024.

Потапов Антон Павлович – математик,
✉ e-mail: potapov@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0008-5899-5588>

Рубинович Евгений Яковлевич – д-р техн. наук,
✉ e-mail: rubinvch@gmail.com
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2949-0440>

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

© 2024 г. Потапов А. П., Рубинович Е. Я.



Эта статья доступна по [лицензии Creative Commons «Attribution» \(«Атрибуция»\) 4.0 Всемирная](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



BUILDING A DEFENDER'S 3D PROGRAM PATH IN AN ADT GAME WITH INCOMPLETE A PRIORI TARGET INFORMATION

A. P. Potapov* and E. Ya. Rubinovich**

Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ potapov@ipu.ru, **✉ rubinvch@gmail.com

Abstract. This paper is devoted to an Attacker–Defender–Target (ADT) game in the 3D space. The Target makes flat circumferential movements with a constant velocity. The Attacker moves uniformly and rectilinearly from an arbitrary point in the upper hemisphere. The distinctive feature of the problem statement is that the Target has an onboard mobile Defender. The Defender is intended to intercept the Attacker's possible paths dangerous to the Target (in the pointwise meeting sense). This task is complicated since the Target and Defender do not see the Attacker during the movements. They know only the initial bearing; the current bearing and the initial and current distances to the Attacker remain uncertain. For this reason, the Target and Defender are assumed to move along a program path.

Keywords: ADT game, program movements, path curvature constraints.

Funding. This work was supported in part by the Russian Science Foundation, project no. 23-29-00448.



XXV ЯСИНСКАЯ (АПРЕЛЬСКАЯ) МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ И ОБЩЕСТВА



Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» открывает прием заявок с докладом на участие в **XXV Ясинской (Апрельской) международной научной конференции по проблемам развития экономики и общества (XXV ЯМНК)**.

Мероприятия XXV ЯМНК состоятся в Москве с **15 по 18 апреля 2025 г.**

Программа конференции будет сформирована в рамках пяти научных тем:

- экономика;
- человеческий капитал и общество;
- инструментальные методы и модели в менеджменте и общественных науках;
- форсайт исследования;
- международные отношения.

Заявки на участие с научным докладом будут приниматься по следующим тематическим секциям:

В рамках научной темы «Экономика»:

- макроэкономика и макроэкономический рост;
- методология экономической науки;
- теоретическая экономика;
- фирмы и рынки;
- финансы и банки.

В рамках научной темы «Человеческий капитал и общество»:

- социальная политика и здравоохранение;
- демография и рынки труда;
- политические процессы;
- социология;
- психология.

В рамках научной темы «Инструментальные методы и модели в менеджменте и общественных науках»:

- инструментальные методы в экономических и социальных исследованиях;
- менеджмент.

В рамках научной темы «Форсайт исследования»:

- сценарии развития России в условиях динамично меняющейся внешней конъюнктуры;
- новые методы и модели научно-технологического и социально-экономического прогнозирования;
- международный симпозиум «Форсайт в быстро меняющемся мире».

В рамках научной темы «Международные отношения»:

- идеи и цивилизации в многополярном мире;
- мировая экономика;
- востоковедение.

Срок приема заявок на участие в конференции с научным докладом – **20 января 2025 г.** Подать заявку на участие в качестве слушателя можно: для граждан РФ – **до 10 апреля 2025 г.**, для граждан иностранных государств – **до 10 марта 2025 г.** Более подробная информация размещена в разделах «Участникам с докладом» и «Слушателям».

Мероприятия конференции пройдут на русском или английском языке, в отдельных случаях на двух языках с синхронным переводом.

Конференция будет проводиться преимущественно в очном формате. Программный комитет оставляет за собой право в исключительных случаях включать в программу докладчиков и слушателей в онлайн-формате.

В рамках XXV ЯМНК, как и в предыдущие годы, будет проведен конкурс заявок на поддержку участия в конференции молодых исследователей из российских регионов.

Как подать индивидуальную заявку на участие с докладом?

Доклад на секционном заседании должен содержать **результаты оригинального научного**



исследования, выполненного с использованием современной исследовательской методологии. Продолжительность доклада – 15-20 минут.

Заявка подается онлайн в системе конференции НИУ ВШЭ до 20 января 2025 г.

К заявке необходимо приложить **развернутую аннотацию доклада**, с учетом нижеперечисленных требований к оформлению:

– в аннотации должна быть дана четкая характеристика рассматриваемой проблемы и меры ее изученности, методологии исследования, его основных результатов, их обоснованности и новизны;

– формат Word или RTF;

– объем **от 3 000 до 7 000 знаков**;

– для русскоязычного доклада аннотация готовится на русском и английском языках, для англоязычного – аннотация только на английском языке.

Один автор может представить на конференции **один личный доклад** и не более одного доклада в соавторстве.

Как подать коллективную заявку?

Группа авторов индивидуальных заявок, зарегистрированных в системе конференции НИУ ВШЭ, **до 20 января 2025 г.** может сообщить в Программный комитет конференции о своем желании представить доклады в рамках одной сессии. Для этого необходимо подать коллективную заявку в личном кабинете системы конференции НИУ ВШЭ.

Коллективная заявка должна соответствовать следующим требованиям:

– не менее 2-х и не более 5-ти докладов в рамках одной сессии;

– не более 2-х докладов, представленных от одной организации;

– все индивидуальные заявки должны быть зарегистрированы в системе конференции.

Примечание. Заявка на представление одного доклада с соавторами является индивидуальной, а не коллективной.

В рамках каждой тематической секции на основе отобранных заявок формируются сессии. Продолжительность одной сессии составляет 1,5 часа. Предложения по формированию сессий могут быть учтены Программным комитетом на этапе экспертизы заявок и формирования программы конференции.

Экспертиза заявок

Отбор заявок проводится в три этапа:

– исключение тех заявок, которые не соответствуют указанным выше требованиям к оформлению заявки;

– проведение экспертной оценки аннотаций на предмет новизны и обоснованности результатов (при этом возможна передача заявки в другую тематическую секцию по решению руководителя);

– принятие решения Программным комитетом о включении докладов в программу конференции на основе полученных экспертных оценок.

Результаты экспертизы и подтверждение участия

Решения о включении докладов в программу XXV ЯМНК или отказе от удовлетворения заявки будут сообщены заявителям по мере поступления результатов экспертизы, но **не позднее 19 марта 2025 г.**

Авторам докладов, отобранных для представления на конференции, предстоит **до 26 марта 2025 г. включительно** подтвердить своё участие в личном кабинете системы конференции НИУ ВШЭ и затем **до 4 апреля 2025 г. включительно** разместить в личном кабинете слайды презентации доклада на английском языке, что является условиями включения докладов в финальную версию программы.

Оплата регистрационного взноса

Для докладчиков и слушателей конференции сумма регистрационного взноса составляет **3 000 рублей**.

От уплаты регистрационного взноса освобождаются:

– студенты/аспиранты всех вузов (при условии предъявлении студенческого билета и прохождении регистрации);

– сотрудники НИУ ВШЭ (при условии предоставлении карточки сотрудника и прохождении регистрации);

– участники, специально приглашенные Программным и Организационным комитетами конференции (в том числе почётные научные докладчики, эксперты, модераторы, спикеры научных круглых столов, дискуссанты и другие приглашённые гости конференции).

Подробная информация об условиях оплаты регистрационного взноса представлена в разделе «Оплата участия».