

ISSN 2712-8687

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

2/2024

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. Вишневский, 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,
В. В. Кульба, 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.),
V. V. Kulba, D. Sc. (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.),
Volgograd – 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: 27 апреля 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

2.2024

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

Алчинов А. И., Гороховский И. Н., Акифьева Е. В.
Состояние и тенденции развития географических
информационных систем 3

Математические проблемы управления

Косоруков О. А., Лемтюжникова Д. В. Алгоритм решения
задач оптимального распределения реентерабельных
ресурсов на сетевых графиках 23

Управление в социально-экономических системах

Варнавский В. Г. Применение мировых моделей
«затраты – выпуск» для анализа структурных сдвигов
и оценки участия отраслей промышленности России
в глобальных производственных цепочках 30

Вега А. Ю., Еналеев А. К. Комплексное оценивание
влияния изменения климата и механизм финансирования
адаптационных мероприятий для инфраструктурных
объектов 42

Невечеря А. П., Попова Е. В. Прогнозирование влияния
управляющих воздействий на динамику отраслевой
структуры рынка труда на основе балансовой
математической модели 60

Управление техническими системами и технологическими процессами

Варюхина Е. В., Клочков В. В. Оценка эффективности
применения интеллектуальных технологий выявления
опасных сочетаний обстоятельств в управлении
безопасностью полетов гражданской авиации 74

Управление подвижными объектами и навигация

Галяев А. А., Самохин А. С., Самохина М. А.
Моделирование отсрочки поимки цели в ADT-игре
с использованием одного или двух защитников 83



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: April 27, 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

2.2024

CONTENTS

Surveys

Alchinov, A. I. , Gorokhovskiy, I. N., and Akif'eva, E. V.
State-of-the-Art and Development Trends of Geographic
Information Systems 3

Mathematical Problems of Control

Kosorukov, O. A. and Lemtyuzhnikova, D. V. An Optimal
Allocation Algorithm for Reentrant Resources on Network
Graphs 23

Control in Social and Economic Systems

Varnavskii, V. G. Structural Shifts and the Participation
of Russian Industries in Global Value Chains: An Analysis Using
World Input–Output Tables 30

Vega, A. Yu. and Enaleev, A. K. Integrated Climate Change
Impact Assessment and an Adaptation Financing Mechanism
for Infrastructure Facilities 42

Nevecherya, A. P. and Popova, E. V. The Sectoral Structure
Dynamics of a Labor Market Based on the Balance
Mathematical Model 60

Control of Technical Systems and Industrial Processes

Varyukhina, E. V. and Klochkov, V. V. Assessing
the Effectiveness of Intellectual Technologies for Identifying
Hazardous Combinations of Events in Civil Aviation Flight
Safety Management 74

Control of Moving Objects and Navigation

Galyaev, A. A., Samokhin, A. S., and Samokhina, M. A.
Modeling of the Target's Interception Delay in an ADT Game
with One or Two Defenders 83

СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

А. И. Алчинов*, И. Н. Гороховский**, Е. В. Акифьева***

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

**НИЦ ТГНО 27 ЦНИИ, г. Москва

*✉ alchinov46@mail.ru, **✉ ginbox@mail.ru, ***✉ lenatalka1@mail.ru

Аннотация. Поддержка принятия решений при управлении сложными организационными и техническими системами сохраняет свою актуальность в связи с растущей ролью и возможностями географических информационных систем, которые и являются объектом настоящего исследования. Анализируется уровень их представления в мировой и российской среде, особенности их развития, а также основные научные результаты, полученные в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. Выделены самые востребованные в сфере хозяйствования технологии и функциональные возможности геоинформационных систем. Геоинформационная система рассмотрена как инструмент обработки и поддержки принятия управленческих решений. Исследованы основные зарубежные и российские геоинформационные системы, основные их характеристики, области применения, тенденции и перспективы развития. Приведены описания геоинформационных технологий и алгоритмов, реализованных в полнофункциональных геоинформационных системах и рассматриваемых как платформы для создания геоинформационных систем различного назначения.

Ключевые слова: геоинформационная система, дистанционное зондирование Земли, хранилище данных, облачный сервис, база знаний, моделирование, визуализация, аэрокосмический снимок, интернет вещей, картографический метод исследования, искусственный интеллект, машинное обучение.

ВВЕДЕНИЕ

Современные географические информационные системы (ГИС) содержат информацию об объектах управления в виде пространственных данных, при обработке которых средствами ГИС можно получить необходимые данные для принятия эффективных управленческих решений. Первые научно-исследовательские и экспериментальные работы по преобразованию традиционных бумажных карт в цифровую форму были начаты в Канаде и далее в США, СССР и в других странах. Одновременно получили развитие методы обработки цифровой информации для картографоматематического моделирования процессов и явлений, а также их отображения на тематических картах.

Геоинформационные системы предоставляют знания о природных явлениях и социально-экономических процессах на основе баз данных и географических знаний в виде компьютерных моделей. При этом ГИС осуществляют сбор, хранение, преобразование, отображение информации, обеспечивают выполнение анализа географической информации и принятие решений для управления исследуемыми объектами и процессами.

В настоящей работе выполнен обзор состояния и тенденций мирового развития ГИС и особенностей проводимых исследований в России с указанием наиболее важных результатов, полученных в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) в период возникновения и развития геоинформационных технологий. ГИС-технологии обусловили появление нового направ-

ления в цифровой картографии, связанного с оперативным созданием карт в реальном масштабе времени и их использованием для принятия управленческих решений в разных сферах человеческой деятельности.

В современных условиях ГИС-технологии ускоренно развиваются. Возможности ГИС связаны с использованием разнообразных анимационных модулей, позволяющих получить неожиданные эффекты при отображении. Перемещение картографического изображения по экрану, смена карт в виде кадров, управление отдельными элементами карты сейчас являются новыми формами работы с картографической информацией, включая визуальные эффекты абстрактного представления содержания ГИС в 3D-сценах.

Целью исследования является раскрытие тенденций развития ГИС и перспективных направлений их совершенствования. Для достижения этой цели проведён анализ зарубежных ГИС, указаны особенности российских ГИС и определены тенденции их дальнейшего развития.

Раскрыты существующие технологические схемы построения ГИС с учётом их практической реализации. В рамках данного аналитического обзора рассмотрены только полнофункциональные ГИС, используемые в России.

Исходная гипотеза исследований состоит в том, что развитие параллельных вычислений, облачных технологий и методов обработки больших данных тесно связаны с разработками ГИС нового поколения, поэтому указанные направления исследований и разработок необходимо рассматривать совместно.

Научная новизна проведённых исследований заключается в определении тенденций развития ГИС общего назначения, расширении круга задач путём использования новых возможностей с опорой на результаты развития информационных технологий.

1. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ: ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ, ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ФУНКЦИИ

К настоящему моменту можно выделить несколько периодов развития геоинформационных технологий.

В начальном периоде были выполнены работы по исследованию новых возможностей картографии с использованием электронных вычислительных средств. Важное значение имели научные работы в области картографии по установлению пространственных связей между объектами с пред-

ставлением их количественных характеристик и атрибутивных данных. Основные результаты работ по ГИС были опубликованы в источниках [1–3]. Чарльз Дана Томлин, автор публикации [1] – создатель алгебры карт, словаря и концепции комбинирования картографических данных для формирования новых карт при их геопространственном анализе.

Первой разработанной ГИС является Canada Geographic Information System (CGIS). Это было началом развития геоинформатики. В этой ГИС были успешно реализованы концептуальные и технологические разработки англо-канадского учёного Роджера Ф. Томлинсона, известного своими работами в области применения электронных вычислительных методов и методов хранения, компиляции и оценки картографируемых данных.

Основной функционал одной из первых ГИС предназначался для земельного учёта, проводимого Канадской службой (*Canada Land Inventory*), и получения статистических данных о землях с последующим применением этих данных при разработке планов землеустройства.

Принципиально новыми в этой ГИС были следующие операции:

- Ввод геоданных сканированием.
- Послойное представление картографической информации; это решение о разделении картографической информации на слои заложило основы разделения геопространственной информации о местоположении объектов и описательной информации об этих объектах [2, 3].
- С использованием алгоритмов (Сазерленда – Ходжмана, Вейлера – Азертонна, Холверда, триангуляционных, линейно-узловых и некоторых других алгоритмов пересечения, объединения и разности многоугольников) впервые были разработаны программы построения оверлеев с последующей возможностью выполнения картометрических операций – расчёта площадей и других характеристик полигонов [1]; все эти программы в той или иной мере реализованы примитивами в ГИС, позволяющими по двум или более растрам равных размеров создавать новый слой карты [2, 3].

В зависимости от пространственной окрестности анализа информации в ГИС различают четыре класса операций: локальные, фокусные, глобальные и зональные. Локальные операции работают с отдельными пикселями растровой карты. Фокусные операции работают с пикселями и примыкающими к ним пикселями. Глобальные операции обрабатывают весь слой. Зональные операции связаны с обработкой областей ячеек, имеющих оди-



наковые значения. Операторы, работающие с элементами карты, могут быть объединены для выполнения отдельной определённой процедуры. Возможно их объединение в сценарий при выполнении более сложных задач. Перечисленные выше операторы, а также модуль GRID (ГИС ArcInfo) составили важные компоненты пространственного анализа ГИС.

Алгебра карт позволяет реализовать инструменты Spatial Analyst, операторы и функции для географического анализа растровых данных при реализации простых и сложных выражений алгебры карт. Она в настоящее время интегрирована в Python с возможностью использования всего функционала Python (в том числе модуля ArcPy), а также расширений (модули, классы, функции и их свойства). Например, объект с именем outRas создаётся с помощью инструмента или оператора, указанного справа от знака равенства [4, 5]:

```
from arcpy.sa import *  
outRas = Slope(«indem»).
```

Данное выражение вычисляет уклон для каждой ячейки в наборе данных indem и создаёт объект Raster для сохранения результатов.

В этом же периоде появляются новые более производительные электронные вычислительные машины, цифровые плоттеры, графические дисплеи и другие периферийные устройства. Одновременно создаются формальные методы пространственного анализа и программные средства для управления базами данных. Ввиду использования ГИС в различных отраслях были исследованы принципиальные возможности в пограничных областях знаний и технологий, что обусловило появление автоматизированных систем навигации, управления движением транспортных средств и т. д.

Образовался большой набор разнообразных программных средств, реализованных в виде настольных ГИС. Области применения ГИС благодаря интеграции с различными базами данных, в том числе и непространственными, расширились. Появились сетевые приложения, поддерживающие индивидуальные наборы данных на отдельных компьютерах. Всё это послужило основой для создания распределённых географических данных [6, 7].

Следующий период характеризуется созданием и развитием крупных геоинформационных проектов для решения государственных задач. Например, в США была создана ГИС для переписи населения в виде карты со специальным форматом картографических данных DIME (Dual Independent

Map Encoding). Этот формат включал прямоугольные координаты перекрёстков с разбивкой улиц на отдельные области картографических полей. Адреса граждан были конвертированы в координаты, представленные графическим сегментом улицы (программа POLYVRT). Государственная поддержка разработки и использования DIME-файлов позволила увеличить число исследовательских работ в области использования ГИС. Были исследованы вопросы навигации с картографической поддержкой при управлении городским транспортом. Использование ГИС при переписи населения в США позволило создать атласы нескольких крупных городов США и упрощённых электронных карт для торговых и транспортных компаний.

Третий этап развития ГИС отсчитывается с начала 1980-х гг. и характеризуется активным применением ГИС и их приложений. В условиях развития средств вычислительной техники разработанные программные продукты и их приложения стали доступными для многих пользователей [6].

В этот период были созданы разнообразные программные средства, настольные ГИС получили дальнейшее развитие. Область применения ГИС расширилась благодаря интеграции с базами непространственных данных и появлению сетевых приложений с поддержкой индивидуальных наборов данных на отдельных компьютерах. Появляется понятие о распределённых базах геопространственных, графических и атрибутивных данных.

Доступность и открытость программных средств позволили использовать и модифицировать существующие ГИС. Значительно возросла потребность в различных географических данных. Начинает формироваться мировая геоинформационная инфраструктура, которая продолжает развиваться, особенно сейчас в Китае.

В настоящее время геоинформационная индустрия реализует ГИС-технологии, которые обеспечивают анализ географической информации для поддержки принятия управленческих решений. Множество существующих зарубежных и российских ГИС различаются по некоторым признакам, например по территориальному охвату, уровню управления, предметной области, функциональности.

Последний признак – функциональность – является основным. Так, полнофункциональные ГИС обеспечивают выполнение операций, связанных с визуализацией выбранных объектов, вводом и редактированием растровых данных. Одновременно они поддерживают топологические отношения

между объектами и построение буферных зон, а также работу с различными видами объектов местности, обеспечивая двухстороннюю связь с базой данных и объектами, нанесёнными на карту. Полнофункциональные ГИС обеспечивают также решение различных задач с использованием различных картографических проекций, включая создание новых условных обозначений с выводом на печать полученных результатов.

События, процессы и явления, исследуемые ГИС, могут быть масштабно-независимыми, пространственно-временными и интегрированными.

Рассмотрим полнофункциональные ГИС, в которых наиболее полно реализованы геоинформационные технологии [8–10].

В настоящее время в России используются более двадцати зарубежных и отечественных полнофункциональных ГИС, наиболее общими характеристиками свойствами которых являются следующие:

- реализация на платформе с единой операционной системой;
- поддержка обменных форматов для взаимодействия с другими информационными системами;
- обеспечение работы с растровыми изображениями большинства известных форматов: TIFF, JPEG, GIF, BMP, WMF и PCX;
- обработка атрибутивной информации всех основных баз данных с использованием драйверов ODBC, BDE.

Для сопоставления и сравнения ГИС необходимо выполнить анализ технологий хранения и работы с данными, которые реализуются различными технологическими схемами построения. Особенности реализации зарубежных и российских ГИС-платформ рассмотрены в работах [11–13].

Первая схема представляется одной или несколькими программами, объединёнными в программную систему. Для хранения полученных результатов используется внутренний формат данных. На начальном этапе каждый разработчик ГИС реализовывал собственные форматы хранения данных; они, как правило, были закрытыми.

Вторая основана на технологии клиент – сервер. Имеет программу для конечного пользователя и программу-сервер, которая ведёт базу пространственных данных. В этих технологиях уже начали применять программы для конвертации данных. Например, конверторы из ГИС «Панорама» в ГИС «НЕВА», из ГИС Mapinfo в ГИС «Панорама» и т. д.

Третья – система, построенная по схеме клиент – сервер, которая для хранения пространственных

данных использует системы управления базами данных на базе SQL-серверов (Microsoft SQL Server, Oracle, MySQL, PostgreSQL и т. п.). Этот этап характеризуется наиболее полными и хорошими связями с западными разработчиками программных средств.

Четвёртая базируется на использовании в качестве хранилища пространственных данных расширений для SQL-серверов или Oracle Locator.

Пятая – облачные ГИС, в которых реализованы возможности доступа к данным любого компьютера, имеющего выход в интернет, с организацией совместной работы с пространственными данными. Используется программное обеспечение, работающее как сервис (SaaS), поэтому его можно использовать на любом устройстве, подключённом к интернету. Инфраструктура позволяет расширять круг пользователей, одновременно работающих с созданной картой. При необходимости данные из различных форматов конвертируются в поддерживаемый формат [14, 15]. Пятый, современный этап технологий построения ГИС, характеризуется недостаточными связями с зарубежными разработчиками программного обеспечения.

Вместе с тем, появление новых технологических схем работы с пространственными данными не означает, что их использование будет целесообразным для решения любых задач. Имеется множество прикладных задач с использованием ГИС, эффективное решение которых может быть реализовано по любой технологической схеме. Выбор той или иной схемы определяется решаемой задачей. При работе с разнородными и распределёнными пространственными данными четвёртая и пятая технологические схемы построения ГИС будут наиболее предпочтительными.

Сейчас ГИС обеспечивают работу с базами данных, которые постоянно пополняются и обновляются. Любая карта может быть представлена в трёхмерном виде с возможностью её обзора. Имеющиеся базы данных позволяют определять местоположение объектов, прокладывать маршруты движения транспортных средств, анализировать земельные участки, получать их количественные и пространственные характеристики. Все данные постоянно актуализируются с использованием растровых и векторных источников. Информация формируется послойно с географической привязкой каждого объекта [2]. Все указанные возможности стали реальностью благодаря совместному использованию средств картографии и информационных технологий, которые были развиты за последние годы. На разных технологических схемах построения ГИС используются базовые программ-



ные средства для связи между данными, редактирования и отображения пространственной и атрибутивной информации. Для решения специализированных задач технологии ГИС применяют приложения картографирования, анализа линейных, площадных и высотных объектов местности, текстовой информации, статистической информации, конвертации данных, включая переход от растрового формата к векторному, а также некоторые вспомогательные программы для предварительной обработки данных.

2. СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЗАРУБЕЖНЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, СТАНДАРТЫ ОБМЕНА ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ДАННЫМИ

Наибольшее распространение в России имеют ГИС на платформе ArcGIS компании ESRI, семейство продуктов на платформе GeoMedia корпорации Intergraph и платформе MapInfo Professional компании Pitney Bowes MapInfo [15]. Используются также другие программные продукты на разных платформах отечественной и зарубежной разработки.

Рассматривая программные продукты, создаваемые на разных платформах, будем исходить из следующих положений, которые достаточно точно описывают возможности ГИС.

- Составление карт – основная функция ГИС.
- ГИС-технологии используют методы картографо-математического моделирования для анализа и отображения полученных результатов в динамическом режиме.
- Картографические проекции и системы координат, используемые в картографии, являются основой для локализации координат и атрибутивной информации объектов в базах данных.
- Тематические карты являются основным источником геопро пространственной информации для работы ГИС.
- Стандарты обмена пространственными данными, реализованные в ГИС, обуславливают возможности работы различных географических систем.

После ввода информации она записывается в базы данных с указанием атрибутов – семантики, отображение полученных данных осуществляется на экране дисплея или выводится на печать, например, на плоттер. Устройства ввода, логико-математической обработки и вывода картографической информации образуют систему автоматизи-

зированной картографической системы (АКС), которая является основой любой ГИС для создания тематических карт и их последующего анализа с целью получения данных для поддержки принятия управленческих решений.

Полной автоматизации всех процессов создания карт с соблюдением необходимых требований на сегодняшний день не достигнуто в связи со сложностью математической формализации творческого процесса дешифрирования объектов и явлений для их отображения на картах [16].

Дальнейшее развитие АКС и ГИС связано с использованием трёхмерного моделирования местности и мультимедийных технологий, которые обеспечивают совместную обработку карт и снимков. Следующий шаг развития этих систем был обусловлен использованием новых клиент-серверных и облачных технологий.

Среди множества форматов, применявшихся в разные периоды разработки ГИС, в современных условиях целесообразно использовать стандарты международной организации Open Geospatial Consortium (OGC). Все OGC-стандарты (в настоящее время их насчитывается около 30-ти) открыты для свободного использования. Дизайн стандартов был построен на парадигме веб-сервисов HTTP для взаимодействия на основе сообщений. Затем эти парадигмы были расширены с помощью общего подхода к протоколу SOAP и привязкам к WSDL (язык описания веб-сервисов, основанный на XML). Значительный прогресс был достигнут в определении веб-служб репрезентативной передачи состояний (REST API), который предусматривает предоставление доступа серверного программного обеспечения к данным клиентским приложениям по определённым URL-адресам, например OGC SensorThings API [13].

Здесь необходимо пояснить: веб-сервис – это способ связи между двумя электронными устройствами по сети, а HTTP-сервис позволяет использовать технологии HTML, PHP, JavaScript для предоставления интерфейса пользователю. При этом веб-сервис с возможностью доступа к геоданным в полном объёме реализован во многих ГИС общего назначения.

В настоящее время большинство зарубежных и основных российских разработчиков поддерживают основные стандарты OGC для обмена геопро пространственными данными: OpenGIS Web Map Service (WMS) Implementation Specification – стандарт обмена геопривязанными растровыми изображениями, построенными на основе данных из одной или нескольких баз пространственных данных по протоколу HTTP [7]. Данные стандарты сейчас являются базовыми для создания единой

среды обмена геопространственной информацией не только в странах Европы, но и в общемировом масштабе. Полноценная поддержка стандартов OGC являлась одним из ключевых требований (до введения санкционных ограничений) при выборе программного обеспечения для создания ГИС.

В табл. 1 приведены основные платформы, на которых реализованы полнофункциональные ГИС. Указанные платформы (п. 1–5), определили развитие геоинформационных технологий. Платформа, указанная в п. 6 – это кроссплатформенное ГИС-решение, поддерживающее различные операционные системы, такие как Linux, Mac OSX, Windows и Android. QGIS позволяет создавать многослойные карты, используя различные проекции, а также просматривать, редактировать и анализировать растровые или векторные данные.

Одной из самых развитых ГИС является SuperMap GIS (Китай) (п. 7), которая, кроме возможностей полнофункциональной ГИС, интегрирует технологию искусственного интеллекта (ИИ). Китайская фирма Huawei стандартизировала приложения и оптимизировала технические решения с

целью достижения значительного прогресса в развитии интернета вещей для реализации в ГИС технологии искусственного интеллекта [12].

Множество различных ГИС, уровень сложности решаемых ими задач, используемые программно-аппаратные средства и их телекоммуникационные возможности определяют типы ГИС:

- Сетевые ГИС – функционируют в масштабе предприятия, обеспечивают совместный доступ к данным ГИС. В качестве сервера базы данных используются реляционные СУБД Oracle, IBM DB/2/Informix, MS SQL Server. Для размещения геопространственных данных в реляционной базе данных используется сервер пространственных данных, например ESRI ArcSDE (SDE – Spatial Database Engine) и ArcGIS 9.2, который интегрирован в ArcSDE [15].

- Персональные ГИС – функционируют на одном компьютере без привлечения сетевых технологий и представлены ГИС массового обслуживания и настольными ГИС.

- Настольные ГИС – элемент корпоративной ГИС для решения отдельных прикладных задач.

Таблица 1

Наиболее развитые платформы, на которых реализованы полнофункциональные ГИС

№	Наименование	Разработчик	Дата первого выпуска	URL
1	ArcGIS	ESRI, Inc. (Исследовательский институт экологических систем, США. Основан в 1969 г.)	27 декабря 1999 г.	https://www.esri.com
2	GeoMedia	Шведская транснациональная компания Hexagon Geospatial (подразделение корпорации Intergraph, США)	1996 г.	https://hexagon.com/products/geome dia
3	MapINFO	Exactly (ранее – Pitney Bowes Software и MapInfo Corporation, США)	1986 г.	http://www.pbinsight.com/welcome/mapinfo/
4	AutoCAD	Autodesk, США	Декабрь 1982 г.	https://www.autodesk.com
5	WinGIS	Progis, Австрия	1993 г.	https://testprogis.jimdo.com
6	PostGIS + QGIS + MapServer + OpenLayers	PostGIS (Канада) QGIS (США) MapServer (США) OpenLayers (США)	2001 г. 2002 г. 1994 г. 26 июня 2006 г.	https://postgis.net/ https://www.qgis.org/ https://www.mapserver.org/ https://openlayers.org/
7	SuperMap GIS	SuperMap Software (Китай)	1994–1996 гг.	URL: https://www.supermap.com



3. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В РОССИИ

В настоящее время наблюдается возрастание спроса на услуги по работе с пространственными данными. США, некоторые страны Европы и в последние годы Китай занимают лидерские позиции по разработке геоинформационных технологий.

Здесь необходимо отметить следующие обстоятельства. Российским специалистам в области ГИС-технологий было понятно, что для эффективной работы нужны данные с привязкой объектов и событий к картам исследуемых территорий. Для обработки данных необходимы были и методы для их пространственного анализа. В начальном периоде развития ГИС не было достаточной информации, поскольку проводившихся работ с геопространственной информацией было недостаточно.

Зарубежный опыт использования ГИС в области информационных технологий стал доступен российским специалистам с начала 2000-х гг. Инструменты ГИС начали применяться в таких отраслях народного хозяйства, как геологическая разведка, энергетика, нефтегазовое и промышленное производство, а также землеустройство, как правило с привлечением зарубежных поставщиков ГИС. Это было обусловлено недостаточной информированностью о возможностях ГИС, качеством существующих картографических материалов, их доступностью и отсутствием единой базы данных по сферам деятельности народного хозяйства [17].

С течением времени произошёл постепенный переход к использованию открытых данных. Объём доступной информации вырос, начали разрабатываться новые методы сбора, анализа и визуализации этих данных.

Особенности развития ГИС в России были обусловлены следующими проблемами:

- отсутствовали современные требования к информации, необходимой для решения задач с использованием этой информации;
- средства сбора, обработки, обновления, хранения и передачи информации не в полной мере удовлетворяли решаемым задачам;
- не было реальных технологий обновления данных;
- отсутствовали российские стандарты картографической информации и семантические данные об объектах местности и других объектах, не было единых форматов обмена цифровыми картографическими данными.

В этих условиях зарубежные платформы для создания ГИС-технологий, различающиеся функциональными возможностями, появились на некоторых предприятиях и в организациях России. С появлением рабочих станций популярность ГИС возросла, это относится к началу 2000-х гг. Но тогда ГИС как технологию для разработки геоинформационных проектов ещё не использовали. В течение некоторого времени с использованием ГИС выполнялись различные картометрические и картографические операции с небольшими объёмами данных. Только в крупных компаниях технологии ГИС стали применять в составе комплексных IT-проектов. Преимущества работы с ГИС-технологиями первыми оценили специалисты картографического профиля. Отметим, что важную роль в популяризации ГИС в России сыграли западные компании, которые уже активно использовали ГИС-технологии [17, 18].

Большой вклад в развитие ГИС-технологий внесла ГИС-Ассоциация, образованная в 1995 г. Специалисты высших учебных заведений, научно-исследовательских, производственных, проектно-конструкторских и других организаций, занятых в области разработки и применения информационных технологий на территории бывшего СССР, на конференциях, семинарах и других мероприятиях приняли идею создания российской инфраструктуры пространственных данных, которая была поддержана в 2004 г. Правительством РФ. Проект включили в Федеральную целевую программу «Электронная Россия (2002–2010 гг.)». Была разработана Концепция создания и развития инфраструктуры пространственных данных как элемента общегосударственного информационного ресурса, которая предусматривала переход к полностью цифровым технологиям получения и использования пространственных данных. В России была создана иерархическая территориально распределённая система сбора, обработки, хранения и предоставления базовых пространственных данных и метаданных, включающая в свой состав подсистемы уровней государственной власти и местного самоуправления [19]. Кроме того, эта система предоставляла пользователям удалённый доступ к цифровым базам пространственных данных и метаданным [20].

В России начали создаваться и развиваться крупные региональные ГИС. Одновременно создаются инструментальные и информационные ГИС.

Использование ГИС становится неотъемлемой частью профессиональной деятельности многих организаций в России. Возможность формирова-

ния многогранных запросов, доступ к внешним базам данных и ведение внутренних баз данных, интеграция с другими информационными системами обусловили развитие геоинформационных технологий во многих отраслях народного хозяйства.

Одновременно ГИС-технологии породили оперативное картографирование – создание и использование карт в реальном или близком к реальному масштабу времени. В качестве исходных данных для оперативного картографирования использовали материалы аэрокосмических съёмок, непосредственных наблюдений и геодезических измерений, включая спутниковые системы, статистические данные, результаты переписей, референдумов, а также кадастровую информацию.

Расширенные возможности и неожиданные эффекты картографических анимаций обусловили быструю их реализацию во многих ГИС. Эффекты панорамирования, изменения перспективы, масштабирование частей изображения, а также облёт территорий над картой с разными скоростями стали обычными процедурами в ГИС [12–14].

Этому способствовали результаты научных работ в области картографии, которые выполнялись параллельно с развитием ГИС-технологий. Разработка ГИС в России начала осуществляться с использованием процедурного программирования, объектно-ориентированного подхода с ориентацией на данные и объекты, с использованием мировых тенденций автоматизации процессов анализа и проектирования программного обеспечения на разных языках программирования. Одновременно создавались дополнительные версии ГИС на иностранных языках, например ГИС «НЕВА» на испанском языке, ГИС «Панорама» на английском языке, ГИС ГеоГраф на нескольких языках.

При этом основными видами геоинформационного анализа остаются:

- работы с базами пространственных и атрибутивных данных, создание моделей поверхностей, построение буферных зон, оверлейные операции, сетевой анализ, агрегирование данных, зонирование и специализированный анализ;
- редактирование структуры базы данных, ввод данных, обновление, редактирование, генерация производной информации на основе выполненного пространственного анализа, моделирование, пространственные и атрибутивные запросы, поиск объектов по определённому условию, формирование и редактирование данных, анализ и автоматическая корректура топологии пространственных данных, позиционирование пространственных

объектов относительно заданной системы координат.

Укажем отрасли народного хозяйства, использующие российские ГИС в качестве инструмента для управления и принятия решений: административно-территориальное управление, телекоммуникационная и нефтегазовая, транспортное и дорожное хозяйство, инженерные коммуникации, сельское и лесное хозяйство, архитектура и строительство, горнодобывающая отрасль, силовые ведомства, государственный сектор, здравоохранение, банковская сфера, градостроительный и земельный кадастр. Организации различных отраслей промышленности становятся все более зависимыми от географической информации для принятия обоснованных решений. В России используются специализированные ГИС. Обычно они формируются из отдельных модулей. Базовый модуль реализует основные функции ГИС: программную поддержку устройств ввода-вывода, экспорт и импорт данных и т. д.

Практически во всех полнофункциональных ГИС возможности по работе с атрибутивной информацией являются однородными. Большинство систем обеспечивает работу со всеми основными СУБД через драйверы ODBC, BDE (ОС Windows) [21].

В преобладающем большинстве случаев возможности современных полнофункциональных ГИС могут быть расширены. Основным способом расширения возможностей является программирование на языках высокого уровня (MS Visual Basic, MS Visual C++, Borland Delphi, Borland C++ Builder) с подключением DLL и OCX-библиотек (ActiveX) [13].

Основные российские ГИС, в которых реализованы современные достижения в области геоинформационных технологий, приведены в табл. 2.

Кроме перечисленных ГИС, в России разработано достаточно много специализированных ГИС, направленных на решение различных более узких отраслевых задач [16].

Из анализа функциональных возможностей ГИС необходимо отметить их обособленность и отраслевую направленность, практическое отсутствие единых обменных форматов. Некоторые ГИС имеют инструментальные средства разработки ГИС-приложений для решения частных задач. Многие государственные ГИС в настоящее время подвержены критическим рискам отказа в обслуживании ИТ-инфраструктуры. В России около 4000 ГИС федерального и регионального значения, в которых использованы иностранные компоненты



Основные современные российские ГИС

Наименование ГИС	Разработчик	URL
ГИС ГеоГраф	ЦГИ ИГ РАН, г. Москва	–
ГИС Карта – 2011	КБ «Панорама», г. Москва	https://gisinfo.ru/item/79.htm
ГИС ИнГео	Центр системных исследований «Интегро», г. Уфа	http://www.geoinfograd.ru/ingeo.htm
ГИС РЕКОД	ОАО «РЕКОД», г. Москва	–
ГИС «Zulu»	ООО «ПолиTERM», г. Санкт-Петербург	https://www.politerm.com/products/geo/zulugis
ГИС ГЕОКАД	ООО «ГЕОКАД плюс», г. Новосибирск	https://geocad.ru
Инструментальная ГИС IndorGIS	ООО «ИндорСОФТ», г. Томск	https://www.sigirgroup.ru/sapr/indorgis.html
Информационная ГИС GeoMixer	SCANEX (ООО Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС»), г. Москва	https://www.scanex.ru/software/web/geomixer
Инструментальная ГИС Credo – Кредо-Диалог	СП «Кредо-Диалог», Республика Беларусь, г. Минск	https://credo-dialogue.ru
Специализированные ГИС «ЦентрПрограммСистем»	ООО «ЦентрПрограммСистем», г. Белгород	URL: https://1cps.ru
Универсальная ГИС Аксиома (для ОС Windows, Linux, macOS)	ООО «ЭСТИ», г. Москва	URL: https://axioma-gis.ru
CSI-MAP	ООО «КСИ-технология», г. Санкт-Петербург	–
Sinteks ABRIS	ООО НТФ «Трисофт», г. Троицк	–
ObjectLand	АО «Радом-Т», г. Таганрог	https://objectland.ru/

ПО или оборудования. Большинство из них не соответствуют современным требованиям цифрового технологического суверенитета. Более 60 % российских ГИС используют средства виртуализации иностранного происхождения VMware и Microsoft Hyper-V [22]. Виртуализация сейчас стала главным трендом российских информационных технологий и в ближайшее время указанная проблема будет решена.

Ввиду использования в России различных зарубежных ГИС при разработке российских ГИС необходимо было обеспечить возможности использования уже созданных пространственных данных существующими ГИС в их обменных форматах. При необходимости разрабатывали и различные конвертеры.

Полный список форматов растровых изображений, поддерживаемых ГеоГраф ГИС: растровый файл ГеоГраф (.seg); Windows Bitmap (.bmp); Aldus Tiff (.tif); Cals (xal); Macintosh Pict (.pet); Zsoft PCX

(.pcx); Truevision TARGA (.tga); WordPerfect (.wpg); Windows Metafile (.wmf); Multi-page PCX (.dxc); PostScript (.eps); Jpeg.

Кроме форматов, перечисленных выше, в ГИС ГеоГраф поддерживается большой спектр форматов растровых изображений: BMP, TIFF, PCX, TARGA, DCX, EPS, WPG, JPEG, PICT и др. Эти форматы могут использоваться и масштабироваться одновременно с векторными картами.

Реализована независимость работы ГИС от формата источника данных, основанная на использовании IDAPI (Borland Database Engine). Для каждого источника данных используется драйвер доступа (ODBC). Атрибутивные данные в других форматах (MS Access, MS Excel, FoxPro, Oracle, InterBase, MS SQL Server) могут быть подключены в ГеоГраф ГИС через драйверы BDE с её предварительной настройкой. Благодаря многоформатному ядру и широким возможностям импорта ГеоГраф ГИС имеет возможность интегрировать дан-

ные практически из любых форматов и разных ГИС. В систему заложена возможность подключения к локальным атрибутивным данным (Paradox, dBASE) и ко всем современным СУБД (Oracle, MSSQL и др.).

Другие российские ГИС обладают другими возможностями по используемым форматам и общему функционалу, однако не менее эффективными для решения узких отраслевых задач. Здесь необходимо отметить ещё одно важное обстоятельство, связанное с базами пространственных данных. Некоторые российские ГИС, например ГИС ИнГео (Центр системных исследований «Интегро»), разрабатывались с ориентацией на протокол TCP/IP. В общем случае протоколы TCP могут производить блокировку и передачу данных. На сегодняшний день вся система передачи данных в интернете работает на американском стеке сетевых протоколов TCP/IP. Интернет невозможно «слопать» для отдельно взятой страны, поэтому данные пользователей необходимо защищать шифрованием. И этот процесс должен быть постоянным. Вместе с тем, в России ведутся работы по созданию суверенного интернета для применения БПЛА на основе аналогов сетевых протоколов TCP/IP. Заметим, что китайская корпорация Huawei по решению правительства уже разрабатывает новый интернет-протокол New IP, который должен заменить существующий американский базовый протокол TCP/IP [20].

При решении сложного вопроса о технологической независимости от иностранных компаний необходимо учесть следующие обстоятельства. Для космических каналов связи технология TCP/IP непроизводительна, поэтому нужны другие технические решения. Например, доступные только одной и нескольким организациям телекоммуникационные протоколы можно использовать в корпоративных локальных, внутренних сетях, изолированных от интернета.

Перевод этих протоколов из сети интранет в интернет возможен только в условиях кросс-совместимости оборудования и ПО с поддержкой работы технологий TCP/IP. Поэтому замена TCP/IP на новый протокол в сети интернет сейчас нецелесообразна, поскольку пользователи всех стран используют TCP/IP (сетевое оборудование, каналы связи, сетевой стек операционной системы, библиотеки и программное обеспечение). Если ограничиться только заменой оборудования, то с операционными системами и ПО все сложнее, поскольку необходимо создать промежуточный слой с эмуляцией TCP/IP или переписать ПО на новый сетевой стек. Поэтому зависимость от иностран-

ных технологий в ближайшее время, возможно, будет сохраняться. Здесь необходимы дополнительные исследования.

В настоящее время ГИС «ИнГео» является набором программ. Основным сервером данных является разработанный сервер, взаимодействующий через локальную сеть или сеть интернет.

Геодезические системы координат и картографические проекции не поддерживаются. Информацию об используемой системе координат из системы получить невозможно. Пересчёт данных между системами координат внутри системы невозможен, также как и совмещение пространственных данных в разных системах координат и/или проекциях в одном проекте.

В силу отсутствия механизма работы с системами координат для каждой территории приходится создавать отдельный банк пространственных данных. При этом система позволяет в один момент времени работать только с одним банком пространственных данных.

ГИС «ИнГео» хорошо приспособлена для использования в качестве ГИС в органах муниципального управления, когда все пространственные данные создаются и обрабатываются в одной системе координат. В качестве универсальной ГИС использовать данную систему сложно, а для многих задач невозможно.

При работе с растровыми изображениями не поддерживается построение пирамиды растров разного масштаба для ускорения вывода общих планов территорий. Имеется только механизм разбиения на фрагменты (тайлы), что позволяет ускорить просмотр изображения в крупных масштабах. Сами растровые фрагменты хранятся в виде стандартных растровых файлов формата BMP или PCX, но информация о координатной привязке хранится отдельно внутри СУБД.

Инструментария для экспорта растровых изображений в другие форматы с координатной привязкой в системе нет.

Из-за отсутствия средств работы с различными системами координат отсутствует возможность нормальной интеграции с другими ГИС. Отсутствует полноценная поддержка основных стандартов OGC, таких как WMS, WFS и GML. Имеющиеся модули для разработки веб-приложений реализуют собственный протокол работы, отличающийся от стандартов OGC.

При хранении данных в файловой СУБД Borland Paradox имеются проблемы, связанные с максимальным размером базы данных. При достижении общего количества пространственных объектов порядка 1,5 млн (цифровой топографиче-



ский план масштаба 1:2000 для города с населением порядка 100 тыс. чел.) система становится неработоспособной. Все задачи пространственного анализа не решаются из-за невозможности построения правильной топологической модели данных.

Функционал практически всех ГИС во многом идентичен: это либо управление базами данных, реестрами, либо интерфейсами, либо вывод информации. Критическим рискам подвержены оборудование и программы, которые используются для обслуживания ГИС в реальном времени, это прежде всего касается программно-аппаратных решений Oracle, IBM и Microsoft, которые сейчас отсутствуют в России. Указанные решения тесно интегрированы в инфраструктуру информационных технологий, их замена потребует значительных временных и финансовых затрат.

В этих условиях требуется разработка новых организационно-технических и аппаратно-программных решений в рамках работ по импортозамещению. К настоящему времени уже разработаны некоторые российские продукты, реализующие основной функционал ГИС. В дальнейшем необходимо быстро реагировать на возможные сбои, дорабатывать функционал ГИС, расширить компонентную базу для возможной оперативной замены, для этого требуется расширение производственных мощностей.

4. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ИПУ РАН: ОПИСАНИЕ, АЛГОРИТМЫ

Разработка в ИПУ РАН геоинформационных систем для решения специальных задач с использованием информационных технологий начинается с середины 1990-х гг. Были реализованы методы создания трёхмерных моделей местности с последующим оперативным отображением созданной модели в реальном масштабе времени. Впервые в России была разработана программа «Полёты», которая позволяла строить маршруты движения летательных аппаратов (ЛА) на заданных высотах с учётом рельефа местности и высотных объектов с использованием реальных космических снимков большого объёма. При этом была выполнена оптимизация времени полёта ЛА по кратчайшему пути. В результате проведённых исследований по автоматизации создания оригиналов рельефа местности, основанных на применении вычислительной геометрии, в ИПУ РАН были получены важные научные результаты [23].

1. Доказана возможность распознавания форм рельефа местности по картине горизонталей без использования модели рельефа в виде матрицы высот, опровергающая сложившееся положение о

том, что для машинной обработки информации о рельефе местности недостаточно картины горизонталей, нужна матрица высот. При этом обоснована возможность задания необходимой плотности точек на изолиниях, обеспечивающей заданную точность представления рельефа местности в виде горизонталей.

2. Получено решение классической задачи маркировки протяжённых объектов с обеспечением равномерности плотности маркировочных знаков.

3. Доказана возможность полной автоматизации оформления оригинала рельефа (нанесение подписей горизонталей и бергштрихов) с использованием только информации о горизонталях без использования модели рельефа в виде матрицы высот.

4. Разработан алгоритм распознавания локальных форм рельефа по совокупности горизонталей, заданных в виде ломаных линий, обеспечивающий локализацию мест расположения заданных форм рельефа за время $O(n \log n)$, где n – общее число отрезков на всех ломаных, изображающих горизонталю. Тем самым доказано, что задачи распознавания форм рельефа по картине горизонталей, а также оформления оригинала рельефа (нанесения бергштрихов и надписей горизонталей) с использованием картины горизонталей в виде ломаных линий в качестве исходных данных имеют квазилинейную сложность. Критическим этапом, определяющим нижнюю границу сложности, является построение триангуляции Делоне.

5. Применительно к конкретным формам рельефа в качестве адаптации общего алгоритма, указанного в п. 4, к конкретным формам рельефа, доказана квазилинейная сложность $O(n \log n)$ задач распознавания практически всех форм рельефа местности, влияющих на конечный вид их представления.

6. Разработан алгоритм распознавания форм рельефа местности, использующий только горизонталю и не использующий точечные объекты уровня земли, имеющий квазилинейную сложность по числу вершин, для автоматизации редактирования и проверки информации о рельефе местности. Распознаются, например, вершины и впадины, седловины, орографические линии, несоответствия в системе горизонталей и отметок высот.

7. Созданы алгоритмы автоматического построения рельефа по взаимно ориентированным изображениям. Создан алгоритм повышенной надёжности, позволяющий распознавать и не использовать для отображения рельефа малоинформативные участки рельефа местности.

Вычислительные операции, связанные с оперативной обработкой информации большого объёма в виде аэрокосмических снимков, требовали значительного времени, что не позволяло достичь заданной точности создаваемых трёхмерных моделей местности. Для оперативной обработки материалов аэрокосмической съёмки была создана цифровая фотограмметрическая станция (ЦФС) «Талка», позволяющая выполнять все необходимые математические расчёты и построения с последующей визуализацией полученной модели [23].

Принципиально новыми разработанными решениями в области геоинформационных технологий в ИПУ РАН являются:

- алгоритмы интерполирования двумерной функции по набору значений в известных точках на основе двумерного варианта фильтрации Калмана;
- алгоритмы аппроксимации последовательности точек ломаной типа Имаи и Ири для триангулированной линии и линиями из дуг окружностей методом наименьших квадратов;
- алгоритмы решения систем нелинейных уравнений блочной фототриангуляции с минимизацией четвёртых и шестых степеней невязок;
- алгоритмы построения триангуляции Делоне и диаграммы Вороного для набора точек и отрезков за квазилинейное по числу вершин время;
- алгоритмы автоматического построения рельефа по взаимно ориентированным изображениям;
- метод идентификации соответствующих точек двух изображений, использующий оконтуривание по Марру и преобразования типа «растяжения резины»;
- способы автоматического нанесения надписей горизонталей на оригинале рельефа и назначения положений маркировочных знаков протяжённых линейных объектов.

Создание оригиналов рельефа местности, включающее в себя сглаживание горизонталей, расстановку бергштрихов и надписей горизонталей, было полностью автоматизировано в разработанных программных продуктах. Характерной особенностью алгоритмов и программ решения этой задачи является то, что они могут использоваться для автоматического получения карт для систем навигации и управления движущимися объектами [23].

Программа обеспечивает значительную степень автоматизации технологических процессов

фотограмметрической обработки и составления карт. Разработан также специальный формат хранения регулярной структуры пространственных данных с поддержкой возможности хранения неограниченного объёма данных при уровне хранения данных. При этом поддерживается быстрый доступ к данным каждого уровня и возможность хранения данных, характеризующих заданную область территории произвольной формы.

Разработаны способы формирования изображения частей ломаной линии, лежащих внутри или вне многоугольной области, и границ областей, полученных в результате применения логических операций к двум многоугольным областям на основе отыскания отрезков ломаной линии, лежащих в окрестности границы области. Эти способы обеспечивают надёжное формирование изображений.

Уникальной является технология создания многооконного стереоинтерфейса, не требующая специализированных видеоконтроллеров, с применением режима клонирования видеоконтроллера и программного интерфейса, использующего первичную и оверлейную поверхности, куда подаются изображения. Оверлейная поверхность накрывает только стереоскопическую часть экрана, что позволяет не тратить ресурсы на обработку окон других приложений.

Технические решения запатентованы и реализованы в разработанной ГИС «Талка» (ИПУ РАН), в полном объёме и ни в каком из известных программных продуктов не встречаются. Разработаны технологии работы со спутниковыми устройствами, позволяющие управлять измерениями приёмника и создавать в карте соответствующие объекты. При работе в режимах Real Time Kinematic и постобработке достигается высокая точность результатов, позволяющая улучшить управление движущимися объектами.

Разработанная в ИПУ РАН ГИС «Талка-КПК» работает на наладонных компьютерах и используется для создания и обновления карт и планов. Она может работать с растрами, изображениями и векторными картами, производить съёмку местности с использованием геодезической аппаратуры: GPS- и ГЛОНАСС-приёмниками, а также тахеометрами. Фактически это «ГИС на ладони», обладающая не только всеми возможностями навигации и просмотра материалов, но и развитыми средствами редактирования и сбора данных на местности и передачи информации на сервер сбора данных. Широко развитые средства редактора привязки



растров в ГИС «Талка-КПК» позволяют редактировать координаты точек привязки как визуальным образом, так и через их численные значения.

Система «Талка-ГИС», предназначенная для работы с растрами, векторными картами, спутниковой аппаратурой, имеет функции просмотра, создания, редактирования геоинформационных материалов, GPS-навигации, ведения геодезических измерений и контроллера устройств. Программа поддерживает профессиональное геодезическое оборудование и навигационные приёмники. Она позволяет управлять спутниковыми измерениями приёмника, создавая в карте объекты, соответствующие измерениям, или привязывая измерения к уже существующим объектам. Результаты обработки принимаются средствами «Талка-ГИС», и измеренные участки объектов карты обретают точные координаты.

Все разработанные программные продукты «Талка-КПК», «Талка-ГИС» и ЦФС «Талка» обладают схожим интерфейсом и обеспечивают оперативный обмен информацией для решения различных задач управления соответствующими программными средствами.

В ИПУ РАН разработан аппаратно-программный комплекс ГИС SUEK3D для обработки и отображения трёхмерной информации с целью технологической поддержки процессов управления угольной компанией. В рамках этой работы в последние годы выполнены научные исследования по совершенствованию методов и технологий получения геопространственных данных с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [24].

Разработанная ГИС SUEK3D, имеет клиент-серверную архитектуру и предназначена для построения цифровой трёхмерной модели местности в режиме реального времени. Она позволяет строить модели рельефа и пластов с использованием аэрофотоснимков, данных геологических скважин, стандартных геодезических построений, наземных фотографий объектов местности. По построенным моделям программное обеспечение позволяет производить расчёты длин, объёмов выемок и остатков породы в режиме реального времени. Кроме того, в программной среде предусмотрена возможность работы с другими программными средствами через API с помощью функций, классов, методов, структур, иногда и констант. Была обеспечена возможность создания интерактивных моделей рельефа с перемещением моделей техники по охватываемой территории по заданным заранее

траекториям и расписаниям. В рамках работы над программным средством собрана большая база трёхмерных моделей основных видов техники, применяемой на открытых карьерных работах.

В ИПУ РАН разработана ГИС «НЕВА», которая позволяет создавать различные трёхмерные модели местности: рельефа, рельефа с объектами местности, полутоновые по аэрокосмическим снимкам. Она используется при издании карт, являясь главным инструментом редакционной подготовки различных атласов и карт к изданию.

В последние годы в рамках работ по цифровизации сельского хозяйства в ИПУ РАН были исследованы информационные и коммуникационные технологии, методы анализа данных, технологии интернета вещей, на основе которых с использованием платформы ГИС «НЕВА» разработаны [25–29]:

- новые подходы к экологическому мониторингу водной поверхности;
- методы мониторинга состояния сельскохозяйственных культур, выявления вредителей, болезней и состояния орошения;
- методы применения виртуальных полигонов для отработки сценариев группового управления БПЛА мультикоптерного типа.

Исследована возможность геопространственной привязки действия существующего законодательства в области геодезии и картографии, землеустройства и лесного хозяйства России при использовании ГИС «Талка» и ГИС Карта 2011 («Панорама») [30]. Подобных результатов в открытой печати не выявлено, включая результаты исследований системы «КонсультантПлюс».

Решение проблемы управления движущимися объектами на разных этапах развития было связано с исследованием общих принципов автоматического синтеза параметров управления. Для этого был произведён анализ методов управления ЛА, используемыми при движении корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС) для уточнения местоположения и коррекции траектории полёта. Проанализированы новые принципы построения бортовых алгоритмов, возможная их интеллектуализация и самоорганизация, современные типы съёмочных систем и варианты их комплексирования, а также уровни развития параллельных вычислений и специальных процессоров для реализации алгоритмов с единой параллельной структурой. Установлено, что дальнейшее развитие и массовое внедрение систем автономной навигации указанного выше типа как единствен-

ной альтернативы спутниковым навигационным системам для управления ЛА, в частности БПЛА, в настоящее время может базироваться на предметно-ориентированных информационных технологиях [16].

Другим направлением развития ГИС в современных условиях является их использование для моделирования КЭНС. ИПУ РАН предложена концепция построения геоинформационной системы для моделирования поисковых КЭНС, которая позволит собирать модели большого спектра КЭНС и макеты технологий их настройки на работу с проведением необходимых вычислительных экспериментов. При этом для определения состава требуемых программных средств, структуры хранилищ и особенностей интерфейса построена общая математическая модель. Эта модель при сохранении всей специфики алгоритмов КЭНС охватывает не только известные алгоритмы совмещения изображений, но и включает схему синтеза алгоритмов КЭНС нового типа с реализацией методов распознавания образов и анализа сцен, кластеризации, обучения нейросетей и облачных вычислений при обработке больших данных.

Разработаны математические модели стрессовых воздействий на съёмочные системы навигационной системы, обеспечивающие различные условия функционирования КЭНС: срыв определения местоположения ЛА, определение местоположения ЛА по ложным опорным ориентирам и т. д. Полученную при этом информацию предлагается использовать для совершенствования системы управления ЛА, использующих изображения местности в различных диапазонах длин волн электромагнитного излучения. Стрессовое тестирование при этом обеспечивает проверку выполнения повышенных требований к надёжности КЭНС и является важнейшим видом вычислительного эксперимента с моделями КЭНС [31, 32].

Поисковые КЭНС решают свою задачу посредством проверки гипотез о значениях параметров движения методами совмещения текущего изображения участка местности, полученного бортовой съёмочной системой, с фрагментами эталонного изображения, заложенного в КЭНС. Проверяются гипотезы о равенстве значений искомым параметров и принимается гипотеза, для которой функция их близости максимальна. Применяются глобальные схемы поиска, градиентные, из арсенала методов поиска экстремума числовой функции и их сочетания. В первых системах этого типа в качестве функции близости применялся коэффи-

циент корреляции текущего и эталонного изображений, чем и обусловлено название корреляционно-экстремальных навигационных систем. В более общем смысле соответствующая предметная область охватывает любые обзорно-сравнительные методы автономной навигации, не обязательно использующие методы совмещения изображений. Их специфика состоит в решении задачи навигации путём сравнения реальных результатов обзора пространства, в котором находится движущийся объект, с априорными сведениями о возможных результатах обзора. Для краткости в статье сохраним обозначение «КЭНС» для любых подобных систем.

Актуальность ускоренного развития КЭНС значительно возросла в связи с интенсивным развитием беспилотных аппаратов различного назначения. Это обусловило более полное, чем в существующих решениях, раскрытие потенциала развития КЭНС. Если геодезические спутники (ГЛОНАСС, GPS) будут выведены из строя, это приведёт к бесполезности спутниковых навигационных систем управления. Здесь же нужно учитывать, что в России есть территории, на которых спутниковые сигналы недостаточно устойчивы. Такая проблема присутствует и в условиях городской застройки, более того, из-за плоских высотных объектов возможен приём искажённых сигналов [24, 33, 34].

В этих условиях развитие данной предметной области может быть обеспечено расширением исследований и разработок с использованием предметно-ориентированного вычислительного комплекса. Такой комплекс может предоставить специалисту все необходимые средства для сборки моделей КЭНС и макетов технологий их настройки на работу из готовых программных модулей посредством специального интерфейса для хранилищ программных модулей и возможность проводить с ними вычислительные эксперименты [34].

Математические модели КЭНС и макеты технологий их настройки позволят создать облик бортовых систем управления ЛА, оснащённых средствами корреляционно-экстремальной обработки данных на борту, способных в условиях возможных помех выполнять свою задачу [16, 31, 35].

Предложенный предметно-ориентированный комплекс обеспечит пользователю доступ ко всем универсальным средствам работы с геопространственной информацией, т. е. к функционалу общего назначения на базе средств расширения функционала системы «Талка-ГИС». Проверка указан-



ного доступа была проведена и с использованием ГИС ArcInfo, Mapinfo, ГИС «Панорама», а также ГИС «НЕВА» [31, 35]. На основе анализа математических моделей, упомянутых выше, обоснована структура предметно-ориентированного комплекса моделирования поисковых КЭНС в форме прикладной ГИС, которая позволит улучшить динамику систем автономного управления путём применения принципов перенастраиваемых структур, а также нейронных сетей и ИИ для работы с большими данными на основе организованных сетей доступа.

5. ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИС: ТЕХНОЛОГИИ, АЛГОРИТМЫ

Одной из главных тенденций развития ГИС является использование веб-сервисов и облачных технологий с распределёнными вычислительными ресурсами для реализации нейросетевых технологий обработки больших данных. Веб-ГИС расширили возможности по обмену методами, передаче результатов исследований, визуализации, доступу к данным и их обработке, что обусловило их развитие в систему взаимодействия в режиме реального времени.

Имитация выполнения определённых задач на основе постепенного обучения с использованием полученной от человека информации создаёт условия для реализации ИИ в рамках концепции интернета вещей (IoT), что позволит связать объекты друг с другом. Технология IoT представляется множеством устройств с различными пространственно координированными датчиками, соединёнными между собой. Они становятся интеллектуальными и определёнными в пространстве [22, 36]. Это обстоятельство позволяет дополнительно организовать геодезические сети, которые могут быть использованы при съёмке объектов местности без привлечения геодезических инструментов, а лишь с помощью аппаратуры для приёма сигналов от датчиков.

На основе концепции IoT могут быть созданы нейронные сети, позволяющие осуществлять взаимодействие между датчиками и приёмниками информации БПЛА [22]. Так, различные датчики позволяют получать данные об объектах и процессах в реальном масштабе времени с возможностью предвидения их поведения и организации реагирования на них. Поскольку полученная информация в ГИС ещё имеет и координатную привязку и хранится в базе данных, возможен последующий её

быстрый анализ. Поэтому необходимо использовать облачные вычисления и технологии больших данных [37]. Классические серверы, а также центры обработки данных до сих пор решали стоявшие задачи известными способами. Интернет вещей способствует появлению новых задач, решения которых сейчас разрабатываются [38]. При этом объём информации существенно увеличивается. Датчики могут измерять температуру, вес, скорость, давление, влажность, освещённость и другие параметры. Они устанавливаются на транспорте для измерения скорости и определения траектории движения в реальном масштабе времени, при этом их настройка может производиться как удалённо, так и на устройстве [39, 40].

Данные, полученные с устройств интернета вещей, могут быть использованы для составления:

- тепловых карт с отображением неисправностей и сбоев в обслуживании;
- карты загруженности Wi-Fi-сетей в определённых местах населённого пункта;
- карты загруженности дорожной сети, парковочных мест;
- карты освещённости населённого пункта и т. д.

На основе этих карт могут быть приняты решения для предоставления дифференцированных услуг. Интернет вещей в ГИС позволяет оценивать использование многих ресурсов для достижения баланса между спросом и предложением. Так как IoT включает большой объём информации, представляющей идеальные наборы пространственно определённых обучающих данных, масштабируемость ГИС усиливается возможностями использования технологий искусственного интеллекта. Таким образом, развитие технологий интернета вещей является важной тенденцией появления новых приложений в современных ГИС.

Искусственный интеллект позволяет находить новые закономерности в использовании данных. Они используются для классификации больших объёмов данных дистанционного зондирования и объединения данных из разных источников. Некоторые типы алгоритмов машинного обучения уже сейчас применяются при анализе геопространственной информации в целях:

- классификации объектов местности;
- прогнозирования численных характеристик явлений и процессов;
- группировки объектов на основе их сходства по описаниям;
- нахождения связей и зависимостей между различными объектами местности.

Указанные алгоритмы развиваются и реализуются в программных решениях в целях:

- совместного использования ГИС, средств дистанционного зондирования Земли и ГЛОНАСС [33, 34, 41];

- использования информационных ресурсов дружественных стран [42];

- создания единой телекоммуникационной ГИС и расширения её возможностей [38];

- использования ИИ для анализа геопространственной информации и подготовки управленческих решений [43, 44].

Наиболее важной проблемой, пока не реализованной тенденцией развития картографии в части создания тематических карт для ГИС является полная автоматизация процесса создания карт с использованием ИИ. Как было отмечено, алгоритмы машинного обучения могут использоваться для автоматического распознавания и классификации объектов местности. Процесс нанесения этих объектов на карту должен осуществляться также на основе машинного обучения с применением множества подходов, реализуемых творчески, отдельными исполнителями. Решения принимаются с учётом существующих нормативно-технических правил, установленных требований в заданных вариациях характеристик отображаемых объектов на картах. Вместе с сокращением времени и затрат на создание карт необходимо добиться заданной точности и надёжности выполняемых процессов составления или обновления карт.

Машинное обучение при автоматической обработке и анализе геопространственной информации в реальном времени, а также создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений в ГИС является перспективным направлением развития ГИС.

Качество геопространственных данных, их большие объёмы, существующая пока разнородность представления данных обуславливают сложности интерпретации информации [18, 45]. Это сдерживает в настоящее время применение ИИ. Анализ данных дистанционного зондирования в последнее время показал, что существуют проблемы и трудности в связи с большими объёмами данных. Одним из наиболее популярных и известных неуправляемых методов уменьшения количества признаков является анализ главных компонент (АГК). Применением метода АГК подавляющее большинство информации в изображении можно сохранить, существенно уменьшив размерность через кумулятивные собственные значения [46].

Дальнейшее развитие технологий, методов и алгоритмов машинного обучения при работе с ба-

зами данных позволит синтезировать интеллектуальные управленческие решения.

Одним из важных направлений развития ГИС является также создание мобильных геоинформационных систем с использованием мобильных устройств [47]. В последние несколько лет как зарубежными, так и отечественными специалистами получены важные результаты, представленные в виде отдельных программных модулей. Их функционал и нормативный статус геоинформационного обеспечения в настоящее время ещё не сформированы. Созданные программные продукты не являются предметом исследования по теме статьи, однако они реализованы на известных полнофункциональных платформах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненного обзора географических информационных систем, разработанных за рубежом и в России, в частности в ИПУ РАН, могут быть сделаны следующие основные выводы.

Создание алгебры карт, определяющей математические и алгоритмические операции над растровыми данными при их пространственном анализе для получения новых наборов растровых данных с результатами анализа, явилось основой нового научного направления в информатике – геоинформационных технологий. Это стало возможным благодаря научным работам канадских, шведских и американских учёных в области картографии. Первым программным продуктом, реализующим геоинформационные технологии, считается канадская ГИС.

В США, Канаде, Швеции и некоторых других странах были разработаны ГИС на разных платформах, различающиеся функциональными возможностями, на основе которых появились российские ГИС для решения различных задач с использованием типовых решений, как правило более высокого качества. При этом быстро пришло понимание необходимости о независимости используемых технологических решений в разрабатываемых российских ГИС. Появляются новые, уникальные по техническим решениям ГИС, однако завязанные на импортные аппаратные средства. Формируются новые задачи, обусловленные технологическими схемами построения российских ГИС, решение которых обеспечивало бы независимость от западных программных продуктов в области ГИС-технологий. В настоящее время некоторая зависимость от западных технологий сохраняется, при этом отметим, что российские ГИС сейчас разрабатываются на отечественных платформах, что обеспечит в ближайшее время техно-



логическую независимость российских разработчиков.

Необходимо упомянуть важные подходы при разработке ГИС в ИПУ РАН, связанные с применением новых математических, технических и алгоритмических решений, реализованных в ГИС для синтеза управленческих решений и подтверждённых многими патентами на изобретения.

Современные ГИС обеспечивают работу с геопространственными данными, использование которых позволяет получить необходимую информацию для поддержки принятия управленческих решений. Пространственные базы данных позволяют определять местоположение объектов, прокладывать маршруты движения транспортных средств, анализировать земельные участки, получать их качественные характеристики, решать множество различных отраслевых задач. Любая карта, используемая в ГИС, может быть представлена в трёхмерном виде, что позволяет более наглядно представлять местность для последующего и более качественного анализа событий и природных явлений для поддержки принятия решений. Возможность постоянной актуализации данных с использованием растровых и векторных источников, атрибутивных данных повышает достоверность и практическое соответствие полученных результатов реальным условиям. Все указанные функции стали возможными благодаря совместному использованию средств картографии и информатики, которые были развиты за последние годы.

Определены современные тенденции развития ГИС.

- Разработка методов коммуникации и использования данных в ГИС, полученных средствами дистанционного зондирования Земли и глобальной навигационной спутниковой системой.

- Совершенствование телекоммуникационных и информационных ресурсов дружественных, а также других стран.

- Создание единой телекоммуникационной географической информационной системы на территории России и её субъектов федерации.

- Развитие ГИС с использованием концепции интернета вещей для интеллектуализации управления различными системами, территориями и видами деятельности в народном хозяйстве, чрезвычайных ситуациях и обороне страны.

Геоинформационные системы расширили возможности по обмену методами, передаче результатов обработки, визуализации, доступу к данным, что обусловило их развитие в систему взаимодействия в режиме реального времени. Имитация вы-

полнения определённых задач на основе постепенного обучения с использованием полученной от человека информации создаёт условия для реализации ИИ в интернете вещей.

Пространственные базы данных позволяют определять местоположение объектов, прокладывать маршруты движения транспортных средств, анализировать земельные участки, получать их качественные характеристики, решать множество различных отраслевых задач. Результаты анализа научно-технических материалов по геоинформационным технологиям позволяют сделать вывод о том, что для повышения информационной безопасности в современных условиях необходимо развитие методов коммуникационных связей при приёме, обработке и передаче пространственных данных с использованием интернета, связанных с разработкой российского аналога протокола TCP/IP. Реальным видится использование локальных внутренних сетей, изолированных от интернета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tomlin, C.D., Berry, J.K. Mathematical structure for cartographic modeling in environmental analysis // Bound Papers of the American Congress on Surveying and Mapping 39th Annual Meeting. – 1979. – Vol. 39. – P. 269–283.
2. Dennis, J., Vigier, R., and Tomlin, C.D. Cubic mapping algebra functions for space-time analysis, in Cartography and Geographic Informatics. – 2005. – Vol. 32, no. 1. – P. 17–32.
3. Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rind, D.W. Geographic Information Systems and Science (3rd ed.). – New York: John Wiley & Sons, 2011. – 414 p.
4. Nupponen, D., Taibi, D. Serverless: What it is, what to do and what not to do // Proc. Int. Conf. Softw. Archit. (ICSA 2020). – Salvador, 2020. – P. 49–50.
5. Huang, Q., Li, J., Zhang, T. Domain Application of High Performance Computing in Earth Science: An Example of Dust Storm Modeling and Visualization // In: High Performance Computing for Geospatial Applications. Ed. by W. Wu and D. Wang. – 2020. – P. 249–268.
6. Li, Z., Tang, W., Huang, Q., et al. Introduction to Big Data Computing for Geospatial Applications // International Journal of Geo-Information. – 2020. – Vol. 9, no. 8. – Art. no. 487.
7. Iosifescu-Enescu, I., Matthys, Cl., Gkonos, Ch., et al. Cloud-Based Architectures for Auto-Scalable Web Geoportals towards the Cloudification of the GeoVITE Swiss Academic Geoportal // ISPRS International Journ. Of Geo-Information. – 2017. – Vol. 6, no. 7. – Art. no. 192.
8. Yu, M., Bambacus, M., Cervone G., et al. Spatiotemporal event detection: a review // International Journal of Digital Earth. – 2020. – P. 1186–1211.
9. Umale, P., Patil, A., Sahani, C., et al. Planer Object Detection Using SURF and SIFT Method // International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. – 2022. – Vol. 6, iss. 11. – P. 36–39.
10. Karras, T., Laine, S., Aittala, M., et al. Analyzing and improving the image quality of StyleGAN // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Seattle, 2020. – P. 8107–8116.

11. Frank J., Eisenhofer T., Schonherr L., et al. Leveraging frequency analysis for deep fake image recognition // 37th Conference (International) on Machine Learning Proceedings. – Vienna, 2020. – Vol. 119. – P. 3247–3258.
12. Жебровский С.И., Кузин Д.А., Стрельцова М.М. Обзор проблем и перспектив развития геоинформационных систем в эпоху всеобъемлющего интернета // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12-1. – С. 237–241. [Zhebrovskij, S.I., Kuzin, D.A., Strel'cova, M.M. Obzor problem i perspektiv razvitiya geoinformacionnyh sistem v epohu vseob'emlyushchego interneta // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. – 2018. – No. 12-1. – P. 237–241. (In Russian)].
13. Мьельников Д.Ю. Геоинформационные платформы. ПК «ГПИ Челябинскгражданпроект». – URL: <https://textarchive.ru/c-1255531-pall.html> (дата обращения 29.11.2023). [Myl'nikov, D.Yu. Geoinformacionnyye platformy. PK «GPI Chelyabinskgrazhdanproekt». – URL: <https://textarchive.ru/c-1255531-pall.html> (accessed November 29, 2023). (In Russian)]
14. Фомичев А., Бондарь О. Бессерверная альтернатива традиционным базам данных. Открытые системы. СУБД. – 2021. – № 1. – С. 20–23. [Fomichev, A., Bondar', O. Besservernaya alternativa tradicionnym bazam dannyh. Otkrytye sistemy. SUBD. – 2021. – No. 1. – P. 20–23. (In Russian)].
15. Marinescu, D.C. Cloud Computing. Theory and Practice. Second Edition. – Burlington: Morgan Kaufman, 2018. – 566 p.
16. Алчинов А.И., Гороховский И.Н. Направления расширения функционала прикладной геоинформационной системы моделирования поисковых корреляционно-экстремальных навигационных систем // Проблемы управления. – 2023. – № 5. – С. 78–90. [Alchinov, A.I., Gorokhovskiy, I.N. Expanding the Functionality of an Applied Geographic Information System for Modeling Search Correlation-Extreme Navigation Systems // Control Sciences. – 2023. – No. 5. – P. 65–74.]
17. Журкин И.Г., Шайтура С.В. Геоинформационные системы. – М.: Кудлиц-пресс, 2009. – 272 с. [Zhurkin, I.G., Shajtura, S.V. Geoinformacionnyye sistemy. – Moskva: Kudic-press, 2009. – 272 s. (In Russian)].
18. Васильев, В.Н. Обзор существующих ГИС / Молодой учёный. – 2016. – № 14 (118). – С. 62–66. [Vasil'ev, V.N. Obzor sushchestvuyushchih GIS / Molodoj uchyonyj. – 2016. – No. 14 (118). – P. 62–66. (In Russian)]
19. ФКУ «Государственные технологии». – URL: <https://digital.gov.ru/ministry/departments/48/> (дата обращения 19.11.2023 г.) [FKU «Gosudarstvennyye tekhnologii». – URL: <https://digital.gov.ru/ministry/departments/48/> (accessed November 19, 2023). (In Russian)]
20. Нестеренко В.Р., Маслова М.А. Современные вызовы и угрозы информационной безопасности публичных облачных решений и способы работы с ними // Научный результат. Информационные технологии. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 48–54. [Nesterenko, V.R., Maslova, M.A. Sovremennyye vyzovy i ugrozy informacionnoj bezopasnosti publichnyh oblachnyh reshenij i sposoby raboty s nimi // Nauchnyj rezultat. Informacionnyye tekhnologii. – 2021. – Vol. 6, no. 1. – P. 48–54. (In Russian)]
21. Лубнин Д.С. Модернизация инфраструктуры пространственных данных с использованием облачных технологий // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62, № 5. – С. 590–598. [Lubnin, D.S. Modernizaciya infrastruktury prostranstvennyh dannyh s ispol'zovaniem oblachnyh tekhnologij // Izv. vuzov «Geodeziya i aerofotos'emka». – 2018. – Vol. 62, no. 5. – P. 590–598. (In Russian)].
22. Жукова Н.А., Тристанов А.Б., Тин Т., Аунг М. О проблеме сбора данных в сетях интернета вещей с динамической структурой (Обзор) // Известия КГТУ. – 2021. – № 61. – С. 105–118. [Zhukova, N.A., Tristanov, A.B., Tin, T., Aung, M. O probleme sbora dannyh v setyah interneta veshchej s dinamicheskoj strukturoj (Obzor) // Izvestiya KGTU. – 2021. – No. 61. – P. 105–118. (In Russian)].
23. Алчинов А.И., Беклемышев Н.Д., Кекелидзе В.Б. Методы цифровой фотограмметрии. – М.: Московский гос. ун-т печати, 2007. – 259 с. [Alchinov, A.I., Beklemishev, N.D., Kekelidze, V.B. Metody tsifrovoi fotogrammetrii. – M.: Moskovskij gos. un-t pečati, 2007. – 259 s. (In Russian)].
24. Волковицкий А.К., Гладышев А.И., Гольдин Д.А. и др. Применение средств компьютерного моделирования для анализа функционирования магнитоградиентных систем // Проблемы управления. – 2021. – № 3. – С. 65–74. [Volkovitskiy, A.K., Gladyshev, A.I., Goldin, D.A., et al. A Computer Simulation Complex for Analysis of Magnetic Gradiometry Systems // Control Sciences. – 2021. – No. 3. – P. 57–65.]
25. Барбанова Е.А., Вытовтов К.А., Гладких Т.Я., Мигачев А.Н. Экологический мониторинг загрязнений водной поверхности в видимом диапазоне с использованием БПЛА // Физические основы приборостроения. – 2022. – Т. 11, № 4(46). – С. 60–67. [Barabanova, E.A., Vyotovtov, K.A., Gladkih, T.Ya., Migachev, A.N. Ekologicheskij monitoring zagryaznenij vodnoj poveryhnosti v vidimom diapazone s ispol'zovaniem BPLA // Fizicheskie osnovy priborostroeniya. – 2022. – T. 11, no. 4 (46). – P. 60–67. (In Russian)]
26. Трефилов П.М., Кулагин К.А., Мигачев А.Н. Применение виртуальных полигонов для отработки сценариев группового управления БПЛА мультикоптерного типа / Тр. 16-й всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (УБС'2019). – Тамбов, 2019. – С. 156–159. [Trefilov, P.M., Kulagin, K.A., Migachev A.N. Primenenie virtual'nyh poligonov dlya otrabotki scenariev gruppovogo upravleniya bpla multikopternogo tipa / Trudy 16-j Vserossijskoj shkoly-konferenciya molodyh uchenyh «Upravlenie bol'shimi sistemami» (UBS'2019). – Tambov, 2019. – P. 156–159. (In Russian)].
27. Патент RU 2760832C1 РФ. Беспилотный летательный аппарат: № RU2021109626A: заявл. 07.04.2021; опубл. 30.11.2021 Бюл. № 34 / Графенков А.В., Кулагин К.А., Мигачев А.Н. [Patent RU 2760832C1 RF. Bepilotnyi letatel'nyi ar-parat: № RU2021109626A: zayavl. 07.04.2021: opubl. 30.11.2021 Byul. № 34 / Grafenkov A.V., Kulagin K.A., Migachev A.N. (In Russian)]
28. Мигачев А.Н., Кулагин К.А. Homo Digitalis: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616163 РФ. Запер. 11.06.2020. [Migachev, A.N., Kulagin, K.A. Homo Digitalis: Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM no. 2020616163 RF. Reg. 11.06.2020. (In Russian)]
29. Галин П.Р., Кулагин К.А., Мигачев А.Н. и др. Тренажерный комплекс беспилотной авиационной системы (БАС) полевого назначения // Матер. 14-й всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления» и 10-й молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на Дону, 2019. – С. 46–55. [Galina, P.R., Kulagin, K.A., Migachev, A.N., et al. Trenazhernyj kompleks bepilotnoj aviacionnoj sistemy (BAS) polevogo naznacheniya / Materialy 14-j Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivnyye sistemy i zadachi upravleniya» i 10-j molodezhnoj shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informacii v tekhnicheskikh sistemah». – Rostov-na-Donu, 2019. – S. 46–55. (In Russian)].
30. Yang, X. Parameterizing support vector machines for land cover classification // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2011. – No. 1. – P. 27–37.



31. Алчинов А.И., Гороховский И.Н. Анализ стрессовых воздействий на условия автономной навигации поисковых корреляционно-экстремальных навигационных систем // Проблемы управления. – 2022. – № 6. – С. 42–58. [Alchinov, A.I., Gorokhovskiy, I.N. Analysis of Stress Exposures on Autonomous Navigation Conditions in Search Correlation-Extreme Navigation Systems // Control Sciences. – 2022. – No. 6. – P. 35–48.]
32. Кошкарёв А.В. Толковый мини-словарь основных терминов по геоинформатике (с английскими эквивалентами) // ГИС-обозрение. – 1994. – № 1. – С. 59–62. [Koshkarev, A.V. Tolkovyy mini-slovar' osnovnykh terminov po geoinformatike (s anglijskimi ekvivalentami) // GIS-obozrenie. – 1994. – No. 1. – P. 59–62. (In Russian)]
33. Гурвиц Дж., Ньюджент А., Халпер Ф., Кауфман М. Просто о больших данных. – М.: Эксмо, 2015. – 400 с. [Hurwitz, J.S., Nugent, A., Halper, F., Kaufman, M. Big Data for Dummies. – New York: John Wiley and Sons, 2013].
34. Майоров А.А., Матерухин А.В., Кондауров И.Н. Структура системы обработки потоковых данных в геосенсорных сетях // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 712–719. [Maiorov, A.A., Materukhin A.V., Kondaurov I.N. Struktura sistemy obrabotki potokovykh dannykh v geosensornykh setyakh // Izv. vuzov «Geodeziya i aehrofotos"emka». – 2018. – Vol. 62, no. 6. – P. 712–719. (In Russian)].
35. Алчинов А.И., Гороховский И.Н. Концепция создания прикладной географической информационной системы моделирования поисковых корреляционно-экстремальных систем автономной навигации // Проблемы управления. – 2022. – № 1. – С. 54–66. [Alchinov, A.I., Gorokhovskiy, I.N. A Conceptual Applied Geographic Information System for Modeling Search Autonomous Correlation-Extreme Navigation Systems // Control Sciences. – 2022. – No. 1. – P. 43–54.]
36. Hassan, Q.F., Khan, A.R., Madani, S.A. Internet of things: challenges, advances, and applications. – New York: Chapman & Hall, 2017. – 436 p.
37. Созыкин А.В., Гольдштейн М.Л., Грибова В.В., Москаленко Ф.М. Облачный сервис «Параллельный Matlab» // Программные продукты и системы. – 2013. – № 4. – С. 130–134. [Sozykin, A.V., Gol'dshitejn, M.L., Gribova, V.V., Moskalenko, F.M. Oblachnyj servis «Parallel'nyj Matlab» // Programmnye produkty i sistemy. – 2013. – No. 4. – P. 130–134. (In Russian)].
38. Watts, S. The Internet of Things (IoT): Applications, Technology, and Privacy Issues. – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2016. — 118 p.
39. Массеров Д.Д. Безопасность «умного города» в процессе цифровизации городской среды // Матер. XXIV Всеросс. студ. науч.-практ. конф. Нижневартковского гос. ун-та / Под общей ред. Д.А. Погоньшева. Ч. 3. Информационные технологии. – Нижневартковск: изд-во НВГУ, 2022. – С. 135–141. [Masserov, D.D. Bezopasnost' «umnogo goroda» v processe cifrovizacii gorodskoj sredy // Mater. XXIV Vseross. stud. nauch.-prakt. konf. Nizhnevartovskogo gos. un-ta / Pod obshchej red. D.A. Pogonyшева. Ch. 3. Informacionnye tekhnologii. – Nizhnevartovsk: izd-vo NVGU, 2022. – P. 135–141. (In Russian)].
40. Плахотников Д.П., Котова Е.Е. Применение искусственно-го интеллекта в киберфизических системах // XXIII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 314–317. [Plakhotnikov D.P., Kotova E.E. Primenenie iskusstvenno-go intellekta v kiberfizicheskikh sistemakh // XXIII Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. – Sankt-Peterburg, 2020. – S. 314–317. (In Russian)]
41. Сечин А.Ю., Адров В.Н. Фотограмметрия и облачные технологии // Геопрофи. – 2017. – № 2. – С. 24–27. [Sechin, A.Yu., Adrov, V.N. Fotogrammetriya i oblachnye tekhnologii // Geoprofi. – 2017. – No. 2. – P. 24–27. (In Russian)].
42. Ларина Е.С., Овчинский В.С. «Интернет всего»: польза и риски для общества // ОБЖ: Основы безопасности жизни. – 2021. – № 3. – С. 38–42. [Larina, E.S., Ovchinskij, V.S. «Internet vsego»: pol'za i riski dlya obshchestva // OBZH: Osnovy bezopasnosti zhizni. – 2021. – No. 3. – S. 38–42. (In Russian)].
43. Соменков С.А. Искусственный интеллект: от объекта к субъекту? // Вестник университета имени О.Е. Кутафина. – 2019. – № 2. – С. 75–85. [Somenkov, S.A. Iskusstvennyj intellekt: ot ob"ekta k sub"ektu? // Vestnik universiteta imeni O.E. Kutafina. – 2019. – No. 2. – P. 75–85. (In Russian)].
44. Ватаманюк И.В., Яковлев Р.Н. Обобщенные теоретические модели киберфизических систем // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2019. – Т. 23, № 6. – С. 161–175. [Vatamanyuk, I.V., Yakovlev, R.N. Obobshchennye teoreticheskie modeli kiberfizicheskikh sistem // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. – 2019. – Vol. 23, no. 6. – S. 161–175. (In Russian)].
45. Bilgin, G., Erturk, S., and Yildirim, T. Segmentation of Hyperspectral Images via Subtractive Clustering and Cluster Validation Using One-class Support Vector Machines // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2011. – Vol. 49, no. 8. – P. 2936–2944.
46. Laliberte, A.D., Browning, D.M., and Rango, A. A comparison of three feature selection methods for object-based classification of sub-decimeter resolution UltraCam-L imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2011. – Vol. 15. – P. 70–78.
47. Катанцев Д. Современное состояние геоинформационных систем // Армейский сборник. – 2023. – № 9. – С. 102–112. [Katancev D. Sovremennoe sostoyanie geoinformacionnyh sistem. Armejskij sbornik. – 2023. – No. 9. – P. 102–112. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии
Б. В. Павловым.

Поступила в редакцию 06.12.2023,
после доработки 24.01.2024.
Принята к публикации 21.02.2024.

Алчинов Александр Иванович – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ alchinov46@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-6553-376X>

Гороховский Игорь Николаевич – канд. техн. наук, НИЦ ТГНО 27 ЦНИИ, г. Москва, ✉ ginbox@mail.ru,

Акифьева Елена Викторовна – Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ lenatalka1@mail.ru,

© 2024 г. Алчинов А. И., Гороховский И. Н., Акифьева Е. В.



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

STATE-OF-THE-ART AND DEVELOPMENT TRENDS OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS

A. I. Alchinov*, I. N. Gorokhovskiy**, and E. V. Akif'eva***

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

**Research Center of Topographic and Navigational Support, Central Research Institute No. 27, Moscow, Russia

*✉ alchinov46@mail.ru, **✉ gin_box@mail.ru, ***✉ lenatalka1@mail.ru

Abstract. When managing complex organizational and technical systems, decision support remains relevant due to the growing role and capabilities of geographic information systems (GISs). This survey is devoted to GISs. We analyze the level of their representation in the world and Russian environment, the peculiarities of their development, and the main related results obtained at the Trapeznikov Institute of Control Sciences, the Russian Academy of Sciences. We highlight the technologies and functionality of GISs that are of high demand in the field of management. A GIS is interpreted as a mechanism to process and support managerial decisions. The main foreign and Russian GISs are overviewed, including their main characteristics, applications, and development trends. We describe geoinformation technologies and algorithms implemented in full-fledged GISs and also those providing platforms for creating various-purpose GISs.

Keywords: geographic information system, remote sensing of the Earth, data storage, cloud service, knowledge base, modeling, visualization, aerial photography, Internet of Things, cartographic research method, artificial intelligence, machine learning.

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЕНТЕРАБЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ НА СЕТЕВЫХ ГРАФИКАХ[#]

О. А. Косоруков*, Д. В. Лемтюжникова**

*МГУ им. М. В. Ломоносова; РАНХиГС при Президенте РФ, г. Москва

**Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН;
МАИ (национальный исследовательский университет), г. Москва

*✉ kosorukovoa@mail.ru, **✉ darabbt@gmail.com

Аннотация. Рассматривается задача распределения реентерабельных ресурсов при выполнении комплекса взаимозависимых работ, представленного в виде сетевого графика. Предполагается линейная зависимость времени выполнения работ от используемых ресурсов. Обосновывается алгоритм построения решения для работ с предопределенной последовательностью наступления событий в сетевом графике комплекса работ. Предлагается алгоритм сведения задачи общего вида к вспомогательной задаче с упорядоченными временами наступления событий, а также алгоритм построения оптимального решения исходной задачи. Сходимость данного алгоритма обусловлена конечностью итераций на каждом из этапов. Общая вычислительная сложность алгоритма может быть оценена как $O(n^2)$, где n – количество вершин в исходном сетевом графике. Представляется перспективным применение предложенного алгоритма для планирования комплексов взаимосвязанных работ с использованием реентерабельных ресурсов.

Ключевые слова: сетевой график, неупорядоченные события, объединение событий, расщепление событий, поиск путей.

ВВЕДЕНИЕ

Задачам сетевого планирования посвящен значительный объем литературы и научных публикаций. В частности, постановки оптимизационных задач на сетевых графиках приведены в монографии [1], однако в отличие от динамических задач распределения ресурсов, рассматриваемых в настоящей статье, они являются статическими. Задачи, исследуемые в данной работе, по своей постановке отличаются от задач, приведенных в работе [1], где рассматриваются сепарабельные или, как их часто называют, материально-технические ресурсы. В настоящей статье рассматривается другой вид ресурсов, а именно ресурсы, допускающие повторное использование на различных работах в различные моменты времени, например персонал или техника.

[#] Результаты исследований частично получены за счет средств Российского научного фонда (проект № 22-71-10131).

Такой вид ресурса будем называть реентерабельным, в литературе он часто называется нескладировемым или ресурсом типа «мощности». Приведем краткий обзор результатов для задач данного типа.

В книге [2] утверждается, что не существует точных алгоритмов для нахождения оптимального распределения ресурсов в общем случае, но существует ряд эвристических алгоритмов. Под общим случаем понимается: комплекс работ, заданный произвольным сетевым графиком; наличие нескольких ресурсов известных объемов; каждая работа выполняется одним видом ресурсов; операции выполняются с фиксированной интенсивностью (т. е. от начала до окончания интенсивность не изменяется). Приводятся результаты для независимых работ с вогнутыми функциями интенсивностей. Отмечается, что в случае, когда одна работа выполняется несколькими видами ресурсов, но с фиксированным распределением долей использования ресурсов (для каждой работы своя структура), результаты остаются справедливыми.

Утверждается, что, если функции интенсивностей не вогнутые (общий случай), то всегда существует оптимальное решение, содержащее не более n интервалов постоянства, т. е. на них интенсивности не меняются. Приводится результат для независимых работ с выпуклыми функциями интенсивностей. Для случая фиксированных интенсивностей и независимых работ рассматривается оптимизационный алгоритм, аналог симплекс-метода для конкретного класса задач.

В статье [3] рассматривается случай проектов с зависимыми работами (произвольный сетевой график), которые выполняются с фиксированными априори заданными интенсивностями. В качестве критерия эффективности расписания рассматривается средневзвешенное время завершения всех работ проекта.

В публикации [4] для множества матриц-планов стандартной транспортной задачи построен критерий, при выполнении которого это множество содержит матрицу, элементы которой не превосходят фиксированного значения, и построены тождества, определяющие общие свойства всех матриц-планов с ограничениями для элементов матрицы. Построенные критерий и тождества позволяют найти (минимаксную) матрицу, у которой наибольший элемент минимален, и определить это минимаксное значение. Получены необходимые и достаточные условия, при которых минимаксная матрица единственна.

В статье [5] рассмотрены вопросы оценивания параметров работы сетевых моделей управления проектами. Описаны особенности построения сетевых моделей при различных условиях применения сетевого планирования. Оценено влияние агрегирования моделей на точность календарных планов.

Близким по постановке задачам динамического управления ресурсами посвящена работа [6]. В ней рассматривалась гидростатическая модель. С опорой на физические аналогии и законы было показано, что оптимальное использование ресурсов достигается при минимуме функционала, который выражает величину потенциальной энергии.

В докладе [7] рассматривались задачи теории расписаний с нескладируемыми ресурсами и алгоритмы их решения на основе методов ветвей и границ.

Отметим также несколько работ зарубежных авторов. В статье [8] рассматриваются задачи планирования проектов с ограниченными потоками ресурсов и материалов (англ. *resource-and-material-flow-constrained project scheduling problem*, RMCPSP). В публикации [9] приводится сопостав-

ление некоторых алгоритмов распределения ресурсов на сетевых графиках. В работе [10] представлен обзор результатов по вопросам динамического распределения ресурсов на сетевых графиках, а также приведена подробная библиография.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется некоторое множество взаимозависимых работ l_j ($j = 1, \dots, m$). Предположим также, что каждой работе соответствуют две числовые характеристики, а именно $Q_j > 0$ и $\tau_j > 0$ ($j = 1, \dots, m$), где Q_j – объем работы l_j , а τ_j – время выполнения работы l_j . Допустим, что ограничения на последовательность выполнения работ определяются структурой ориентированного графа $\{M, N\}$, где $M = \{z_i\}$, $i = 0, \dots, n$, – множество вершин или событий, а $N = \{l_j\}$, $j = 1, \dots, m$, – множество дуг графа, каждая из которых соответствует одной из работ. Задачи данного вида исследованы в теории сетевого планирования. Методы построения таких сетевых моделей и анализа их характеристик известны [1]. Согласно теории сетевого планирования определим для каждого события z_i новую переменную, а именно время его наступления t_i ($i = 1, \dots, n$). Основными ограничениями в сетевом планировании являются следующие: событие, соответствующее данной вершине, не может произойти раньше, чем будут завершены все входящие в него работы, и любая работа, исходящая из некоторой вершины, не может быть начата раньше, чем наступит событие, соответствующее данной вершине.

Согласно определению сетевого графика, для графа $\{M, N\}$ предполагаем выполнение следующих условий [1]:

а) существует единственная вершина z_0 такая, что не существует работ вида (z_i, z_0) , где z_0 – начало выполнения комплекса работ (если таких вершин несколько, то их можно объединить, сопоставив им t_0^* – время начала выполнения комплекса работ);

б) существует единственная вершина z_n такая, что не существует дуг вида (z_n, z_i) (в противном случае совместим эти понятия, положив времена их наступления равными t_n^* , где t_n^* – время завершения выполнения комплекса работ);

в) в графе отсутствуют замкнутые пути;

г) для любой вершины z_i ($i = 1, \dots, n-1$) существует путь из z_0 в z_n , проходящий через z_i . Для любой дуги l_j ($j = 1, \dots, m$) существует путь, содержащий эту дугу.

Вышеперечисленные ограничения и определяют понятие сетевого графика.



Предположим, что в течение всего периода выполнения работы l_j выделенный на ее выполнение ресурс не изменяется и равен величине c_j . Зависимость времени выполнения работы τ_j от выделенного на нее ресурса c_j определяется соотношением

$$\tau_j = \theta_j^2 - \theta_j^1 = \frac{Q_j}{c_j}, j = 1, \dots, m.$$

Пусть работа l_j соответствует дуге сетевого графика (z_{j1}, z_{j2}) , тогда времена ее начала и окончания и времена наступления стартового и финального события связаны следующими соотношениями:

$$t_{j1} \leq Q_j^1 < Q_j^2 \leq t_{j2}, j = 1, \dots, m,$$

где θ_j^1 – время начала выполнения работы l_j ; θ_j^2 – время окончания выполнения работы l_j .

Эти соотношения определяют невозможность наступления события z_{j2} до момента выполнения всех работ, входящих в вершину z_{j2} . Кроме того, заданы время начала выполнения всех работ t_0^* и время завершения выполнения всех работ t_n^* .

Задача состоит в определении таких времен наступления событий t_i ($i = 1, \dots, n-1$), времен начала и окончания всех работ (θ_j^1, θ_j^2) ($j = 1, \dots, m$) и функций распределения ресурса по работам $c_j(t)$, чтобы максимальное количество ресурсов, задействованных одновременно на выполнении данного множества работ, было минимальным.

Математическую постановку задачи можно представить следующим образом:

$$\min_{\bar{t}, \bar{\theta}} \max_{t \in [t_0^*, t_n^*]} u(t), \quad (1)$$

$$\bar{t} = (t_1, \dots, t_{n-1}), \bar{\theta} = (\theta_1^1, \theta_1^2, \dots, \theta_m^1, \theta_m^2);$$

$$u(t) = \sum_{j=1}^m c_j(t), t \in [t_0^*, t_n^*],$$

$$c_j(t) = \begin{cases} \frac{Q_j}{\theta_j^2 - \theta_j^1}, & t \in [\theta_j^1, \theta_j^2], \\ 0, & t \notin [\theta_j^1, \theta_j^2], \end{cases}$$

$$t_{j1} \leq \theta_j^1 < \theta_j^2 \leq t_{j2}, j = 1, \dots, m,$$

$$t_0 = t_0^*, t_n = t_n^*,$$

где $j1$ – номер вершины начала дуги j , а $j2$ – номер вершины окончания дуги j .

Утверждение 1. Если существует допустимое решение задачи (1) $(\bar{t}, \bar{\theta})$ такое, что

$$u(t) \equiv c = \sum_{j=1}^m Q_j \frac{j=1}{t_n^* - t_0^*}, t \in [t_0^*, t_n^*], \quad (2)$$

то вектор $(\bar{t}, \bar{\theta})$ является ее оптимальным решением.

Доказательство. Если решение задачи (1) является допустимым, то верны следующие соотношения:

$$\int_{t_0^*}^{t_n^*} u(t) dt = \sum_{j=1}^m \int_{t_0^*}^{t_n^*} c_j(t) dt = \sum_{j=1}^m \int_{\theta_j^1}^{\theta_j^2} \frac{Q_j}{\theta_j^2 - \theta_j^1} dt = \sum_{j=1}^m Q_j.$$

Предположим далее, что существует допустимое решение $(\bar{t}', \bar{\theta}')$ с функцией одновременно задействованных ресурсов $u_1(t)$ такое, что $\max_{t \in [t_0^*, t_n^*]} u_1(t) < c$.

Тогда

$$\int_{t_0^*}^{t_n^*} u_1(t) dt \leq \max_{t \in [t_0^*, t_n^*]} u_1(t) (t_n^* - t_0^*) < c (t_n^* - t_0^*) = \sum_{j=1}^m Q_j.$$

Следовательно, вопреки сделанному предположению, вектор $(\bar{t}', \bar{\theta}')$ не является допустимым решением. Из данного противоречия и следует справедливость утверждения 1.

2. ЗАДАЧА С УПОРЯДОЧЕННЫМИ ВРЕМЕНАМИ НАСТУПЛЕНИЯ СОБЫТИЙ

Рассмотрим сначала задачу (1) при условии, что времена наступления событий строго упорядочены, т. е. во всех допустимых решениях задачи (1) порядок наступления событий одинаков. Упорядочим события в соответствии со временем их наступления: $\bar{t} = (t_1, \dots, t_{n-1}), t_0^* < t_1 < \dots < t_{n-1} < t_n^*$.

В этом случае задача (1) может быть представлена в виде:

$$\min_{\bar{t}, \bar{\theta}} \max_{t \in [t_0^*, t_n^*]} u(t), \quad (3)$$

$$\bar{t} = (t_1, \dots, t_{n-1}), \bar{\theta} = (\theta_1^1, \theta_1^2, \dots, \theta_m^1, \theta_m^2),$$

$$u(t) = \sum_{\substack{j: j1 \leq k \\ j2 \geq k+1}} c_j(t), t \in [t_k, t_{k+1}], k = 0, \dots, n-1;$$

$$c_j(t) = \begin{cases} \frac{Q_j}{\theta_j^2 - \theta_j^1}, & t \in [\theta_j^1, \theta_j^2], \\ 0, & t \notin [\theta_j^1, \theta_j^2], \end{cases}$$

$$t_{j1} \leq \theta_j^1 < \theta_j^2 \leq t_{j2}, j = 1, \dots, m,$$

$$t_0^* < t_1 < t_2 < \dots < t_{n-1} < t_n^*,$$

$$t_0 = t_0^*, t_n = t_n^*.$$

Теорема 1. Существует оптимальное решение задачи (3) такое, что оно удовлетворяет соотношению (2).

Доказательство. Достаточно установить существование допустимого решения $(\bar{t}, \bar{\theta})$, для которого

справедливы условия теоремы 1. Тогда из утверждения 1 будет следовать его оптимальность. Пусть

$$\theta_j^1 = t_{j1}, \theta_j^2 = t_{j1+1}. \quad (4)$$

Убедимся в том, что ограничения (3) не нарушатся. Действительно, поскольку $\theta_j^1 = t_{j1} < t_{j1+1} = \theta_j^2 \leq t_{j2}$, имеем:

$$c_j(t) = \begin{cases} \frac{Q_j}{\theta_j^2 - \theta_j^1} = \frac{Q_j}{t_{j1+1} - t_{j1}}, & t \in [t_{j1}, t_{j1+1}], \\ 0, & t \notin [t_{j1}, t_{j1+1}]. \end{cases}$$

Откуда для $k = 0, \dots, n-1, t \in [t_k, t_{k+1}]$

$$\begin{aligned} u(t) &= \sum_{\substack{j: j1 \leq k, \\ j2 \geq k+1}} c_j(t) = \sum_{\substack{j: j2 = k, \\ j2 \geq k+1}} c_j(t) = \\ &= \sum_{\substack{j: j1 = k, \\ j2 \geq k+1}} \frac{Q_j}{t_{k+1} - t_k} = \frac{1}{t_{k+1} - t_k} \sum_{\substack{j: j1 = k, \\ j2 \geq k+1}} Q_j. \end{aligned}$$

Положим далее $u(t) \equiv c, t \in [t_0^*, t_n^*]$. Получаем систему уравнений

$$\sum_{\substack{j: j1 = k, \\ j2 \geq k+1}} Q_j = c(t_{k+1} - t_k), \quad k = 0, \dots, n-1. \quad (5)$$

Количество уравнений в системе n , а количество неизвестных $n-1$. Покажем теперь, что уравнения системы линейно зависимы. Пусть $k = n-1, l_m = (z_{n-1}, z_n)$, тогда

$$\begin{aligned} \frac{1}{t_n^* - t_{n-1}} \sum_{\substack{j: j1 = n-1, \\ j2 \geq n}} Q_j &= \frac{1}{t_n^* - t_{n-1}} Q_m = \frac{\sum_{j=1}^m Q_j - c(t_{n-1} - t_0^*)}{t_n^* - t_{n-1}} = \\ &= \frac{1}{t_n^* - t_{n-1}} \left[\sum_{j=1}^m Q_j - \frac{\sum_{j=1}^m Q_j}{t_n^* - t_0^*} (t_{n-1} - t_0^*) \right] = \\ &= \frac{\sum_{j=1}^m Q_j}{t_n^* - t_0^*} \frac{t_n^* - t_0^* - t_{n-1} + t_0^*}{t_n^* - t_{n-1}} = \frac{\sum_{j=1}^m Q_j}{t_n^* - t_0^*} = c. \end{aligned}$$

Как можно заметить, при выполнении условия (5) для $k = 0, \dots, n-2$, следует, что для $k = n-1$ условие выполнено и его можно исключить это из системы уравнений (5). Оставшиеся уравнения допускают явное аналитическое решение, а именно:

$$\begin{aligned} \bar{t} &= (t_1, \dots, t_{n-1}), \quad t_{k+1} = t_k + \frac{\sum_{\substack{j: j1 = k, \\ j2 \geq k+1}} Q_j}{c}, \quad (6) \\ k &= 1, \dots, n-2, \quad t_0 = t_0^*. \end{aligned}$$

На основе уравнений (4) вычислим вектор $\bar{\theta} = (\theta_1^1, \theta_1^2, \dots, \theta_m^1, \theta_m^2)$. Очевидно, что векторы \bar{t} и $\bar{\theta}$ удовлетворяют ограничениям задачи (3). Согласно

нашему построению функция $u(t)$ не изменяется на всем отрезке $t \in [t_0^*, t_n^*]$, а как следует из утверждения 1, полученное решение $(\bar{t}, \bar{\theta})$ является оптимальным решением задачи (3). ♦

Замечание. Выше из-за линейной зависимости системы уравнений не использовалось последнее из них. Однако исключать можно и любое другое уравнение. Если не рассматривается уравнение с номером i , то решение в явном виде будет таким:

$$\begin{aligned} t_{k+1} &= \frac{\sum_{\substack{j: j1 = k, \\ j2 \geq k+1}} Q_j}{c} + t_k, \quad k = 0, \dots, i-1, \quad t_0 = t_0^*, \\ t_k &= t_{k+1} - \frac{\sum_{\substack{j: j1 = k, \\ j2 \geq k+1}} Q_j}{c}, \quad k = n-1, \dots, i+1, \quad t_n = t_n^*. \end{aligned}$$

3. ЗАДАЧА С НЕУПОРЯДОЧЕННЫМ НАБОРОМ ВРЕМЕН НАСТУПЛЕНИЯ СОБЫТИЙ

В исходной постановке задача (1) не предписывает заданную последовательность событий. Можно доказать, что последовательность наступления событий z_i и z_j предопределена тогда и только тогда, когда существует путь из вершины z_i в z_j , что в силу свойств сетевых графиков, определенных ранее, равносильно существованию пути из z_0 в z_n , содержащего вершины z_i и z_j .

Теорема 2. *Задача (1) всегда имеет оптимальное решение такое, что оно удовлетворяет соотношению (2).*

Доказательство. Пусть для некоторых событий z_{i1} и z_{i2} времена их наступления не упорядочены. Модифицируем задачу (1) путем объединения событий z_{i1} и z_{i2} и приписывания им одного и того же времени наступления $t'_i: t_{i1} = t_{i2} = t'_i$.

Данная модификация задачи соответствует объединению вершин сетевого графика $\{M, N\}$. Можно показать, что модифицированный таким образом график по-прежнему удовлетворяет всем условиям, приведенным выше для сетевых графиков. Очевидно, что преобразованный сетевой график будет соответствовать требованиям а), б), г) (см. § 1). Для проверки выполнения пункта в) заметим, что операция объединения в сетевом графике может повлечь возникновение замкнутого пути тогда и только тогда, когда в исходном графе существует путь между объединяемыми вершинами. В силу предположения о неупорядоченности времен наступления этих событий, сделанного выше, такого пути нет, а в этом случае ограничение в) будет выполнено.

Покажем, что если векторы $\bar{t}' = (t_1, \dots, t_i, \dots, t_{n-1})$, $\bar{\theta} = (\theta_1^1, \theta_1^2, \dots, \theta_m^1, \theta_m^2)$ – допустимое решение для модифицированного сетевого графика, то



$$\bar{t} = (t_1, \dots, t_{i_1}, \dots, t_{i_2}, \dots, t_{n-1}), \bar{\theta} = (\theta_1^1, \theta_1^2, \dots, \theta_m^1, \theta_m^2), \quad (7)$$

где $t_{i_1} = t_{i_2} = t'_i$ – допустимое решение для первоначального сетевого графика. Поскольку события z_{i_1} и z_{i_2} не упорядочены, между ними не существует какого-либо пути в графе. В этом случае ограничения на компоненты векторов \bar{t} и $\bar{\theta}$ будут совпадать с точностью до замены переменных в модифицированной и первоначальной задаче.

Пусть сетевой график модифицирован вышеизложенным способом. Если в нем по-прежнему присутствуют пары событий с неустановленным порядком, то повторим вышеописанную операцию объединения для данных вершин. Очевидно, что, применяя данную процедуру конечное число раз мы получим граф с упорядоченным набором событий. Выше уже было доказано, что для задач такого типа существует оптимальное решение с функцией, удовлетворяющей условию (2), общий вид которого представляется как $\bar{\theta} = (\theta_1^1, \theta_1^2, \dots, \theta_m^1, \theta_m^2)$ и $\bar{t}^* = (t_1^*, \dots, t_q^*)$. Пусть размерность вектора \bar{t} в исходной задаче есть $n-1$. Тогда $q < n-1$. Последовательно разделяя объединенные события, построим вектор \bar{t} , содержащий $n-1$ компоненту, являющуюся компонентами вектора \bar{t}^* , который будет допустимым для задачи (1). Вычислим далее функцию $u(t)$, используя компоненты построенных векторов $(\bar{t}, \bar{\theta})$. Нетрудно убедиться, что она удовлетворяет условию (2). В этом случае, исходя из утверждения 1, вектор $(\bar{t}, \bar{\theta})$ есть оптимальное решение. ♦

По-видимому, можно было бы рассмотреть и иные способы сведения общей задачи к задаче с упорядоченными временами наступления событий. Например, декларативно определить некоторый порядок наступления неупорядоченных событий. Однако рассмотренный выше процесс объединения событий выгоден тем, что он влечет уменьшение количества переменных.

Теорема 3. Соотношение (2) справедливо для любого оптимального решения задачи (1).

Доказательство. Сделаем обратное предположение, т. е. предположим, что для некоторого оптимального решения $(\bar{t}, \bar{\theta})$ условие (2) не выполнено, а именно $u(t) \neq c$. На основе теоремы 1 имеем $u(t) \leq c$, $t \in [t_0^*, t_n^*]$. Все компоненты вектора $(\bar{t}, \bar{\theta})$ принадлежат отрезку $[t_0^*, t_n^*]$, их множество обозначим как

$$T = \{t_0^*, t_1, \dots, t_{n-1}, t_n^*, \theta_1^1, \theta_1^2, \dots, \theta_m^1, \theta_m^2\}.$$

На каждом интервале, образованном соседними точками данного множества, функция $u(t)$ является кон-

стантой. Отсюда следует, что найдутся такие точки $\tau_1 \in T$, $\tau_2 \in T$, что $u(t) \equiv \tilde{c} \leq c$, $t \in [\tau_1, \tau_2]$. Следовательно,

$$\int_{t_0^*}^{t_n^*} u(t) dt = \int_{t_0^*}^{\tau_1} u(t) dt + \int_{\tau_1}^{\tau_2} u(t) dt + \int_{\tau_2}^{t_n^*} u(t) dt \leq c(\tau_1 - t_0^*) + \tilde{c}(\tau_2 - \tau_1) + c(t_n^* - \tau_2) < c(t_n^* - t_0^*) = \sum_{j=1}^m Q_j.$$

Данное строгое неравенство не согласуется с утверждением 1, что и доказывает теорему 3.

4. АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Обобщим результаты, представленные в статье. Для задачи (1) динамического распределения ресурсов на сетевом графике всегда существует оптимальное решение, для которого интегральная функция динамического использования ресурсов определяется соотношением (2).

В статье обосновывается следующий алгоритм формирования оптимального решения.

1) *Формирование модифицированного сетевого графика.* Применяя один из методов поиска путей в графах [11], находим и объединяем события с неупорядоченными временами наступления. Это может быть реализовано, например, с использованием алгоритма бэктрекинга [12]. Если для задания структуры графа используется матрица смежности, то вычислительную сложность данного алгоритма можно оценить, как $O(n^2)$, где n – количество вершин в графе.

2) *Решение модифицированной задачи.* Элементы оптимального решения вычисляются на основе соотношений (4) и (6).

3) *Построение решения первоначальной задачи.* На основе метода расщепления отождествленных событий формируем решение первоначальной задачи в виде (7).

Сходимость данного алгоритма обусловлена, как было показано в статье, конечностью итераций на каждом из этапов. Поскольку на этапах 2 и 3 реализуются расчетные процедуры, вычислительная сложность которых не превосходит $O(n^2)$, то с учетом оценки вычислительной сложности этапа 1 представленного алгоритма общая вычислительная сложность алгоритма может быть оценена, как $O(n^2)$, где n – количество вершин в исходном графе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена задача динамического распределения ресурсов для реализации комплекса взаимозависимых работ по критерию минимизации общего объема распределяемых ресурсов. Задача решается с учетом предположения о линейной зависимости времени выполнения работ от используемых ресурсов. Обоснован алгоритм построения решения для работ с предопределенной последовательностью наступления событий в сетевом графике комплекса работ. Предложен алгоритм сведения задачи общего вида к вспомогательной задаче с упорядоченными временами наступления событий, а также алгоритм построения оптимального решения исходной задачи. Конечность итераций на каждом из этапов данного алгоритма обуславливает его сходимость. Общая вычислительная сложность алгоритма может быть оценена, как $O(n^2)$, где n – количество вершин в исходном сетевом графике. Предложенный алгоритм представляется полезным при планировании комплексов взаимосвязанных работ, при выполнении которых используются реентерабельные ресурсы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов Э.Г. Игры, графы, ресурсы. – М.: Радио и связь, 1981. – 113 с. [Davydov, E.G. Igra, grafy, resursy. – М.: Radio I svyaz', 1981. – 113 s. (In Russian)]
2. Бурков В.Н., Горгидзе И.А., Ловецкий С.Е. Прикладные задачи теории графов. – Тбилиси: Мецниреба, 1974. – 234 с. [Burkov, V.N., Gorgidze, I.A., Loveckij, S.E. Prikladnye zadachi teorii grafov. – Tbilisi: Mecniireba, 1974. – 234 s. (In Russian)]
3. Косоруков О.А., Лемтюжников Д.В., Мищенко А.В. Методы и модели управления ресурсами проекта в условиях неопределенности // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2023. – № 3. – С. 38–56. [Kosorukov, O.A., Lemtyuzhnikova, D.V., Mishchenko, A.V. Metody i modeli upravleniya resursami proekta v usloviyah neopredelennosti // Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya. – 2023. – No. 3. – P. 38–56. (In Russian)]
4. Mironov, A.A., Tsurkov, V.I. Transport-Type Problems with a Minimax Criterion // Automation and Remote Control. – 1995. – No. 12. – P. 109–118.
5. Ляхов О.А. Ресурсы в сетевом планировании сложных комплексов работ // Проблемы информатики. – 2013. – № 1 (18). – С. 27–36. [Lyahov, O.A. Resursy v setevom planirovanii slozhnykh kompleksov rabot // Problemy informatiki. – 2013. – No. 1 (18). – P. 27–36. (In Russian)]

6. Разумихин Б.С. Задача об оптимальном распределении ресурсов // Автоматика и телемеханика. – 1965. – Т. 26. – Вып. 3. – С. 1227–1247. [Razumikhin, B.S. The Problem on Optimal Resources Distribution // Automation and Remote Control. – 1965. – Vol. 26, no. 7. – P. 1227–1246. (In Russian)]
7. Mishenko, A., Kosorukov, O., Sviridova, O. Optimization of Works Management of the Investment Project // The 2-nd International & European Conference «Modelling and Simulation of Social-Behavioural Phenomena in Creative Societies» (MSBC-2022). – Vilnius, 2022. – P. 201–217.
8. Gehring, M., Volk, R., Schultmann, F. On the Integration of Diverging Material Flows into Resource-Constrained Project Scheduling // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 303, iss. 3. – P. 1071–1087.
9. Bianco, L., Caramia, M., Giordani, S. Project Scheduling with Generalized Precedence Relations: A New Method to Analyze Criticalities and Flexibilities // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 298, iss. 2. – P. 451–462.
10. de Lima, V.L., Alves, C., Clautiaux, F., et al. Arc Flow Formulations Based on Dynamic Programming: Theoretical Foundations and Applications // European Journal of Operational Research. – 2022. – Vol. 296, iss. 1. – P. 3–21.
11. Майника Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. – М.: Изд-во «Мир», 1981. – 319 с. [Minička, E. Optimization Algorithms for Networks and Graphs. – New York: M. Dekker, 1978.]
12. Филиппова А.С., Поречный С.С., Рамазанова Р.Р. Основы комбинаторных алгоритмов. – Уфа: Изд-во БГПУ, 2018. – 131 с. [Filippova, A.S., Porechnyj, S.S., Ramazanova, R.R. Osnovy kombinatornykh algoritmov. – Ufa: Izd-vo BGPU, 2018. – 131 s. (In Russian)]

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

Поступила в редакцию 03.02.2024,
после доработки 19.03.2024.
Принята к публикации 03.04.2024.

Косоруков Олег Анатольевич – д-р техн. наук, МГУ им. М. В. Ломоносова; РАНХиГС при Президенте РФ, г. Москва, ✉ kosorukovoa@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8235-4360>

Лемтюжников Дарья Владимировна – канд. физ.-мат. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН; МАИ (национальный исследовательский университет), г. Москва, ✉ darabbt@gmail.com, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5311-5552>

© 2024 г. Косоруков О. А., Лемтюжников Д. В.



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



AN OPTIMAL ALLOCATION ALGORITHM FOR REENTRANT RESOURCES ON NETWORK GRAPHS

O. A. Kosorukov* and D. V. Lemtyuzhnikova**

*Moscow State University, Moscow, Russia;

The Presidential Academy (RANEPA), Moscow, Russia

**Тrapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

*✉ kosorukova@mail.ru, **✉ darabbt@gmail.com

Abstract. This paper considers the problem of allocating reentrant resources when performing a set of interdependent works that are represented by a network graph. By assumption, the work completion time linearly depends on the resource amount used. We justify a solution algorithm in the case of a set of works with a predetermined sequence of events in the network graph. Also, we propose an algorithm for reducing the general problem to an auxiliary one with ordered event times and an algorithm for constructing an optimal solution of the original problem. The convergence of this algorithm is ensured by finite iterations at each stage. The overall computational complexity of the algorithm can be estimated as $O(n^2)$, where n denotes the number of vertices in the original network graph. It seems promising to apply this algorithm for planning the sets of interdependent works using reentrant resources.

Keywords: network graph, unordered events, event merging, event splitting, pathfinding.

Acknowledgments. This work was supported in part by the Russian Science Foundation, project no. 22-71-10131.

ПРИМЕНЕНИЕ МИРОВЫХ МОДЕЛЕЙ «ЗАТРАТЫ – ВЫПУСК» ДЛЯ АНАЛИЗА СТРУКТУРНЫХ СДВИГОВ И ОЦЕНКИ УЧАСТИЯ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ В ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦЕПОЧКАХ

В. Г. Варнавский

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

✉ varnavsky@imemo.ru

Аннотация. Россия значительной частью своей экономики участвует в международном разделении труда, мировой торговле, трансграничных производственных цепочках. В последние годы усиливается управление государством этими процессами путем прямых инвестиций в производство и инфраструктуру, а также применения мер налоговой, кредитной, бюджетной и иной политики. В результате возрастает потребность в проведении экономических исследований с применением математических моделей управления отраслями и комплексами, построенных на межстрановых таблицах «затраты – выпуск» (межотраслевые балансы мировой экономики) с выделенными в них блоками внешней торговли. В статье введены в научный оборот межотраслевые балансы мировой экономики, созданные в последние годы, дан их обзор. Предложена модель экономики России, основанная на традиционных таблицах «затраты – выпуск» с расширением их с помощью матриц потоков импорта промежуточной и конечной продукции. Проведена верификация модели на примере отраслей добывающего, обрабатывающего и транспортного комплексов России. Получены оценки динамики их развития и структурных сдвигов за период 2000–2018 гг. с учетом внешнеторговой составляющей. В модель введены формулы для вычисления коэффициентов участия отраслей в глобальных производственных цепочках. Исследование показало, что по степени включения в трансграничные добывающие, обрабатывающие, транспортно-логистические цепочки Россия сопоставима с другими странами, обладающими крупными территориями, запасами полезных ископаемых и транспортными коммуникациями, такими как США и Австралия. Определены перспективные направления совершенствования модели.

Ключевые слова: мировые модели «затраты – выпуск», управление отраслями, добывающая промышленность, обрабатывающая промышленность, транспортный комплекс, внешняя торговля, структурные сдвиги, глобальные производственные цепочки.

ВВЕДЕНИЕ

Мировые модели «затраты – выпуск» (межотраслевые балансы мировой экономики (МОБ МЭ), межстрановые таблицы «затраты – выпуск») – не новый, но эффективный и перспективный инструмент экономического анализа, который дает возможность решать самые разные задачи управления. Он известен еще с 1980-х гг., когда был опубликован доклад «Будущее мировой экономики», подготовленный группой экспертов ООН во главе с известным русским (по происхождению) экономистом В. В. Леонтьевым; глава IV этого доклада называлась «Описание мировой межрегиональной модели затраты – выпуск» [1, с. 57–75]. В докладе блоки глобальной модели рассматривались как регионы мировой экономики. Но наиболее активно это направление экономических исследований ста-

ликован доклад «Будущее мировой экономики», подготовленный группой экспертов ООН во главе с известным русским (по происхождению) экономистом В. В. Леонтьевым; глава IV этого доклада называлась «Описание мировой межрегиональной модели затраты – выпуск» [1, с. 57–75]. В докладе блоки глобальной модели рассматривались как регионы мировой экономики. Но наиболее активно это направление экономических исследований ста-



ло разрабатываться уже в XXI в., когда появились теории межстрановой фрагментации производства, глобальных производственных и стоимостных цепочек, внешней торговли в категориях добавленной стоимости и др. Все они опирались на математический аппарат описания сбалансированного развития с использованием в том числе межстрановых таблиц «затраты – выпуск» и МОБ МЭ.

Методологические основы современных межотраслевых балансов как инструмента экономических исследований наиболее полно представлены в объемном (более 700 стр. текста) Руководстве ООН по составлению и анализу таблиц «затраты – выпуск» [2]. И хотя в нем специально не рассматриваются вопросы построения именно МОБ МЭ, документ четко определяет главный вектор их развития. Такое внимание крупнейшей международной организации мира к тематике межотраслевых балансов мировой экономики не случайно и связано с рядом обстоятельств.

Во-первых, экономическая глобализация выдвинула на передний план проблематику мирового экономического роста во всех его проявлениях – закономерностях, тенденциях и трендах, управлении международной торговлей и межстрановыми производственными активами, трансграничным движением капитала, миграцией трудовых ресурсов и т. д. Проведение комплексных междисциплинарных исследований взаимосвязанного мира потребовало адекватного научного инструментария. И межотраслевые балансы мировой экономики стали как раз таким инструментом анализа.

Во-вторых, наблюдавшийся в конце XX – начале XXI в. бурный рост производительности труда и эффективности производства происходил в значительной степени благодаря повышению международной производственной кооперации и трансграничному взаимодействию хозяйствующих субъектов, расширению объема зарубежных поставок продукции и капиталовложений. Эти процессы также выдвинули на первый план задачу разработки адекватного методического, статистического и математического инструментария исследования глобальных процессов в области межстранового производства и управления им.

В-третьих, компьютеризация и цифровизация позволили исследователям на своих рабочих местах в режиме реального времени создавать сложные, многопараметрические, большеразмерные модели экономического развития, включать в них межотраслевые межстрановые связи, получать тем самым более полную, структурированную, разга-

регированную до уровня отраслей и производств картину развития мировой экономики. Мощные компьютеры и соответствующее программное обеспечение создали условия для обработки крупных объемов статистической и иной информации, в том числе мировых межотраслевых балансов большой размерности.

1. ОБЗОР МОДЕЛЕЙ И БАЗ ДАННЫХ

1.1. Теоретические основы

Межотраслевые балансы, их составление, проведение по ним расчетов стали в последние годы одним из важных объектов теории и прикладных исследований управления в социально-экономических системах. Активизация работ в этом направлении началась после мирового финансово-экономического кризиса 2008–2009 гг., когда, несмотря на многочисленные исследования мировой экономики, проводившиеся в том числе с использованием сложных, многопараметрических, стохастических и игровых моделей прогнозирования, никто не смог предсказать его наступления.

Другим фактором, способствовавшим широкому применению межотраслевых балансовых моделей в решении управленческих задач, стали появившиеся примерно в то же время концепции глобальных цепочек создания стоимости (ГЦСС, англ. *Global Value Chains, GVCs*) и «торговли в категориях добавленной стоимости» (англ. *Trade in Value Added, TiVA*). Заинтересованность в развитии этих концепций высказали такие международные организации, как ООН, ЮНКТАД, ВТО, что дало дополнительный толчок развитию мировых межотраслевых балансов. В частности, в 2016 г. ООН выпустила «Руководство по измерению глобального производства», важными составными частями которого являются обе эти концепции [3].

Главная методологическая проблема, которую решали ученые с начала 2000-х гг., сводилась к строгому математическому разложению стоимости экспорта на составляющие элементы в зависимости от страны происхождения. Теоретическими разработками решения этой проблемы занимались многие экономические школы. В результате это удалось сделать в 2010-е гг. группе ученых и специалистов под руководством директора управления экономики и главного экономиста Комиссии по международной торговле США Р. Купмана [4].

Полученные ими формульные зависимости составляющих экспорта в категориях добавленной стоимости легли в основу базы данных ОЭСР и ВТО TiVA Database [5].

Из числа работ последних лет следует выделить книгу коллектива ученых под руководством известного профессора международной экономики Женевского института международных исследований Р. Болдуина [6]. В ней изучается инструментарий оценки воздействия внешних шоков на глобальные цепочки и представлен системный подход к разработке соответствующих индикаторов. В частности, на примере трех стран (США, Китай, Мексика) подробно разобран механизм отслеживания трехзвенной цепочки поставок: импорт промежуточной продукции (первое звено) – переработка (второе звено) – экспорт в третью страну (третье звено). Представлен математический аппарат, использующий таблицы «затраты – выпуск». В другой работе приводятся полученная авторами формула и алгоритм разложения валового экспорта на компоненты по добавленной стоимости [7].

Европейским союзом опубликован технический отчет, который позволяет разложить факторную составляющую двусторонней торговли, измеряемой на таможенной границе, и учесть специфику различных стран и отраслей в глобальных цепочках создания стоимости [8]. В нем предложены и обоснованы новые формулы расчета соотношения добавленной стоимости и экспорта в мультирегиональных таблицах «затраты – выпуск».

1.2. Прикладные исследования

Еще со времен В. В. Леонтьева одним из главных направлений прикладных исследований, основанных на межотраслевых балансах, было проведение расчетов структурных изменений в экономике и оценка влияния факторов производства на экономический рост. В настоящее время в мире выпускается ряд специализированных журналов, посвященных анализу структурных сдвигов. Например, это индексированный в Scopus журнал *Structural Change and Economic Dynamics* (Нидерланды). В нем большое внимание уделяется вопросам разработки и применения в экономическом анализе мировых моделей «затраты – выпуск». Так, в статье [9] изучаются структурные сдвиги между крупными группами стран мировой экономики. В частности, показано, что участие в глобальных производственных цепочках может облегчить процесс структурных преобразований в развивающихся экономиках.

В 2011 г. Тихоокеанская ассоциация проведения исследований «затраты – выпуск» (*The Pan-Pacific Association of Input–Output Studies*, PAPAIOS) учредила междисциплинарный научный журнал *The Journal of Economic Structures*, статьи которого также размещаются в Scopus. В публикации этого журнала [10] анализируются ряды статистических данных по экономическому росту ряда стран ОЭСР за период с 1995 по 2011 г. С использованием модели «затраты – выпуск» определяется вклад в него компонент конечного спроса.

Одно из интересных прикладных исследований для автомобильной промышленности проведено разработчиками базы данных *World Input–Output Database M*. Тиммером с коллегами (университет Гронингена, Нидерланды) [11]. Используя таблицы «затраты – выпуск» для мировой экономики, они проанализировали динамику сдвигов в географическом распределении добавленной стоимости в мировом автомобилестроении за 1995–2011 гг. Получен вывод о растущей международной фрагментации производства в отрасли как внутри регионов, так и между ними.

В последние годы из-за участившихся катастроф как техногенного, так и природного характера возросло число публикаций по оценке влияния на экономику и отдельные отрасли различного рода форс-мажорных обстоятельств, от землетрясений и наводнений до пандемии COVID-19. Для анализа механизма передачи шоков от падения спроса на готовую продукцию в статье [12], например, построена и используется глобальная таблица «затраты – выпуск» (35 отраслей, 29 эндогенных и 59 экзогенных стран). Также авторами разработаны специальные индексы для измерения степени сокращения добавленной стоимости и выпуска промежуточных товаров.

В статье [13] изучаются экономические последствия землетрясения в префектуре Кумамото (Япония) в 2016 г. Используя межрегиональную таблицу «затраты – выпуск», авторы моделируют негативные эффекты для потребительских расходов и добавленной стоимости в регионах страны. Одновременно оценивается позитивное влияние резкого роста совокупных расходов государства и домохозяйств на реконструкцию и строительство. С учетом межотраслевых связей оценен чистый прирост добавленной стоимости. Сделан вывод о том, что несмотря на прямой ущерб экономике префектуры Кумамото от землетрясения, хозяйственная деятельность по ликвидации последствий превысила его и привела к быстрому восстановлению экономики региона.



В исследовании [14] также изучаются экономические потери от кибератак в Японии с использованием производственной функции и модели «затраты – выпуск». За целевую функцию модели принят размер ущерба и эффективность различных государственных мер по снижению и предотвращению ущерба. Исходная числовая информация – потерянное рабочее время вследствие киберинцидентов. Эти данные были наложены на таблицу «затраты – выпуск», благодаря чему удалось рассчитать опосредованные эффекты. В результате был оценен прямой и косвенный ущерб во всех отраслях экономики Японии в показателях потерянного рабочего времени.

Наиболее популярной темой последних лет является пандемия COVID-19. Значительный объем литературы посвящен оценке ее воздействия с применением метода «затраты – выпуск» в качестве инструмента исследования из-за его наиболее полного учета прямых и опосредованных эффектов. Например, в [15] на основе теоретико-графового метода и таблиц «затраты – выпуск» выделяются отрасли экономики, потенциально наиболее уязвимые для пандемии COVID-19. Анализ проводился для восьми крупнейших стран, включая Россию. Установлено, что во всех странах приоритетными для правительств отраслями по принятию мер помощи были обрабатывающая промышленность, недвижимость и оптовая торговля.

1.3. Базы данных

За последние десятилетия в мире было реализовано достаточно много проектов по созданию глобальных моделей, фактографическую основу которых составляют базы данных, содержащих таблицы «затраты – выпуск». Разработаны они и поддерживаются как частными организациями, так и по заказам органов власти.

Одной из первых крупных мирового уровня разработок в этой области является база данных глобальной торговли Global Trade Analysis Project database¹ (GTAP). Она существует с 1992 г. и создана консорциумом университетов США, частных и международных организаций в целях предоставления пользователям разнообразной структурированной статистической и расчетной числовой информации по экономическим показателям. Раз-

мещается в университете Пердью (США). Основа GTAP – это мультирегиональная многоотраслевая математическая модель общего равновесия с совершенной конкуренцией и постоянной отдачей от масштаба производства. Центральным ее звеном является база данных показателей двусторонней торговли стран мира, производства, потребления и промежуточного использования товаров и услуг («затраты – выпуск»). Версия 11 GTAP содержит данные за 2004, 2007, 2011, 2014 и 2017 гг. в разрезе 65 отраслей по 141 стране (включая Россию), может быть структурирована по 19 регионам мира, что делает ее мультирегиональной.

В 2009 г. Европейский союз принял решение о финансировании проекта по разработке собственной базы данных мировых межотраслевых балансов World Input–Output Database (WIOD). По заказу ЕС эту работу в течение нескольких лет выполнял консорциум европейских университетов и исследовательских центров. Поддерживается база данных головной организацией консорциума – университетом Гронинген² (Нидерланды). Актуальная версия от 2016 г. содержит 15 ежегодных МОБ МЭ за 2000–2014 гг., охватывает 43 страны (27 стран ЕС + 16 стран, не входящих в союз, включая Россию) + «остальной мир», 56 отраслей.

Расширением WIOD с помощью дополнительных страновых таблиц стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР) является база данных Multiregional Input–Output Table³ (MRIO). Она включает в дополнение к имеющимся в WIOD 6-ти азиатским странам еще 19 стран этого региона. Работу по составлению MRIO с 2014 г. ведет и финансирует Азиатский банк развития. В базу данных включены национальные таблицы «затраты – выпуск» по 26 странам АТР за 2000–2020 гг.

В данной статье для моделирования использована информация из базы данных Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) Inter-Country Input–Output⁴ (ICIO), версия 2021 г. Таблицы «затраты – выпуск» ICIO составлены за 1995–2018 гг. по 67 странам (в том числе по России) в разрезе 45 отраслей по стандартной международной отраслевой классификации ISIC 2009 г.

² URL: <https://www.rug.nl/ggdc/valuechain/wiod/?lang=en> (дата обращения 19.02.2024).

³ URL: <https://www.adb.org/what-we-do/data/regional-input-output-tables> (дата обращения 19.02.2024).

⁴ URL: <https://www.oecd.org/sti/ind/inter-country-input-output-tables.htm> (дата обращения 19.02.2024).

¹ URL: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/> (дата обращения 19.02.2024).

2. МОДЕЛЬ

2.1. Межотраслевой баланс мировой экономики

Авторская трактовка математической модели МОБ МЭ приведена в табл. 1.

Здесь:

a_{ij}^{mn} – поток продукции отрасли i страны m , поступившей в промежуточное (производственное) потребление отрасли j страны n ;

y_{ik}^{mn} – продукция отрасли i страны m , поступившая в конечное потребление страны n в форме компоненты $k = 1, \dots, K$ (категории конечного потребления). Как правило, конечное потребление включает три группы затрат: конечное (непроизводственное) использование продуктов и услуг каждой отрасли на потребление домашних хозяйств, органов государственного управления, некоммерческих организаций, обслуживающих домашние хозяйства; валовое накопление основного

капитала, изменение запасов материальных оборотных средств, чистое приобретение ценностей; экспорт – импорт;

x_i^m – валовая продукция отрасли i страны m ;

v_j^n – добавленная стоимость, созданная в от-

расли j страны n . Может быть представлена в виде суммы таких компонент (категорий), как оплата труда наемных работников, валовая прибыль, валовой смешанный доход, налоги и субсидии (–), связанные с производством, потребление основного капитала, налоги и субсидии (–) на продукты;

$i, j \in \{1, 2, \dots, I\}$, i и j – номера отраслей в строках и столбцах матрицы МОБ МЭ соответственно, I, J – число отраслей, $I = J$;

$n, m \in \{1, 2, \dots, M\}$, n и m – номера стран в МОБ МЭ в строках и столбцах соответственно, N, M – число стран, $N = M$;

$k \in \{1, 2, \dots, K\}$, k – компонента конечного потребления, K – число компонент конечного потребления в МОБ МЭ.

Таблица 1

Межотраслевой баланс мировой экономики

Затраты		Выпуск										Валовой выпуск
		Промежуточные товары					Конечный продукт					
		1_1	...	n_j	...	N_J	1_1	...	n_k	...	N_K	
Страна 1	1_1	a_{11}^{11}	...	a_{1j}^{1n}	...	a_{1J}^{1N}	y_{11}^{11}	...	y_{1k}^{1n}	...	y_{1K}^{1N}	x_1^1
	2_1	a_{21}^{11}	...	a_{2j}^{1n}	...	a_{2J}^{1N}	y_{21}^{11}	...	y_{2k}^{1n}	...	y_{2K}^{1N}	x_2^1

	I_1	a_{I1}^{11}	...	a_{Ij}^{1n}	...	a_{IJ}^{1N}	y_{I1}^{11}	...	y_{Ik}^{1n}	...	y_{IK}^{1N}	x_I^1
Страна 2	1_2	a_{11}^{21}	...	a_{1j}^{2n}	...	a_{1J}^{2N}	y_{11}^{21}	...	y_{1k}^{2n}	...	y_{1K}^{2N}	x_1^2
	2_2	a_{21}^{21}	...	a_{2j}^{2n}	...	a_{2J}^{2N}	y_{21}^{21}	...	y_{2k}^{2n}	...	y_{2K}^{2N}	x_2^2

	I_2	a_{I1}^{21}	...	a_{Ij}^{2n}	...	a_{IJ}^{2N}	y_{I1}^{21}	...	y_{Ik}^{2n}	...	y_{IK}^{2N}	x_I^2
Страна m	1_m	a_{11}^{m1}	...	a_{1j}^{mn}	...	a_{1J}^{mN}	y_{11}^{m1}	...	y_{1k}^{mn}	...	y_{1K}^{mN}	x_1^m
	2_m	a_{21}^{m1}	...	a_{2j}^{mn}	...	a_{2J}^{mN}	y_{21}^{m1}	...	y_{2k}^{mn}	...	y_{2K}^{mN}	x_2^m

	I_m	a_{I1}^{m1}	...	a_{Ij}^{mn}	...	a_{IJ}^{mN}	y_{I1}^{m1}	...	y_{Ik}^{mn}	...	y_{IK}^{mN}	x_I^m
Страна M	1_M	a_{11}^{M1}	...	a_{1j}^{Mn}	...	a_{1J}^{MN}	y_{11}^{M1}	...	y_{1k}^{Mn}	...	y_{1K}^{MN}	x_1^M
	2_M	a_{21}^{M1}	...	a_{2j}^{Mn}	...	a_{2J}^{MN}	y_{21}^{M1}	...	y_{2k}^{Mn}	...	y_{2K}^{MN}	x_2^M

	I_M	a_{I1}^{M1}	...	a_{Ij}^{Mn}	...	a_{IJ}^{MN}	y_{I1}^{M1}	...	y_{Ik}^{Mn}	...	y_{IK}^{MN}	x_I^M
Добавленная стоимость		v_1^1	...	v_j^n	...	v_J^N	–	–	–	–	–	–
Валовой выпуск		x_1^1	...	x_j^n	...	x_J^N	–	–	–	–	–	–



Валовой выпуск x_i^m отрасли i страны m по строкам можно представить как сумму продукции промежуточного и конечного потребления:

$$x_i^m = \sum_{n=1}^M \sum_{j=1}^I a_{ij}^{mn} + \sum_{n=1}^M \sum_{k=1}^K y_{ik}^{mn}, \quad (1)$$

а по столбцам в виде суммы промежуточного потребления и добавленной стоимости:

$$x_j^n = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I a_{ij}^{mn} + v_j^n. \quad (2)$$

Преобразуем исходные уравнения и введем новые обозначения.

Сформируем новый вектор валового выпуска \hat{X} , расположив в нем последовательно валовые выпуски x_i^m по странам $m = 1, 2, \dots, M$:

$$\hat{X} = \{x_1^1, x_2^1, \dots, x_I^1, x_1^2, x_2^2, \dots, x_I^2, \dots, x_1^M, x_2^M, \dots, x_I^M\}.$$

Число компонент в векторе \hat{X} будет равно $I \times M$. Обозначим это число через R , а компоненты вектора \hat{X} через \hat{x}_r . Тогда вектор \hat{X} можно записать в форме

$$\hat{X} = \{\hat{x}_r\}_{r=1, \dots, R}.$$

Аналогично построим вектор конечной продукции для мировой экономики $\hat{Y} = \{\hat{y}_r\}_{r=1, \dots, R}$, где \hat{y}_r – расположенные последовательно по странам показатели конечного потребления по всем отраслям.

Представим матрицу потоков промежуточной продукции $\{a_{ij}^{mn}\}_{i,j=1,2,\dots,I}^{m,n=1,2,\dots,M}$, пронумеровав в ней все строки и столбцы от 1 до R , в форме

$$\hat{A} = \{\hat{a}_{rs}\}_{r,s=1, \dots, R}$$

и вычислим коэффициенты прямых затрат (технологические коэффициенты) МОБ мировой экономики c_{rs} при сквозной нумерации строк и столбцов: $c_{rs} = \hat{a}_{rs} / \hat{x}_s$, где r и s – это текущие строка и столбец соответственно.

Тогда матрица прямых затрат МОБ мировой экономики примет вид:

$$C = \{c_{rs}\}_{r,s=1,2,\dots,R},$$

а уравнение межотраслевого баланса в матричной форме будет таким:

$$\hat{X} = C\hat{X} + \hat{Y}$$

или

$$\hat{X} = (E - C)^{-1} \hat{Y}, \quad (3)$$

где \hat{X} – вектор валовой продукции $\{\hat{x}_r\}_{r=1, \dots, R}$; \hat{Y} – вектор конечной продукции $\{\hat{y}_r\}_{r=1, \dots, R}$; C – мат-

рица коэффициентов прямых затрат $\{c_{rs}\}_{r,s=1,2,\dots,R}$;

E – единичная матрица размерности $R \times R$ (по диагонали находятся единицы, все остальные элементы равны нулю).

2.2. Таблицы «затраты – выпуск» ICIO

Для проведения расчетов по формуле (3) была использована информация из базы данных ICIO, версия 2021 г. (см. сноску 4 на с. 33). Реализация модели (1)–(3) представляет собой МОБ МЭ со следующими параметрами: $i, j = 1, \dots, 45$; $I, J = 45$ – число отраслей; $m, n = 1, \dots, 67$; $M, N = 67$ – число стран; $r = 1, \dots, 3\,015$; $R = 3\,015$ – число строк и столбцов.

Вектор конечной продукции \hat{Y} представлен в ICIO в разрезе $K = 6$ компонент ($k = 1, \dots, 6$): потребление домашних хозяйств; потребительские расходы некоммерческих организаций, обслуживающих домашние хозяйства; прямые закупки нерезидентами; конечное потребление правительства; валовое накопление основного капитала и изменения в товарно-материальных запасах [5, p. 10].

Каждая страновая матрица промежуточной продукции в ICIO $A = \{a_{ij}\}$ разбита на две матрицы:

$$AD = \{a_{ij}^d\}_{i,j=1, \dots, I} - \text{матрица промежуточных}$$

потоков продукции внутри страны (*domestic intermediate inputs*);

$$IM = \{im_{ij}\}_{i,j=1, \dots, I} - \text{матрица импорта, поступающего}$$

в промежуточное потребление (промежуточный импорт, *intermediate import*):

$$A = AD + IM. \quad (4)$$

Аналогично разложены компоненты конечного потребления на внутреннюю продукцию и прямой импорт.

2.3. Оценка участия отраслей в трансграничных производственных цепочках

Наличие матрицы импорта промежуточной продукции для российской экономики позволяет рассчитать уровень включения ее отраслей в глобальные цепочки создания стоимости (ГЦСС). Для этого в модели рассчитывается показатель объема промежуточного импорта, входящего в состав экспорта, из таблиц ICIO (см. сноску 4 на с. 33) в авторской трактовке:

$$ImCEx = CIM(E - CAD)^{-1} Ex, \quad (5)$$

где:

$\mathbf{ImCEx} = \{imce_j\}_{j=1, \dots, I}$ – вектор значений импорта промежуточной продукции, который входит в состав экспорта по каждой отрасли (называется также «содержание импорта в экспорте», «объем импорта в экспорте» или «импортная составляющая экспорта»). Экономически j -я компонента ($imce_j$) вектора \mathbf{ImCEx} означает импортированную всеми отраслями в целях промежуточного потребления продукцию, которая в результате производственной переработки в экономике и получения готовой продукции входит в состав экспорта отрасли j . На это указывает произведение матрицы прямых затрат импорта \mathbf{CIM} на матрицу коэффициентов полных затрат внутренней продукции $(\mathbf{E} - \mathbf{CAD})^{-1}$, умноженную на вектор экспорта;

$\mathbf{CIM} = \{im_{ij} / x_j\}_{ij=1, \dots, I}$ – матрица коэффициентов прямых затрат импорта отрасли i при производстве продукции в отрасли j , получена из матрицы \mathbf{IM} (4);

$\mathbf{CAD} = \{a_{ij}^d / x_j\}_{ij=1, \dots, I}$ – матрица коэффициентов прямых затрат внутренней продукции (т. е. без учета импорта) при производстве продукции в отрасли j , получена из матрицы \mathbf{AD} (4);

$\mathbf{Ex} = \{ex_i\}_{i=1, \dots, I}$ – вектор экспорта по отраслям.

Полученные показатели с экономической точки зрения интерпретируются следующим образом:

- $(\mathbf{E} - \mathbf{CAD})^{-1} \mathbf{Ex}$ – вектор размерности I (I – число отраслей, введенное выше при пояснении переменных табл. 1), показывающий, сколько внутренней валовой продукции необходимо, чтобы произвести экспорт \mathbf{Ex} , который в данной формуле представляет собой аналог конечного продукта, поставляемого за рубеж;

- \mathbf{CIM} – при умножении данной матрицы размерности $I \times I$, состоящей из удельных затрат промежуточного импорта на единицу валовой продукции каждой отрасли, на указанный в предыдущем пункте вектор, получается вектор импорта, который затрачен на выпуск экспортированной продукции (по отрасли $i = 1, \dots, I$).

Содержание импорта в экспорте (вектор \mathbf{ImCEx}), или импортная составляющая экспорта, представляет собой вклад, который импорт вносит в производство экспортируемых товаров и услуг, и является показателем включения отрасли в глобальные цепочки через импорт. Таким образом, в цепочку входят минимум три страны – производитель импортной продукции, страна, в которой про-

исходит переработка импорта, и потребитель экспортированной продукции. Также этот показатель отражает уровень вертикальной специализации страны и ее отраслей в мировой экономике [16, р. 6].

2.4. Уравнения для отраслевых комплексов России

Добывающий, обрабатывающий и транспортный сектора в ICIO, в том числе и для России, представлены в разрезе следующих подотраслей (с отраслевыми номерами, под которыми они входят в исходные таблицы):

3. Добыча энергетических ресурсов;
4. Прочие отрасли добывающей промышленности;
5. Вспомогательная деятельность добывающих отраслей;
- 6–22. Обрабатывающая промышленность, в том числе:
 10. Кокс и нефтепродукты;
 15. Metallургия;
 - 20, 21. Автотранспортные средства (включая транспортное оборудование);
 22. Прочие отрасли обрабатывающей промышленности;
 35. Наземный транспорт, включая транспортировку по трубопроводам;
 36. Водный транспорт;
 37. Воздушный транспорт;
 38. Логистика, управление и вспомогательная деятельность.

В модели в соответствии с формулой (1) валовая продукция анализируемых комплексов России рассчитывается по формулам

$$x_d^{\text{RF}} = \sum_{s=3}^5 \left(\sum_{j=1}^{45} a_{sj}^{\text{RF}} + \sum_{k=1}^6 y_{sk}^{\text{RF}} \right), \quad (6)$$

$$x_o^{\text{RF}} = \sum_{s=6}^{22} \left(\sum_{j=1}^{45} a_{sj}^{\text{RF}} + \sum_{k=1}^6 y_{sk}^{\text{RF}} \right), \quad (7)$$

$$x_t^{\text{RF}} = \sum_{s=35}^{38} \left(\sum_{j=1}^{45} a_{sj}^{\text{RF}} + \sum_{k=1}^6 y_{sk}^{\text{RF}} \right), \quad (8)$$

где x_d^{RF} , x_o^{RF} и x_t^{RF} – валовые выпуски отрасли по добыче полезных ископаемых, обрабатывающей промышленности и транспортной отрасли РФ соответственно; a_{sj}^{RF} – потоки промежуточной продукции отрасли s в отрасль j экономики России, включая импорт, $s = 6, \dots, 22$; $j = 1, 2, \dots, 45$; y_{sk}^{RF} – конечное потребление компоненты k продукции отрасли s в России, включая импорт, $k = 1, \dots, 6$.

3. РАСЧЕТЫ ПО МОДЕЛИ И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Апробация модели (1)–(8) была проведена на примере отраслей добывающего, обрабатывающего и транспортного комплексов. Такой выбор объясняется важностью их для экономики России и высокой степенью вовлечения в трансграничные цепочки создания стоимости (ТЦСС). Были рассчитаны показатели структурных сдвигов в этих комплексах и уровень их включения в ТЦСС, а также проведен сравнительный анализ с другими странами.

Расчеты показали, что в рассматриваемом периоде 2000–2018 гг. добывающие отрасли и транспорт были драйверами экономического развития в России. Рост их производства опережал другие макроэкономические показатели, в частности валовой внутренний продукт (ВВП) и валовой объем производства в стране. В то время как ВВП и валовая продукция России увеличились в 2000–2018 гг. в 6 раз, объем выпуска добывающих отраслей показал рост в 7,2 раза, а транспортного комплекса – в 6,4 раза (расчет здесь и далее в текущих долл. США). А доля обрабатывающей промышленности в валовой продукции экономики России сократилась с 27,5 % до 26,0 %. В стоимостном выражении добыча полезных ископаемых возросла с 39,1 млрд долл. в 2000 г. до 280,4 млрд долл. в 2018 г. Производство отраслей транспортного сектора выросло за тот же период с 34 млрд долл. до 217 млрд долл. (в текущих ценах).

Мощным внутренним драйвером развития России был научно-технический прогресс, позволивший резко повысить эффективность и оптимизировать управление потоками продукции, логистику, вспомогательную деятельность. Благодаря их опережающему росту произошли значительные структурные сдвиги внутри самих комплексов.

В добыче полезных ископаемых и на транспорте выросло значение вспомогательных, дополнительных видов деятельности, включающих логистику, управление, сервисные услуги, а в добывающих отраслях также еще и разведку полезных ископаемых. В добывающем комплексе доля энергетических ресурсов сократилась с 85,8 % в 2000 г. до 78,8 % в 2018 г., а доля вспомогательных подотраслей добычи полезных ископаемых увеличилась за тот же период почти в три раза – с 3,7 % до 10,1 % (рис. 1).

В обрабатывающей промышленности сдвиги во многом повторяли тренды добычи полезных ископаемых. В структуре обрабатывающей промышленности наиболее существенно увеличился удельный вес кокса и нефтепродуктов (рис. 2). Также немного повысилась доля в обрабатывающей промышленности автотранспортных средств, но сократился относительный уровень металлургии.

В транспортном комплексе структурные сдвиги были еще более значительными: доля логистики, управления, складской и иной вспомогательной деятельности в валовой продукции возросла в 2,4 раза с 13,1 % в 2000 г. до 31,6 % в 2018 г. (рис. 3).

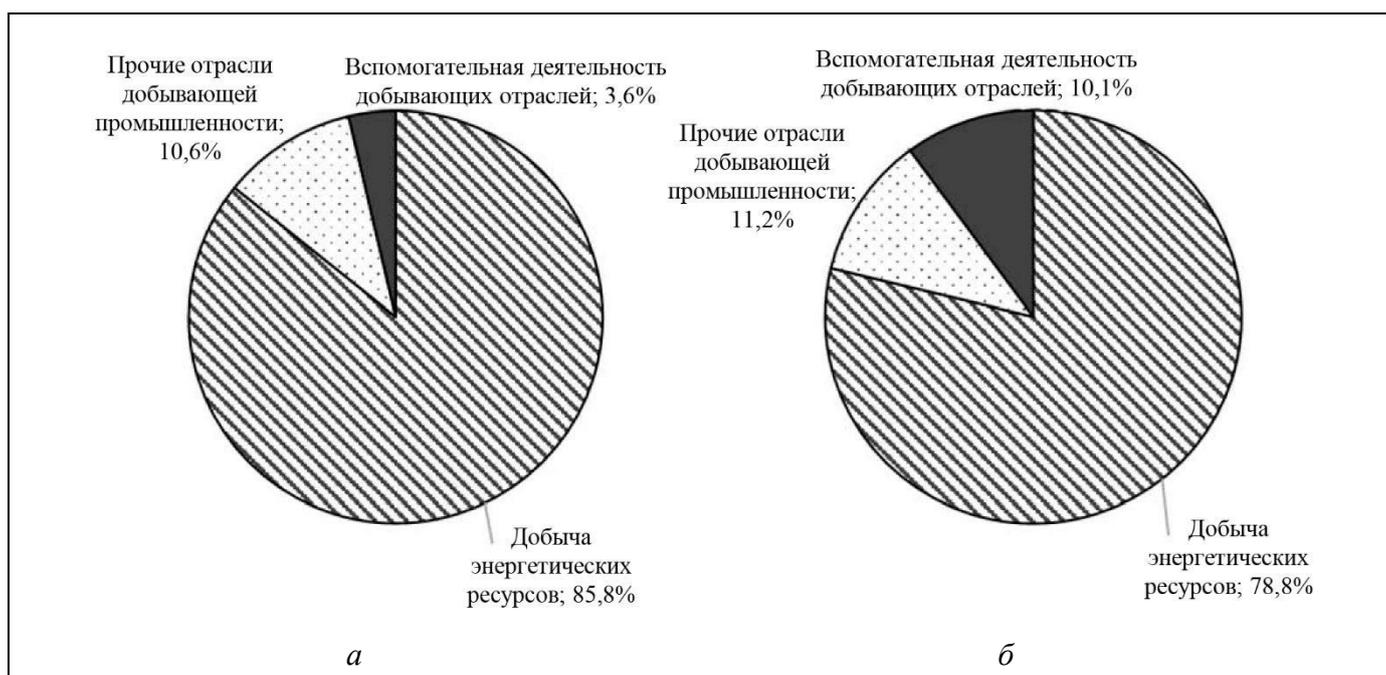


Рис. 1. Структура валовой продукции комплекса добывающих отраслей России: а – 2000 г., б – 2018 г.

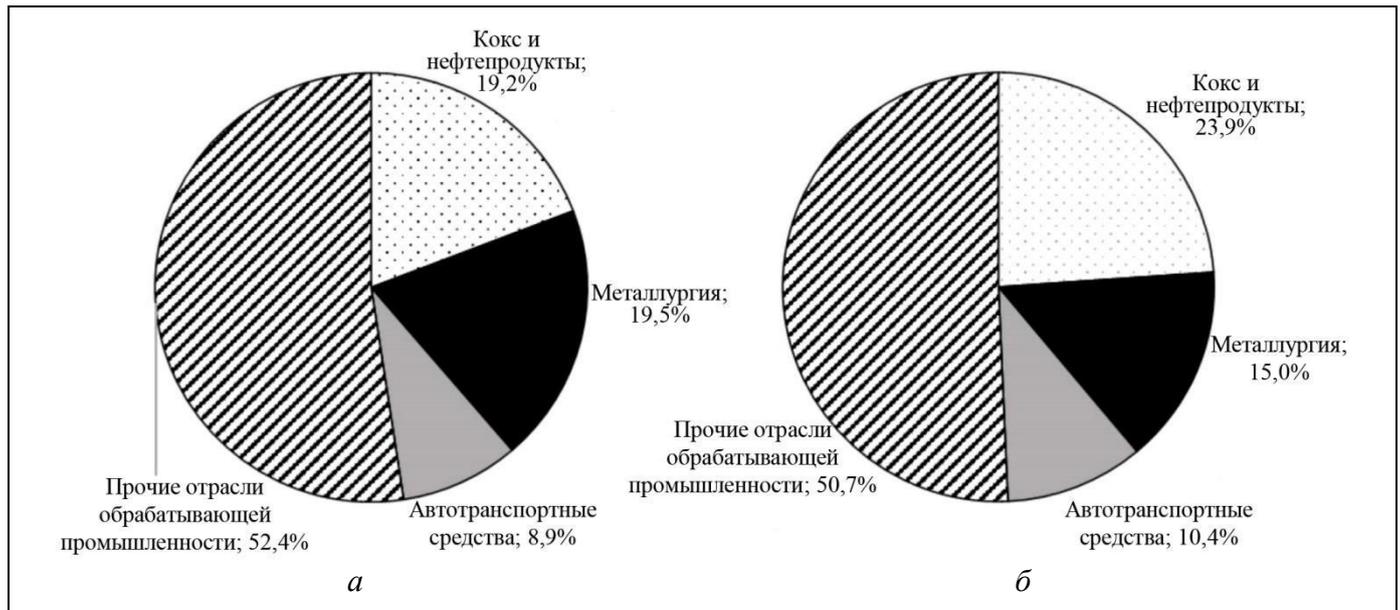


Рис. 2. Структура валовой продукции обрабатывающей промышленности России: а – 2000 г., б – 2018 г.

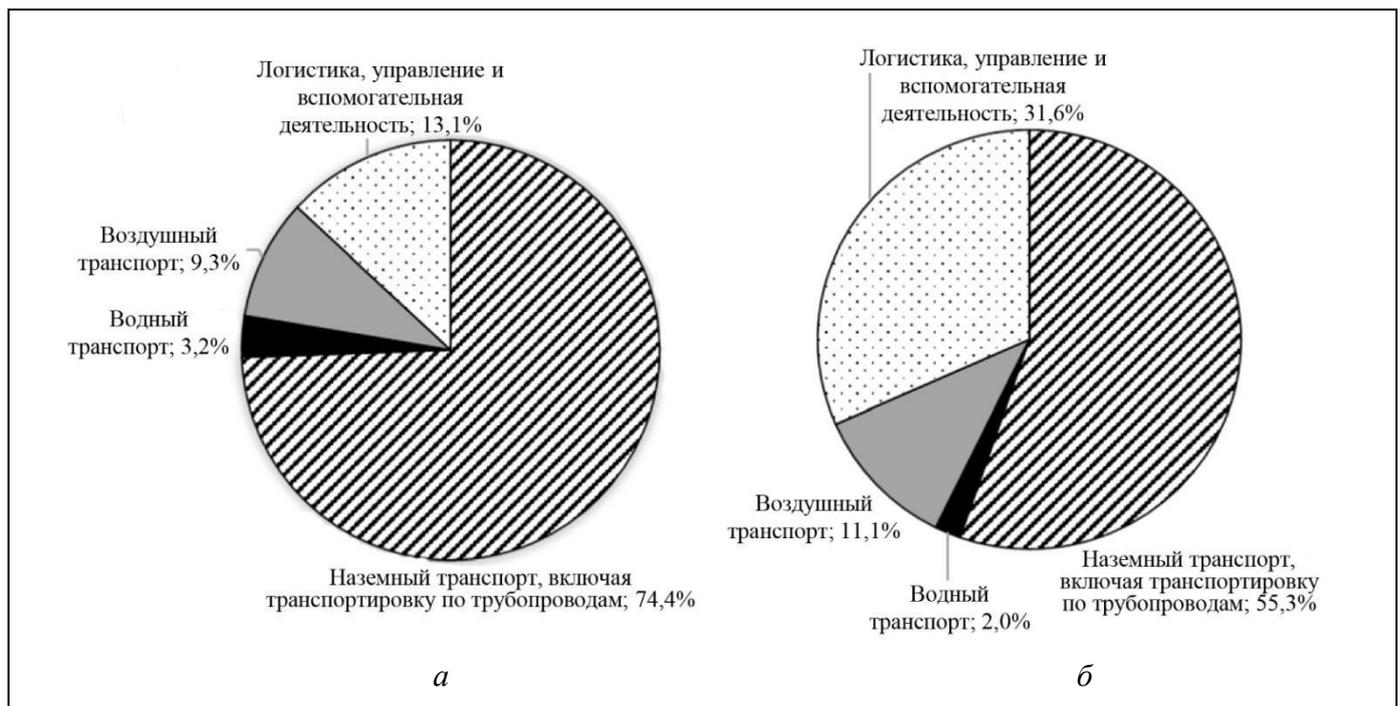


Рис. 3. Структура валовой продукции транспортного комплекса России: а – 2000 г., б – 2018 г.

Повысился также удельный вес авиационных перевозок, что связано с активным включением страны в глобальные цепочки и бурным развитием зарубежного туризма.

На уровне макроструктурных показателей «промышленность – услуги» существенных сдвигов не наблюдалось. Доля услуг оставалась практически неизменной в течение всего времени наблюдения на уровне 60,2–60,8 % в 2000–2018 гг. соответственно.

Во всех трех выделенных секторах особенно высокими темпами возрастал импорт продукции, происходило их включение в глобальные производственные цепочки. Внутриотраслевое потребление импортных товаров в добывающих отраслях выросло в 16 раз – с 50 млн долл. в 2000 г. до почти 800 млн долл. в 2018 г. Это во много раз больше, чем в целом увеличение импорта по экономике (в 5,5 раза). В то же время с учетом не только внутриотраслевого, но и межотраслевого, а также



конечного потребления импорт в добывающем комплексе повысился только в 4,5 раза – с 693 млн долл. в 2000 г. до 3,1 млрд долл. в 2018 г.

В транспортном комплексе России импорт вырос в 6,5 раз – с 4,8 млрд долл. в 2000 г. до 31,5 млрд долл. в 2018 г. В результате его доля в общем объеме импорта увеличилась с 7,5 % до 9,0 %. Такая высокая импортная зависимость негативно отразилась на транспортной отрасли в период пандемии COVID-19 и последовавшей затем экономической стагнации.

Расчеты по формуле (5) показали, что включение России в трансграничные производственные цепочки в добывающих, обрабатывающих и транспортных отраслях сопоставимо с другими странами, обладающими значительными территориями, объемами добычи полезных ископаемых и разветвленными сетями транспортных коммуникаций (США, Австралия) (табл. 2).

В каких-то отраслях Россия опережает эти страны, в других – уступает. Но все три страны – Россия, США и Австралия – существенно отстают от Китая по межстрановой производственной кооперации, что объясняется его более высокой степенью интеграции в глобальную экономику в качестве мировой фабрики и главного экспортера промышленных товаров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последнее десятилетие мировые межотраслевые балансы активно создаются международными организациями. В условиях глобализации, межстранового разделения труда, активизации внеш-

ней торговли они востребованы правительствами и исследователями как инструмент экономического анализа для выработки и оценки эффективности экономических и политических решений. Они могут быть использованы для решения разнообразных задач управления социально-экономическим развитием и производством, проведения имитационных расчетов, оценки чувствительности экономических систем, отраслей, комплексов с целью выработки оптимальных управленческих решений на уровне государства и крупных компаний, работающих на мировых рынках.

Предложенная в статье модель позволила провести расчеты по оценке места и роли добывающего и транспортного комплексов России и показать важность управления ими в целях повышения эффективности экономики в целом. С привлечением инструментария межотраслевых балансов и выделением в них потоков импортной продукции в составе промежуточного и конечного потребления получен вывод о том, что с интенсификацией включения добывающих отраслей и транспорта России в международные связи возрастала их роль в качестве драйвера экономики страны. Развитие обоих народнохозяйственных комплексов в течение почти 20 лет (2000–2018 гг.) происходило опережающими темпами.

Расчеты показали, что и в добыче полезных ископаемых, и на транспорте России в 2000–2018 гг. происходили крупные структурные сдвиги, связанные главным образом с научно-техническим прогрессом. Из подотраслей обоих комплексов наиболее высокими темпами роста выделялись расходы на управление, логистику и вспомогательные виды деятельности.

Таблица 2

Доля импорта в составе экспорта России и ряда стран в 2018 г., %

Отрасли	Россия	США	Австралия	Китай
Добыча энергетических ресурсов	3,9	11,4	7,1	12,5
Добыча прочих полезных ископаемых	7,0	9,0	9,8	15,7
Вспомогательная деятельность в добывающих отраслях	12,5	6,8	8,5	16,3
Кокс и нефтепродукты	5,9	28,4	24,2	39,6
Металлургия	11,8	20,9	17,3	17,8
Автотранспортные средства	34,8	27,2	30,2	14,3
Наземный транспорт, вкл. транспортировку по трубопроводам	7,7	5,9	14,0	9,6
Водный транспорт	12,4	7,5	10,6	20,1
Воздушный транспорт	14,3	5,2	20,6	16,2
Логистика, управление, вспомогательная деятельность	10,5	5,9	5,9	14,5
В целом по экономике	8,7	10,1	10,8	17,1

На основании проведенного исследования можно сделать общий вывод, что добывающий и транспортный комплексы России в периоде до пандемии COVID-19 имели устойчивые и в целом оптимальные стратегии развития и вовлечения в глобальные цепочки.

Перспективными направлениями совершенствования и расширения областей применения предложенной в статье модели могут стать задачи управления:

– импортозамещением в Российской Федерации на отраслевом уровне путем включения в модель блока ограничений по импорту, критерия эффективности и алгоритма поиска оптимальной стратегии в рамках введенных ограничений;

– выбросами парниковых газов на уровне отраслей и производств путем введения в модель экологического блока;

– налогами и прибылью с выделением их в модели в виде отдельной позиции в добавленной стоимости и с применением методики, предложенной, например, в работе [17].

Построенная модель может включать ценообразование и динамику, применяться для целей управления, прогнозирования и планирования экономики и отраслей. Также она может быть положена в основу решения целых классов имитационных и оптимизационных задач управления экономикой России в условиях санкционных и иных ограничений, в частности в рамках теории управления многоресурсными саморазвивающимися системами, оптимизации технологического ядра с целевой функцией продуктивности, оптимального планирования и других, описанных в работах [18–20].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Будущее* мировой экономики: Доклад группы экспертов ООН во главе с В. Леонтьевым / Перевод с англ. под общей ред. А.И. Шапиро. – М.: Международные отношения, 1979. – 216 с. [*The future of the world economy: A United Nations Study / by W. Leontief, A.P. Carter, P. Petri, and J.J. Stern. – New York: Oxford University Press, 1977. – 110 p.*]
2. *Handbook on Supply and Use Tables and Input-Output Tables with Extensions and Applications.* – New York: United Nations, 2018. – 712 p.
3. *Guide to Measuring Global Production.* – New York and Geneva: United Nations, 2015. – 159 p.
4. *Koopman, R., Wang, Z., Wei, S. Tracing Value-Added and Double Counting in Gross Exports // American Economic Review.* – 2014. – Vol. 104, no. 2. – P. 459–94.
5. *Guilhoto, J.M., Webb, C., Yamano, N. Guide to OECD TiVA Indicators, 2021 edition.* – Paris: OECD, 2022. – 55 p.
6. *Baldwin, R., Freeman, R., Theodorakopoulos, A. Horses for Courses: Measuring Foreign Supply Chain Exposure. NBER Working Paper no. 30 525.* – Cambridge: NBER, 2022. – 60 p.
7. *Miroudot, S., Ye, M. Decomposing Value Added in Gross Exports from a Country and Bilateral Perspective.* – Rochester: SSRN, 2022. – 11 p.
8. *Arto, I., Dietzenbacher, E., Rueda-Cantuche, J.M. Measuring Bilateral Trade in Value Added Terms. Technical report.* – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2019. – 30 p.
9. *Kumar, R. Global Value Chains and Structural Transformation: Evidence from the Developing World // Structural Change and Economic Dynamics.* – 2023. – Vol. 66. – P. 285–299.
10. *Mendoza, M.A.M. An Analysis of Economic Growth Using Input-Output Tables // Journal of Economic Structures.* – 2023. – Vol. 12. – Art. no. 21.
11. *Timmer, M.P., Dietzenbacher, E., Los, B., et al. An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: the Case of Global Automotive Production // Review of International Economics.* – 2015. – Vol. 23, no. 3. – P. 575–605.
12. *Shrestha, N., Sato, K. Global and Regional Shock Transmission: An Asian Perspective // Journal of Economic Structures.* – 2021. – Vol. 10. – Art. no. 27.
13. *Takeda, K., Inaba, K. The Damage and Reconstruction of the Kumamoto Earthquake: An Analysis on the Impact of Changes in Expenditures with Multi-regional Input-Output Table for Kumamoto Prefecture // Journal of Economic Structures.* – 2022. – Vol. 11. – Art. no. 20.
14. *Kokaji, A., Goto, A. An Analysis of Economic Losses from Cyberattacks: Based on Input-Output Model and Production Function // Journal of Economic Structures.* – 2022. – Vol. 11. – Art. no. 34.
15. *Temel, T., Phumpiu, P. Pathways to Recovery from COVID-19: Characterizing Input-Output Linkages of a Targeted Sector // Journal of Economic Structures.* – 2021. – Vol. 10. – Art. no. 29.
16. *Borin, A., Mancini, M. Measuring What Matters in Global Value Chains and Value-Added Trade. Policy Research working paper no. WPS 8804.* – Washington, D.C.: World Bank Group, 2019. – 64 p.
17. *Бурков В.Н., Буркова И.В., Щепкин А.В. Условие прибыльности в модели Леонтьева // Управление большими системами.* – 2021. – Вып. 91. – С. 78–95. [*Burkov, V.N., Burkova, I.V., Shchepkin, A.V. Profitability Condition in the Leontief Model. – Large-Scale Systems Control.* – 2021. – Iss. 91. – P. 78–95. (In Russian)]
18. *Гусев В.Б. Экстремальные характеристики модели технологического ядра крупномасштабной экономической системы // Проблемы управления.* – 2021. – № 6. – С. 30–39. [*Gusev, V.B. The Technological Core Model of a Large-scale Economic System: Optimal Characteristics // Control Sciences.* – 2021. – No. 6. – P. 25–33.]
19. *Гусев В.Б. Равновесные модели многоресурсных саморазвивающихся систем // Проблемы управления.* – 2007. – № 3. – С. 18–25. [*Gusev, V.B. Equilibrium Models of Multi-Resource Self-Developing Systems // Control Sciences.* – 2007. – No. 3. – P. 18–25. (In Russian)]
20. *Гусев В.Б. Бинарная модель управления реструктуризацией технологического ядра экономики // Проблемы*



управления. – 2022. – № 6. – С 14–25. [Gusev, V.B. A Strategic Management Model for Restructuring the Technological Core of an economy // Control Sciences. – 2022. – No. 6. – P. 11–20.]

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

*Поступила в редакцию 09.01.2024,
после доработки 19.02.2024.
Принята к публикации 21.02.2024.*

Варнавский Владимир Гаврилович – д-р экон. наук,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН,
г. Москва,
✉ varnavsky@imemo.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1772-1800>

© 2024 г. Варнавский В. Г.



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

STRUCTURAL SHIFTS AND THE PARTICIPATION OF RUSSIAN INDUSTRIES IN GLOBAL VALUE CHAINS: AN ANALYSIS USING WORLD INPUT-OUTPUT TABLES

V. G. Varnavskii

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

✉ varnavsky@imemo.ru

Abstract. Russia actively participates in the international division of labor, global trade, and cross-border value chains. Foreign trade represents a significant share of its gross domestic product. In recent years, the Russian government has been strengthening its public policy to carry out infrastructure and production projects as well as use tax, credit, budgetary, and other policy measures to stimulate economic growth. Hence, there is a growing demand for economic research using mathematical models for managing the economy and industries based on world input-output models with foreign trade blocks highlighted therein. This paper introduces into scientific circulation the world input-output tables created in recent decades, including their brief overview. We propose a model for the Russian economy based on Leontief's Input-Output tables in which each industry's supplies of products to other industries are decomposed into domestic output and import flows. The model is verified using an example of the mining, manufacturing, and transport complexes of Russia. Their output dynamics and structural shifts are estimated for the period 2000–2018 considering the foreign trade component. Special attention is paid to the participation of these complexes in Global Value Chains (GVCs). We present and analyze formulas for determining the participation of industries in GVCs. According to the calculations, Russia's involvement in mining, manufacturing, and transport GVCs is comparable with other countries having large territories, mineral reserves, and transport communications, such as the United States and Australia. Some promising lines to improve the model are described.

Keywords: world input-output tables, industries management, mining, manufacturing, transport, foreign trade, structural shifts, Global Value Chains.

КОМПЛЕКСНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА И МЕХАНИЗМ ФИНАНСИРОВАНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ

А. Ю. Вега*, А. К. Еналеев**

*Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва,

**Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

*✉ Vega.AY@rea.ru, **✉ anverena@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены некоторые аспекты планирования и управления адаптационными мероприятиями, направленными на снижение последствий негативных изменений климата на инфраструктурные объекты экономики. Проведен анализ проблем оценки риска неблагоприятного воздействия изменения климата на объекты в условиях значительной неопределенности. Рассмотрена структура комплексного оценивания объектов с использованием карт прогнозов климата и оценок уязвимости объектов. Предложен подход к формированию портфеля инфраструктурных объектов. Отбор объектов предложено проводить в два этапа. На первом этапе для формирования предварительного портфеля объектов применяется метод комплексного оценивания. На втором этапе предложено применять метод, основанный на последовательном выделении инвестиционного ресурса в порядке убывания оценки удельного риска. При реализации второго этапа ограниченность инвестиционного фонда определяет окончательный портфель объектов для проведения адаптационных мероприятий. Представлена модель организационного механизма финансирования и стимулирования проведения адаптационных мероприятий на объекте при неполной информированности управляющего органа. Предложен механизм стимулирования адаптационных работ, обеспечивающий сообщение управляющему органу достоверной информации от объектов. Показано, что предложенный механизм является оптимальным в условиях неполной информированности управляющего органа.

Ключевые слова: изменения климата, адаптационные мероприятия, комплексная оценка риска, отбор инфраструктурных объектов, размещение инвестиционного фонда, затраты, механизм финансирования, стимулирование.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка проектов создания значимых инфраструктурных объектов (ИО), например объектов промышленной, энергетической, транспортной инфраструктуры, с длительными сроками строительства и эксплуатации, требует анализа и прогноза их жизненных циклов. Прогноз жизненного цикла от начала строительства до окончания функционирования рассматриваемого объекта включает прогноз внешних воздействий на объект еще на этапе проектирования. Одним из важнейших факторов внешнего воздействия является влия-

ние на ход строительства и функционирования объекта изменений климата (ИК). Следовательно, при проектировании строительства и в процессе функционирования объектов необходимо заранее предусмотреть адаптационные меры по отношению к прогнозируемым негативным воздействиям ИК.

Исходной базой для планирования и проведения адаптационных мероприятий являются прогнозы ИК. Результаты прогноза климатических изменений на перспективу до 2050–2059 гг. и 2090–2099 гг. на территории РФ и их влияния на природную среду и хозяйственные объекты пред-



ставлены в докладе [1]. В докладе [2] даются описание происходящих и ожидаемых ИК, воздействия ИК на природную среду, население и экономику РФ и последствия ИК, а также основные направления адаптации к ним.

В докладе Росгидромета [3] изложены результаты исследований и разработок в области научно-методического обоснования отраслевых и региональных стратегий адаптации к текущим и ожидаемым ИК. В этом докладе проводится системный анализ проблемы адаптации экономики к ИК, рассматриваются основные понятия, цели и задачи адаптации, обозначаются пути и сложности достижения этих целей.

Основополагающим документом в рассматриваемой области является стандарт «Адаптация к изменениям климата» [4]. Он определяет области применения, термины и определения, общие принципы адаптации ИО к ИК, включая требования к организации планирования и реализации процессов адаптации. В документе приведены ссылки на международные стандарты и публикации, на основе которых он сформирован.

В статье [5] дан анализ вызовов и окон возможностей в области адаптации к ИК, отмечена необходимость развития системы климатического страхования. Обзор отечественных публикаций по описанию рисков ИК и их влиянию на устойчивое развитие социально-экономической сферы страны представлен в публикации [6].

В отраслевом разрезе проблема адаптации к ИК рассмотрена в следующих публикациях. В статье [7] изложены проблемы, связанные с влиянием ИК на объекты нефтегазовой отрасли, обсуждаются подходы к созданию системы управления рисками и адаптации к ИК. В работе [8] приведен анализ увеличения затрат на устранение экологических последствий при отсутствии надлежащих предупредительных мер. В публикации [9] рассматриваются варианты воздействия климатических факторов на объекты строительства, наземного транспорта и топливно-энергетического комплекса, описываются направления применения адаптационных мероприятий. Утверждается, что ИК приводят не только к рискам, но и к новым возможностям, особенно с развитием альтернативной энергетики [10]. В докладе [11] обсуждаются вопросы оценки риска, кредитования и страхования при строительстве объектов с учетом адаптационных мероприятий.

Проблемы оценки риска ИК, планирования и реализации адаптационных мер обсуждаются в обширном количестве зарубежных публикаций. Классификация исследований по этим проблемам

и основные результаты представлены в нескольких обзорах. Наиболее полно освещают эту проблематику статьи [12–14], посвященные рассмотрению железнодорожной отрасли. Эти обзоры содержат ссылки на основные публикации по рассматриваемой тематике. Следует отметить, что проблемы по адаптации железнодорожной инфраструктуры к ИК свойственны и инфраструктуре других отраслей экономики. Поэтому ограничимся здесь ссылками на эти обзоры.

Обзор проблем, возникающих при оценке последствий негативного влияния и возможностей проведения адаптационных мероприятий для объектов железнодорожной инфраструктуры, представлен в работе [12]. Здесь рассмотрена связь влияния различных климатических факторов и их возможных воздействий на объекты инфраструктуры, даны примеры конкретных мер по адаптации и представлен анализ проблем при оценке рисков ИК для железнодорожной инфраструктуры. В статье [13] описаны особенности эксплуатации и строительные меры по обеспечению климатически устойчивой железнодорожной инфраструктуры. В публикации [14] рассматриваются требования к стратегии адаптационных мер к ИК для железнодорожного транспорта.

В Великобритании по заказу основных заинтересованных представителей железнодорожного транспорта был составлен отчет «Завтрашняя железная дорога и адаптация к изменению климата» (TRaCCA) [15], в котором отражено: нынешнее понимание погодных опасностей на железных дорогах; то, как они могут измениться в будущем; текущие меры по обеспечению устойчивости и адаптации к ИК; возможности для дальнейших действий по обеспечению устойчивости и адаптации; требования к дальнейшим структурам и инструментам для поддержки экономически эффективных действий.

Системная основа для национальной оценки климатических рисков для инфраструктуры в разрезе различных стран дана в работе [16].

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает, что ИО взаимозависимы и требуют комплексного реагирования на климатические воздействия. Для понимания выгод от адаптации необходима информация об исходных условиях и адекватная оценка риска. Отмечается [12], что традиционные методы оценки риска не применимы в условиях глубокой неопределенности условий и неточности климатических прогнозов на длительную перспективу. Отмеченные неопределенности приводят к тому, что при оценке характеристик риска климатических опасностей и воздействий на

объекты используются ранговые показатели потенциального риска, которые могут принимать, например такие значения, как «низкий», «умеренный», «высокий», «очень высокий» [7, 17].

В настоящей статье проводится анализ проблем оценки риска в условиях неопределенности и возможных подходов к их решению. Недостаточно исследованным остается вопрос об оценке риска, когда на объект действуют одновременно несколько видов опасностей. В статье предлагается применять методологию комплексного оценивания для оценки влияния нескольких опасностей и учета степени их воздействия на разные ИО и на ее основе формировать из большого количества ИО портфель наиболее важных объектов для осуществления адаптационных мероприятий. Описание общих принципов и примеры применения методологии комплексного оценивания для оценки альтернативных видов топлива на железнодорожном транспорте дано в статье [18].

В стандарте [4] обозначено требование обеспечения достоверных исходных данных для планирования адаптационных мероприятий. Более точные и достоверные данные, как правило, сосредоточены у персонала объектов, для которых необходимо планировать инвестиции и объемы работ по реализации адаптационных мероприятий. Запросы этих данных со стороны планирующих органов могут приводить к намеренному искажению сообщаемых данных из-за стремления ИО получить больший размер средств. В статье предложен механизм стимулирования адаптационных работ, побуждающий сообщение в планирующий орган достоверных данных от персонала ИО.

1. ПРОБЛЕМЫ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПОДХОДЫ ПО АДАПТАЦИИ ИНФРАСТРУКТУРЫ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

При строительстве и функционировании ИО принятие решений по адаптации к ИК основывается на прогнозах ИК и оценках риска их негативно-го влияния. Исходя из классического описания риска применительно к ИК [12], под риском негативного влияния ИК обычно понимают произведение вероятности проявления опасностей ИК на величину ожидаемого ущерба, наносимого этими опасностями. Однако, как обосновывается в работах [12, 16] и др. (ссылки на них указаны в обзоре [12]), использование определения риска в классическом понимании встречает трудности и допустимо при весьма ограниченных предположениях.

Поскольку реализация адаптационных решений зачастую требует значительных инвестиций и рассчитана на длительную перспективу, требуются долгосрочные прогнозы ИК. Последние, однако, не обладают приемлемой точностью и надежностью.

Изменения климата порождают следующую цепочку факторов, влияющих на ИО: «факторы ИК – опасности – воздействия – уязвимости – последствия» (рис. 1). Каждый из этих факторов может иметь разную интенсивность и описывается условной вероятностью проявления в зависимости от предыдущих факторов в рассматриваемой цепочке. К сожалению, значения параметров интен-

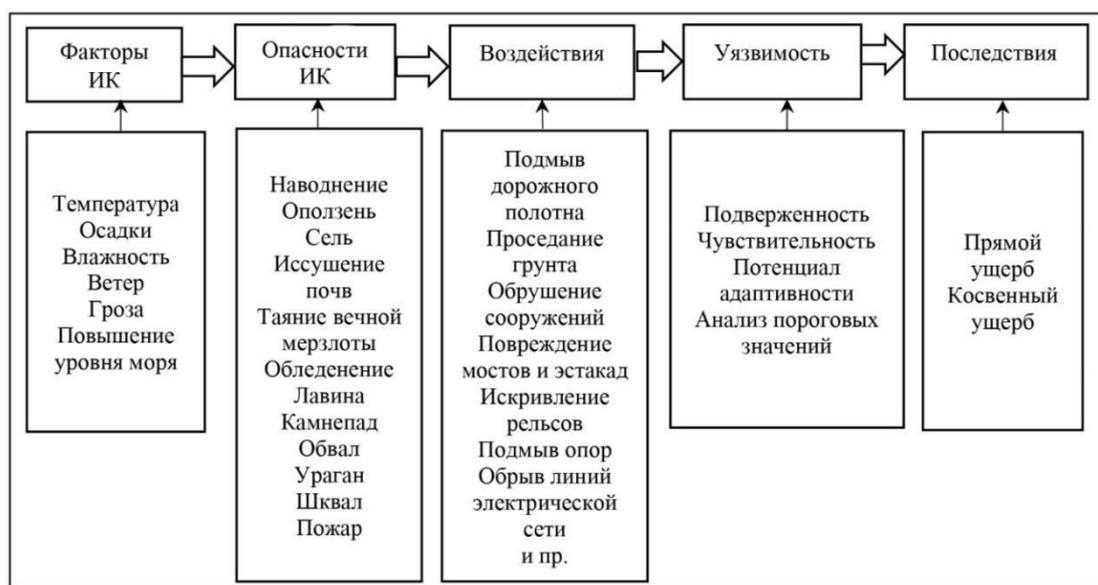


Рис. 1. Факторы негативного влияния ИК при оценке риска ИО



сивностей и вероятности проявления этих факторов сложно оценить в силу отсутствия достаточно полной статистики метеорологического, гидрологического, климатического мониторинга и, главное, существенной неопределенности долгосрочных прогнозов. Кроме того, взаимосвязь факторов носит неопределенный и неустойчивый характер.

Влияние указанных факторов на ИО зависит от вида объектов, их стоимости и сроков службы, используемых стандартов проектирования и строительства. Инфраструктурные объекты имеют разную степень уязвимости в зависимости от их конструктивных особенностей, географического расположения и сроков эксплуатации.

Неопределенность прогнозов ИК и сценариев реализации указанной цепочки факторов порождает ряд принципиальных проблем при построении плана мероприятий по адаптации к неблагоприятному влиянию ИК.

Первая проблема заключается в неопределенности интенсивности и отсутствия надежных оценок вероятностей проявления опасностей в разных регионах и на территориях расположения объектов. Возникает необходимость учитывать географическое распределение факторов на территории страны с учетом ландшафта и природно-климатических особенностей ее регионов.

Вторая проблема заключается в следующем. Предположим, что определены вероятность и интенсивность опасностей ИК. Требуется оценить степень и вероятность воздействия на ИО в рассматриваемом регионе при возникновении каждого вида опасности. Дело в том, что проявление опасности не всегда приводит к воздействию на рассматриваемые объекты в силу их защищенного расположения на местности. Или, наоборот, небольшое проявление опасности может оказать сильное воздействие (например, даже при умеренном дожде расположение объекта в низменной местности или в пойме реки может приводить к подтоплениям).

Третья проблема связана с оценкой уязвимости ИО. Для формирования достоверной оценки уязвимости объекта при осуществлении разного вида воздействий и возникновении опасностей ИК необходимо проводить исследования и диагностику объекта в полевых условиях. В большинстве случаев это дорогостоящая и длительная процедура. Для вновь строящихся или проектируемых объектов оценку уязвимости необходимо проводить еще на стадии разработки проекта строительства.

Например, для железнодорожной отрасли помимо климатического прогноза необходимо учитывать эволюцию железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава, переход на альтернативные виды топлива, изменение спроса на перевозки, увеличение нагрузки на железнодорожное полотно с увеличением объема перевозок, влияние высокоскоростного движения и др.

Четвертая проблема относится к оценке последствий от воздействия опасностей ИК на ИО. В зависимости от интенсивности воздействий и уязвимости объекта последствия могут включать:

- прямой ущерб, который определяется непосредственно потерей полезных свойств объекта и затратами на его восстановление;
- косвенный ущерб, определяемый системными потерями от прекращения или ограничения функционирования объекта, т. е. влиянием на функционирование связанных с ним объектов и систем.

Существуют три основных составляющих экономических издержек инфраструктуры, связанных с изменением климата:

- стоимость ущерба от прямого воздействия на ИО, которая привела к разрушению объекта и нарушению его функций;
- стоимость потерь потребителей услуг, связанных с нарушением функций объекта;
- стоимость адаптационных мероприятий.

Оценка степени зависимости таких последствий от прогнозируемых природных воздействий затруднена. Разрушение объектов, таких, например, как мосты, приводит к долгосрочному выводу их из строя и высоким затратам на восстановление. Необходимо учитывать критичность отказа некоторых ИО, который может носить системный характер и оказывать существенное влияние на функционирование государства, экономики, жизнь и здоровье населения. При этом важно понимание системных проектов и действий, оказывающих влияние на зависимости внутри и вне региона. Что касается дорожной инфраструктуры, следует учитывать также наличие или отсутствие обходных путей движения транспорта при разрушении дороги.

Следует отметить, что существует еще зависимость между различными видами опасностей, имеющая нелинейный характер. Совместное действие двух и более опасностей может создавать кумулятивный эффект, последствия которого трудно предсказуемы.

Перечисленные проблемы в оценке риска указывают на сложность планирования адаптационных решений.

При реализации проектов и мероприятий по адаптации ИО к ИК существенны ограничения инвестиций. Так как количество ИО, подверженных воздействию ИК, измеряется сотнями, если не тысячами, то необходимо определить перечень первоочередных объектов и уровень реализации адаптационных мероприятий.

Отмеченные неопределенности и ограничения практически приводят к невозможности оперативного получения надежных оценок риска и, следовательно, к невозможности принятия наилучших решений в условиях неполноты информации. В этих условиях приходится искать «ограниченно рациональные» решения, которые приближенно, но достаточно адекватно и эффективно, могут служить заменой оптимальным адаптационным решениям для идеального случая, когда имеются точные прогнозы ИК и полная информация о степени воздействия, уязвимости и ущербе для рассматриваемых объектов.

Сложность проблемы точной оценки риска в условиях ненадежных климатических прогнозов и неполной информированности о степени воздействия ИК и уязвимости объектов заставляет искать решения путем разбиения этой проблемы на ряд задач:

- определить регионы, подверженные наиболее опасным факторам ИК;
- сформировать список наиболее уязвимых ИО в этих регионах;
- описать сценарии ИК в местах расположения этих ИО;
- оценить степень воздействия ИК на ИО для рассматриваемых сценариев, включая величину ущерба (прямого и косвенного), с учетом стоимости восстановления или строительства объекта;
- оценить потребность в инвестициях на адаптационные мероприятия, отобрать ИО, на которых возможно максимальное снижение риска от ИК;
- организовать сбор уточненной информации с мест о степени воздействия ИК и уязвимости ИО и обеспечить достоверность и неманипулируемость информации;
- разработать проекты и планы реализации адаптационных мероприятий.

Для решения перечисленных задач требуется провести комплексные разработки, включающие организационные, исследовательские и проектные мероприятия. Для успешной реализации этих мероприятий может оказаться полезным использование методологии организационного управления [19, 20].

В настоящей статье рассмотрим три разрабатываемых в статье в рамках этой методологии и применимых при решении перечисленных выше задач метода:

- определения списка ИО для применения первоочередных адаптационных мероприятий;
- распределения инвестиций между ИО и финансирования адаптационных мероприятий в зависимости от объемов выполняемых работ;
- обеспечения неманипулируемости информации, получаемой от управленческого персонала объектов.

Далее предлагается применять метод комплексного оценивания для определения объектов с наибольшим риском, основанный на использовании ранговых показателей [7, 17, 18] и применимый в условиях неполноты и неточности исходных данных.

На рис. 2 представлена схема, описывающая порядок выполнения действий в предлагаемой технологии отбора ИО, инвестирования, планирования и стимулирования адаптационных мероприятий, а также место рассматриваемых в статье методов в этой технологии. Блоки с номерами 1–4 представляют предварительный отбор ИО с применением метода комплексного оценивания. Этот метод описан в § 2. Блоки 5 и 6 обозначают выполнение работ по начальному обследованию ИО из предварительно сформированного портфеля при реализации блоков 1–4. Описание этих работ выходит за рамки данной статьи, поскольку специфично для каждого ИО и требует анализа его особенностей. Результатом этого обследования являются приближенные численные оценки риска и потребностей в инвестициях на адаптационные работы. Предполагается, что количество объектов в предварительном портфеле (ПП) гораздо меньше числа исходных ИО. Результатом выполнения блоков 7 и 8 является формирование результирующего портфеля (РП), в котором количество ИО может быть значительно меньше количества ИО в ПП. Описание блоков 7 и 8 дается в § 3.

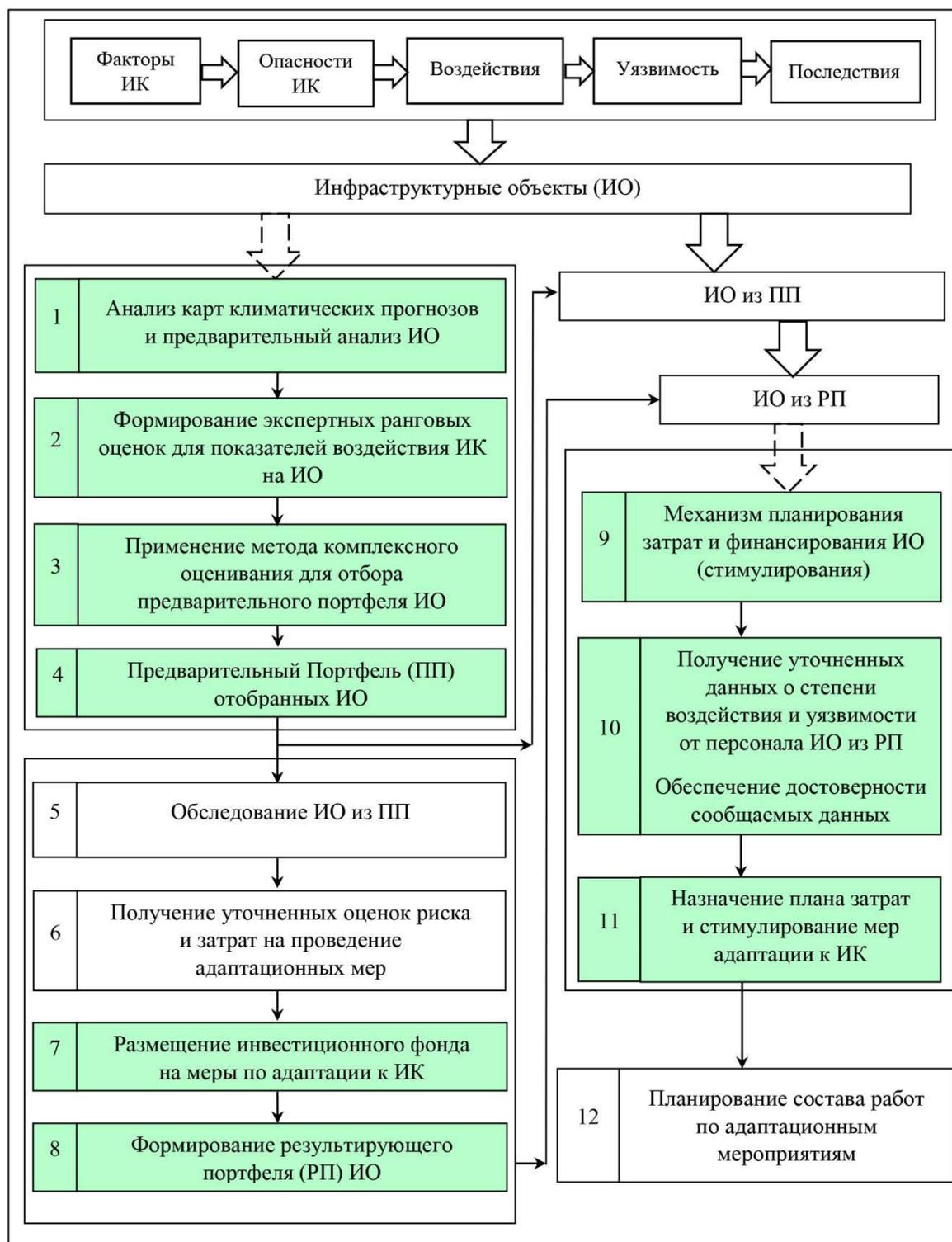


Рис. 2. Технология отбора ИО для проведения адаптационных мероприятий и механизм их инвестирования

Блоки 9–11 обозначают построение механизма планирования показателя, характеризующего объем адаптационных работ, и выбор функции стимулирования персонала ИО. При выборе механизма планирования и функции стимулирования ставится задача побудить персонал ИО сообщать в управляющий орган, осуществляющий управление вы-

полнением адаптационных мероприятий, достоверные данные о параметрах, характеризующих степени воздействия опасностей ИК на ИО и уязвимости объекта. Предполагается, что персонал ИО имеет более содержательные и точные данные о своем объекте, в отличие от управляющего органа. Описание блоков 9–11 приводится в § 3. При-

мом, что данные блоков 9–11 поступают на вход блока 12, в котором осуществляется детальное планирование адаптационных работ на ИО. Содержание этого блока опирается на специфику конкретного ИО и в статье не рассматривается.

2. ПОДДЕРЖКА РЕШЕНИЙ ПО ОЦЕНКЕ И ОТБОРУ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Пусть на заданной территории страны расположено большое число ИО, которые, как предполагается, в различной степени подвержены влиянию ИК. Естественно принять, что не на всех объектах могут быть реализованы адаптационные мероприятия к ИК. Это связано как с возможной незначительностью воздействий и, соответственно, риска негативного влияния ИК на некоторых объектах, так и с ограниченностью инвестиционного фонда для проведения адаптационных мероприятий. Следовательно, требуется из множества заданных ИО отобрать те объекты, на которых будут проводиться адаптационные мероприятия. Отметим, что отбор следует проводить по мере уменьшения риска негативного влияния ИК. Оценка этого риска для каждого ИО – это, вообще говоря, трудоемкая и дорогостоящая процедура, требующая затратных исследований и диагностики объекта. Поэтому проведение этой процедуры в полном объеме для всех ИО практически невозможно. Кроме того, как обсуждалось в § 1, проведение этой процедуры не всегда возможно в силу неопределенностей различной природы. В этих условиях приходится применять подход, основанный на комбинации регулярных методов и экспертных оценок.

Выделим два этапа решения этой задачи. На первом этапе будем формировать расширенный перечень объектов-претендентов (портфель ПП) на реализацию адаптационных решений с использованием экспертных мнений для оценки риска.

На втором этапе будем предполагать, что можно сформировать достаточно адекватные численные оценки потребности инвестиций на проведение адаптационных мероприятий и оценки риска негативного влияния ИК для ИО, отобранных на первом этапе. Будем считать, что для ограниченного набора ИО, сформированного на первом этапе, получение таких оценок возможно. Этот этап требует проведения исследований и включает уточненную оценку рисков на основе углубленного аудита ИО, прогноза возможных последствий и ущерба от ИК на основе метеорологического и

гидрологического мониторинга, климатических прогнозов и прогнозирования степени уязвимости ИО с учетом их развития и амортизации.

Для оценки необходимости реализации сложных инфраструктурных проектов по поддержке адаптационных решений на первом этапе предлагается применять механизм комплексного оценивания [18]. Принципиальная схема формирования и реализации этого механизма предполагает следующую последовательность действий.

1. Сформировать по возможности исчерпывающий список ИО, на которых, возможно, потребуются реализовать проекты адаптационных мероприятий.

2. Определить набор факторов опасностей ИК, влияющих на риск неблагоприятных воздействий ИК на ИО.

3. Сформировать дерево свертки показателей, характеризующих факторы опасностей и ущерба от ИК для всех ИО. Исходные показатели ущерба и характеристики факторов опасностей должны соответствовать листьям дерева.

4. Для каждого показателя ущерба и фактора опасности ИК определить дискретные (ранговые) шкалы измерений. Непрерывные шкалы преобразуются (в соответствии с устанавливаемыми алгоритмами) в дискретные для обеспечения возможности сопоставления их с показателями, которые изначально измеряются в ранговых шкалах. Для ограничения размерности процедур оценивания число рангов рекомендуется выбирать равным трем или четырем.

5. Для каждой вершины дерева, построенного согласно п. 1, назначить матрицу попарной свертки показателей. Эти матрицы строятся следующим образом. Число строк матрицы соответствуют размерности дискретной шкалы первого показателя из пары, а число столбцов равно размерности дискретной шкалы второго показателя. Элементам матрицы назначаются значения свертки показателей, имеющих значения первого и второго показателей. Для каждого ИО определяются ранговые значения всех показателей.

6. При движении по дереву от «листьев к корню» с помощью матриц свертки вычисляются промежуточные и итоговые значения комплексной оценки.

Рассмотрим пример построения системы комплексного оценивания объектов для формирования предварительного списка ИО. Примем, что на ИО действуют следующие факторы опасностей: осадки, паводок, оползень, спływ, размыв, циклон. Именно эти факторы свойственны ИО, наиболее

подверженных влиянию климатических воздействий Дальневосточного и Южного федеральных округов России. Для каждого из перечисленных факторов опасностей установим шкалу из четырех рангов. Ранги для каждого ИО, с учетом места его расположения, устанавливаются исходя из анализа карт климатических прогнозов. На рис. 3 приведен пример таких карт, описывающих изменение сезонных сумм осадков.

Обратим внимание, что на картах интенсивность осадков распределена по 17-ти градациям, обозначенным разным цветом. Сопоставляя изменение сумм осадков (соответствующих изменению раскраски) в определенной точке на двух картах, можно сформировать шкалу рангов для фактора «осадки». На участке расположения ОИ по картам рассматривается изменение степени окраски карт. Все изменения по рассматриваемым факторам опасности ИК разделим на четыре ранга, соответствующие: критически неблагоприятным изменениям (ранг равен 4), сильным изменениям (ранг равен 3), слабым (ранг равен 2) и незначительным или отсутствующим (ранг равен 1). Такие действия выполняются для всех факторов опасностей. Таким образом, для каждого ИО по каждому из соответствующих ему факторов опасности присписывается некоторое значение ранга.

Опишем теперь формирование рангов ущерба от фактора опасности. Ранг ущерба зависит от степени воздействия фактора опасности, степени уязвимости ИО и последствий. Пример структуры формирования этого ранга представлен на рис. 4.

Формирование комплексной оценки предполагает при определении шкал и рангов показателей ИО использование мнений экспертов об уязвимо-

сти объектов и о возможном ущербе. В качестве экспертов предлагается пригласить представителей региональных организаций, ответственных за содержание работоспособности инфраструктуры.

В нижней части рис. 4 представлены исходные данные для формирования комплексной оценки ущерба для каждого фактора опасности, рассматриваемого ИО. Формирование этой оценки предполагает при определении шкал и рангов показателей ИО использование мнений экспертов о степени воздействия, об уязвимости и о возможных последствиях для рассматриваемого фактора опасности. В верхней части рис. 4 представлена схема преобразования исходных ранговых показателей в итоговый ранговый показатель ущерба с использованием матриц свертки для рассматриваемого фактора опасности.

Примем, что всем исходным показателям присваиваются ранговые шкалы из четырех рангов: 1, 2, 3, 4. Ранги, равные 4, соответствуют максимальной уязвимости, максимальному воздействию, критическим значениям прямых и косвенных последствий. Ранги, равные 3, соответствуют умеренным значениям этих характеристик, 2 – слабым значениям, 1 – нейтральной уязвимости (отсутствию значимой уязвимости, воздействия, прямого и косвенных последствий).

Использование и формирование комплексных оценок основано на измерении исходных данных в порядковых шкалах. В работах [7,17] предлагается обоснование и приводятся примеры порядковых (ранговых) шкал оценки рисков для опасностей факторов ИК, а в работах [1–3] приводятся климатические карты, описывающие параметры ИК в порядковых шкалах.

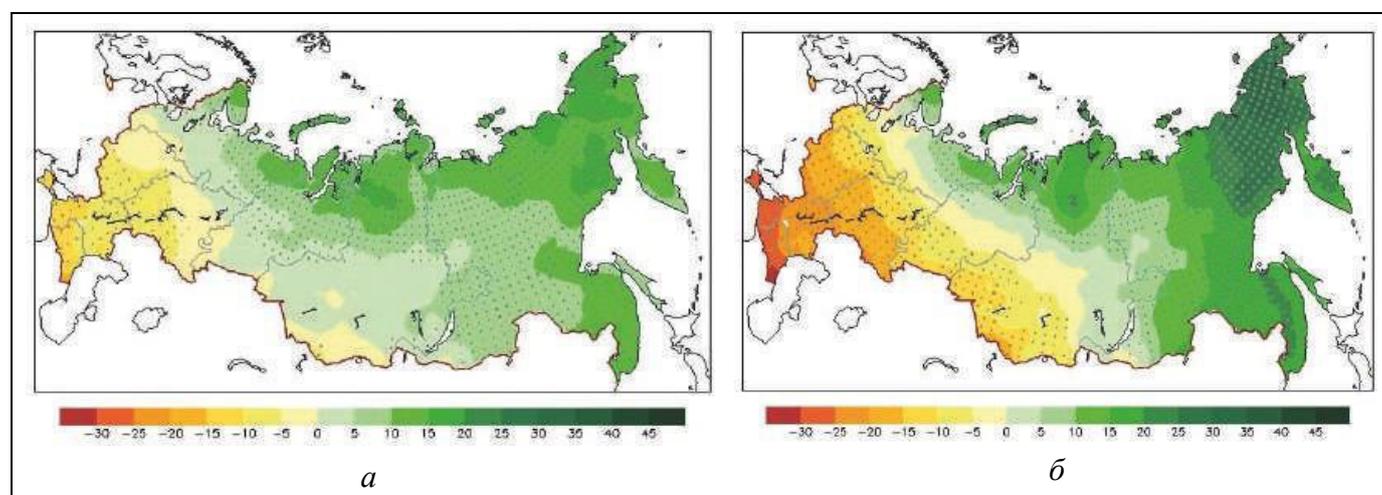


Рис. 3. Климатические карты [2], показывающие изменение средних сезонных (летних) сумм осадков (%) в период 2018–2100 гг. (а) по отношению к периоду 1995–2014 гг. (б)

Для оценки рангов и матриц свертки можно использовать подход и пример, рассмотренный в статье [18]. Обычно матрицы формируются на основе мнений экспертов. В докладе [21] исследуются проблемы формирования матрицы на основе обучающей выборки для системы комплексного оценивания. Здесь были предложены методы формирования матриц свертки показателей в составе системы комплексного оценивания на основе эмпирических данных. Опыт применения комплексного оценивания показал приемлемость использования следующей схемы. Сначала матрицы свертки формируются из здравых соображений и консультаций с потенциальными пользователями системы, а затем корректируются в процессе опытной эксплуатации.

Приведем пример заполнения матриц свертки для схемы, изображенной на рис. 4.

Исходные данные для вычисления рангов опасностей на основе шкалы воздействия чувствительности к климатическим факторам приведены в табл. 1.

На основе табл. 1 для каждой характеристики ущерба рассчитываются значения соответствующих рангов. После этого по схеме, изображенной на рис. 4, с использованием матрицы свертки определяются комплексные оценки ущерба. Для расчета по этой схеме необходимо заполнить элементы матрицы свертки. Сначала производится свертка рангов воздействия и уязвимости. В табл. 2 приведен вариант заполнения соответствующей матрицы.

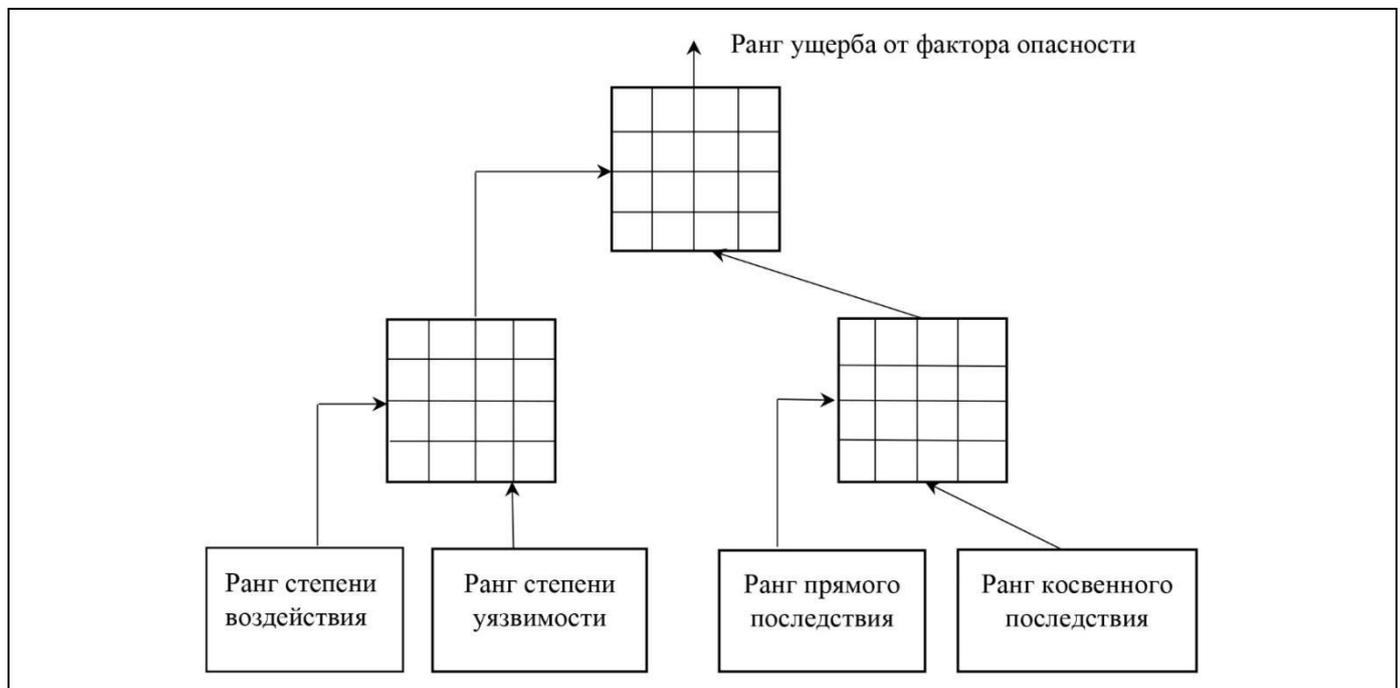


Рис. 4. Формирование ранга ущерба от фактора опасности

Таблица 1

Шкалы показателей для расчета рангов ущерба от фактора опасности

Значение ранга	Характеристики ущерба ИО			
	Воздействие	Уязвимость	Прямые последствия	Косвенные последствия
1	Незначительное	Отсутствует	Отсутствуют	Отсутствуют
2	Слабое	Слабая	Приемлемые	Приемлемые
3	Ограничивающее	Средняя	Затратные	Затратные
4	Блокирующее	Высокая	Критические	Критические

Таблица 2

Матрица свертки рангов воздействия и уязвимости

Воздействие	Уязвимость			
	1	1	1	2
	1	2	2	3
	1	2	3	4
	1	3	4	4

Таблица 3

Матрица свертки рангов прямых и косвенных последствий

Прямые последствия	Косвенные последствия			
	1	1	2	3
	1	2	3	3
	3	3	4	4
	4	4	4	4

При расчете свертки по этим матрицам выбирается строка со значением ранга первого показателя и столбец с рангом второго показателя. Так, например, в первой свертке для ранга воздействия, равного 3, и ранга уязвимости, равного 4, выбирается третья строка и четвертый столбец. На их пересечении получаем свертку показателей, равную 4. Полученная свертка показателей является первым входным показателем (определяет строку итоговой матрицы свертки, см. табл. 3) для определения ранга опасности объекта. Расчет оценки по показателям прямых и косвенных последствий является вторым входным показателем и определяет номер столбца итоговой матрицы свертки.

Таблица 4

Итоговая матрица определения ранга ущерба ИО по одному из факторов опасности

Ранг первой свертки	Ранг второй свертки			
	1	1	2	2
	1	2	3	3
	2	3	4	4
	3	4	4	4

Таким образом, иерархическая система матричных свертки, представленная на рис. 4, позволяет оценить ранги ущерба для выбранного факто-

ра опасности рассматриваемого ИО. Результаты этих расчетов являются входными показателями для определения итоговой комплексной оценки риска рассматриваемого ИО (рис. 5).

Матрицы свертки рангов для факторов опасностей и рангов ущербов, изображенные на рис. 5, формируются с использованием мнений экспертов аналогично матрицам, приведенным в табл. 1–4.

Полученные комплексные оценки для каждого рассматриваемого ИО по схеме, представленной на рис. 5, используются для отбора наиболее подверженных опасностям объектов. Упорядочим все рассматриваемые ИО в порядке уменьшения ранга комплексной оценки. Таким образом определяются группы ИО, подверженных разным степеням опасности. Объекты, имеющие ранг 4 и 3 комплексной оценки, подлежат дальнейшему обследованию и являются кандидатами на выделение инвестиционных средств для проведения адаптационных мероприятий (формируют ПП, см. рис 2.)

С более подробным примером комплексной оценки проектов, детализирующим все этапы ее формирования и числовые характеристики исходных, промежуточных и итоговых показателей, а также обоснования корректности использования порядковых шкал и интерпретации их значений, можно ознакомиться в работе [18].

3. ИНВЕСТИЦИИ НА АДАПТАЦИЮ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА И РАСХОДОВАНИЕ СРЕДСТВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АДАПТАЦИОННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

3.1. Механизм размещения инвестиций

Посредством рассмотренного выше метода оценки и предварительного отбора объектов формируется предварительный список объектов для дальнейшего изучения необходимости и возможности проведения адаптационных мероприятий. Для объектов из этого списка определяются более точные оценки риска и потребности в финансировании адаптационных мероприятий на основе дополнительного обследования объектов в местах их расположения. В случае невозможности проведения в полном объеме адаптационных мероприятий на всех объектах из предварительно оформленного списка в силу ограниченности инвестиционного фонда предлагается использовать процедуру размещения финансов на основе метода «оценка риска / затраты», идея которого взята из «жадного» алгоритма при решении задачи о ранце [22]. Суть этого метода заключается в последовательном выборе объектов и выделении требуемых им средств из имеющегося инвестиционного фонда в порядке

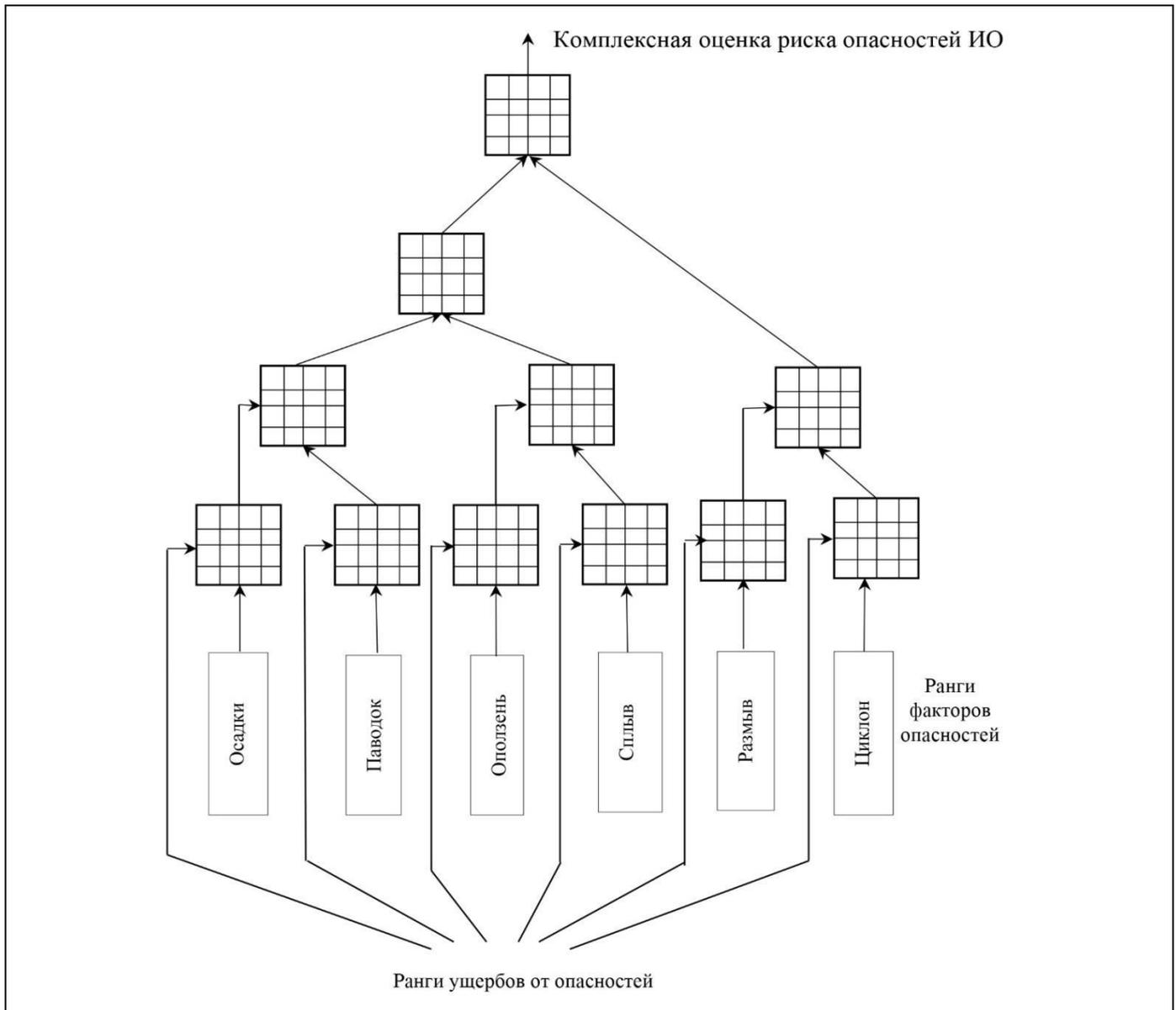


Рис. 5. Формирование комплексной оценки риска ИО

убывания значения показателя w_i/u_i , где w_i – оценка риска, u_i – требуемые средства. Известно [22], что «жадный» алгоритм, в общем случае не является оптимальным. Однако на практике часто размер инвестиционного фонда не является жестко фиксированным. При незначительном недостатке инвестиционных средств, как правило, имеется возможность увеличить фонд для включения еще одного проекта в портфель отбираемых объектов. В этом случае «жадный» алгоритм становится оптимальным.

При формировании инвестиционного портфеля для проведения адапционных мероприятий может оказаться, что включение объекта в портфель требует включения еще одного или нескольких объектов, связанных с ним технологически. Для

распределения инвестиционных средств в системе взаимосвязанных объектов предлагается воспользоваться алгоритмами, представленными в докладе [23].

3.2. Модель планирования и финансирования адапционных работ

После реализации механизмов предварительного размещения фондов между ИО для проведения адапционных мероприятий возникает задача планирования работ и финансирования в зависимости от их объема в рамках выделенного фонда.

Планирование адапционных работ и их финансовое обеспечение на отраслевом уровне могут осуществлять департаменты по экологии и без-

опасности, а также подразделения, отвечающие за развитие и содержание инфраструктуры. Например, в отрасли железнодорожных перевозок решение этих задач возложено на департаменты технической политики, экологии и техносферной безопасности, Центральную дирекцию инфраструктуры. Далее орган, ответственный за планирование и финансовое обеспечение будем условно называть управляющим органом (УО).

Для планирования УО использует информацию, получаемую от исполнителей адапционных мероприятий. В данном случае это сообщение информации от персонала, ответственного за выполнение работ на ИО. Предполагается, что представители ИО информированы об уязвимости ИО и возможном воздействии на объект в силу действия климатических факторов, в отличие от УО. При этом возникает проблема обеспечения неманипулируемости сообщаемых данных, так как представители объекта могут иметь собственные интересы в получении финансовых средств и плана по адапционным работам и могут пытаться путем искажения данных повлиять на план и финансирование. Рассмотрим абстрактную модель, описывающую эту проблему, которая может возникать на реальных объектах при управлении адапционными мероприятиями. В основе подхода к построению рассматриваемой ниже модели лежат результаты теории активных систем и организационного управления [19, 20, 24, 25] с учетом специфики рассматриваемого ИО.

Пусть y – размер ущерба, причиняемого воздействием изменений климата, g – фонд финансирования, выделенный на рассматриваемый ИО. Примем, что в рассматриваемой системе присутствует УО, осуществляющий планирование и выделение средств из фонда финансирования, и Агент, являющийся представителем объекта, см. рис. 6. Обозначим ξ воздействие климатических изменений на объект, r – параметр, характеризующий уязвимость объекта, где $\xi_1 \leq \xi \leq \xi_2$, $r_1 \leq r \leq r_2$.

Примем, что УО, в отличие от Агента, не знает точные значения параметров ξ и r . Пусть УО знает только возможные границы значений этих параметров $\eta_1 \leq \xi \leq \eta_2$, $s_1 \leq r \leq s_2$, где $\eta_1 \leq \xi_1$, $\xi_2 \leq \eta_2$, $s_1 \leq r_1$, $r_2 \leq s_2$.

Определим порядок функционирования рассматриваемой системы, состоящей из УО и Агента [19, 20, 24, 25].

На первом шаге УО устанавливает механизм управления, который состоит из:

- процедуры планирования адапционных работ $x = \pi(\eta, s)$, где x – план адапционных работ,

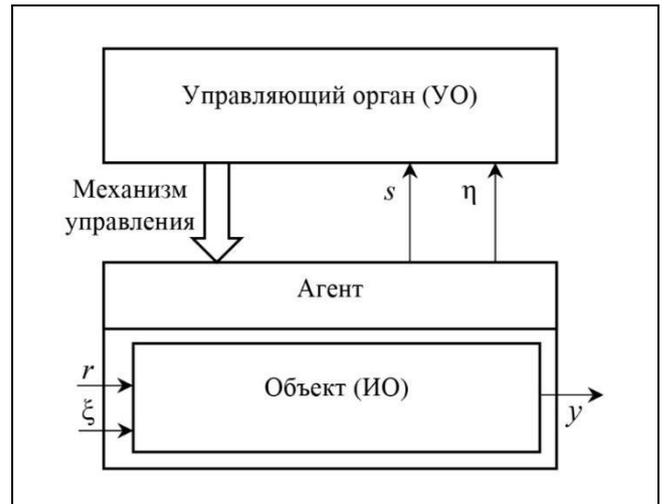


Рис. 6. Структура взаимодействия УО и Агента

η – информация о параметре воздействия на объект, s – информация о значении параметра уязвимости;

- процедуры финансирования (стимулирования) адапционных работ $\sigma(x)$, где $\sigma(x) \leq \tau g$, g – фонд финансирования адапционных работ, τg – доля фонда, направляемого на стимулирование, $0 < \tau < 1$;

- функции штрафов за отклонение размера освоения финансов z работ по адаптации от установленного плана, $\chi(x, z)$, $\chi(x, z) \geq 0$, $\chi(z, z) = 0$.

Примем $x, z \in X(x^0, \xi, r) \in X^0 = [0, x^0]$, где x^0 – максимальный объем требуемых адапционных мероприятий для полного нивелирования климатических воздействий на объект при максимальных уровнях воздействия и уязвимости.

Заметим, что УО при назначении функции штрафа не знает заранее, как будут выполняться адапционные работы в перспективе, но он устанавливает в составе механизма управления для Агента правило наказания за невыполнение плана.

Второй шаг осуществляет Агент. Этот шаг заключается в сообщении Агентом оценок η воздействия на объект и s уязвимости объекта. После этого Агенту в соответствии с установленным механизмом становятся известны план адапционных работ $x = \pi(\eta, s)$ и объем финансирования $\sigma(x)$ при условии выполнении плана.

Пусть ущерб от изменения климата описывается зависимостью $y = y(z, \xi, r)$, т. е. ущерб зависит от объема адапционных работ z , воздействия ξ и уязвимости r . Естественно предположить, что функция $y(z, \xi, r)$ не возрастает по z и не убывает по ξ и r .

Целевую функцию Агента представим в виде $f(x, z, \xi, r) = \sigma(z) - \zeta(z, \xi, r) - \chi(x, z)$, где $\zeta(z, \xi, r)$ – функция затрат Агента на реализацию работ z . Предположим, что $\zeta(z, \xi, r) \geq 0$, $\zeta(0, \xi, r) = 0$, $\zeta(z)$ дважды дифференцируема, и смешанные производные существуют.

Целевую функцию УО запишем в виде $\Phi(y, g) = F(y) + \lambda g$, где $F(y)$ – возрастающая функция, λ – параметр, определяющий ценность для УО выделяемого фонда g .

Примем, что Агент при выборе сообщений и объема работ стремится максимизировать свою целевую функцию. При выборе механизма управления УО стремится минимизировать свою целевую функцию $\Phi(y, g)$.

Опишем выбор Агентом действий и сообщений. Из принятого принципа поведения Агента, максимизации целевой функции, имеем при выборе финансирования работы

$$\begin{aligned} \varphi(x, \xi, r) &= \sigma(z^*) - \zeta(z^*, \xi, r) - \chi(x, z^*) = \\ &= \max_{z \in X} [\sigma(z) - \zeta(z, \xi, r) - \chi(x, z)]. \end{aligned}$$

Сообщения Агента определяются из условия $\varphi(\pi(\eta^*, s^*), \xi, r) = \max_{\substack{\eta_1 \leq \eta \leq \eta_2 \\ s_1 \leq s \leq s_2}} \varphi(\pi(\eta, s), \xi, r)$, т. е. Агент

при сообщении информации стремится получить план, доставляющий максимум его функции предпочтения.

Здесь предполагается, что составляющие целевой функции Агента таковы, что соответствующие максимумы существуют.

Постановки задач.

А) Определить механизм управления, обеспечивающий неманипулируемость, т. е. заинтересованность Агента сообщать в УО достоверные данные о параметрах воздействия и уязвимости, $\eta^* = \xi$, $s^* = r$, и стремиться выполнять план $z^* = x$.

Б) Определить оптимальный механизм на множестве заданных механизмов M :

$$\begin{aligned} \Phi(y, g) &= F(y(z^*, \xi, r)) + \lambda g = \\ &= F(y(z^*(\pi(\eta^*, s^*), \xi, r))) + \lambda g \rightarrow \min_{m \in M}. \end{aligned}$$

Перейдем от рассмотренного описания модели к более конкретному. Примем, что параметры воздействия и уязвимости измеряются в относительных единицах, т. е. $\xi \in [0, 1]$, $r \in [0, 1]$. Это означает, что при $\xi = 0$ воздействие на объект отсутствует, а при $\xi = 1$ оно максимальное. Соответственно, при $r = 0$ неуязвимость объекта полностью обеспечена, а при $r = 1$ уязвимость максимальная, приводящая к прекращению его функционирования.

Пусть $y = b(x^0 p - z)$, где x^0 – максимальная величина адаптационных мероприятий при максимальных воздействиях и уязвимости, $p = \xi r$, b – заданный параметр, $b > 0$; функция затрат равна

$$\zeta(z, \xi, r) = \zeta(z, px^0) = \frac{\beta px^0}{px^0 - z}, \text{ где } \beta > 0. \text{ Функция}$$

затрат пропорциональна степени воздействия и уязвимости объекта и обратно пропорциональна степени ущерба. Обратная пропорциональность степени ущерба означает, что Агент несет большие затраты на действия по снижению ущерба. Рассматриваемая функция затрат выбрана из этих содержательных соображений. Вообще говоря, в модели можно использовать и другую функцию затрат. Необходимо только требовать выполнения следующих свойств ее производных [26]: $\zeta'_z(z, p) > 0$, $\zeta''_{zz}(z, p) > 0$, $\zeta'_p(z, p) < 0$, $\zeta''_{zp}(z, p) < 0$.

Из $\eta_1 \leq \xi \leq \eta_2$, $s_1 \leq r \leq s_2$ следует $q_1 = \eta_1 s_1 \leq q = \eta s \leq \eta_2 s_2 = q_2$, где q – сообщаемая Агентом в УО оценка параметра p .

Примем, что функция штрафов

$$\chi(x, z) = \begin{cases} v, & \text{если } x \neq z, \\ 0, & \text{если } x = z, \end{cases}$$

где $v > 0$.

Пусть $F(y) = By$, где параметр $B > 0$ обозначает размер ущерба в денежном выражении для сопоставления с величиной λg ценности фонда g .

Отметим, что $y \geq 0$ и соответственно $z \in X(p) = [0, x^0 p] \in X^0 = [0, x^0]$.

При сделанных предположениях о компонентах целевые функции УО и Агента принимают вид

$$\Phi(y, g) = By + \lambda g = Bb(x^0 p - z) + \lambda g,$$

$$f(x, z, \xi, r) = \sigma(z) - \frac{\beta px^0}{px^0 - z} - \chi(x, z). \quad (1)$$

3.3. Обеспечение сообщения Агентом неискаженных данных и выполнения плана

Пусть задана функция финансирования $\sigma(z)$. Для определения условия сообщения неискаженных данных и выполнения плана воспользуемся результатами исследований [26, 27].

Рассмотрим множество $P(p) = \{u \mid \sigma(u) - \zeta(u) \geq \sigma(z) - \zeta(z, p) - \chi(x, z), u \in X, z \in X\}$. Это множество определяет все планы, которые Агенту вы-



годно выполнить. После подстановки формулы (1) в выражение для $P(p)$ получим

$$P(p) = \{u \mid \sigma(u) - \frac{\beta px^0}{px^0 - u} \geq \sigma(z) - \frac{\beta px^0}{px^0 - z} - v, (u, z) \in [0, px^0]\}.$$

В случае выполнения плана целевая функция Агента равна $\varphi(x, p) = f(x, x, p) = \sigma(x) - \frac{\beta px^0}{px^0 - x}$.

Из теоремы 1 [27] следует, что при процедуре планирования $\pi^*(\eta, s) = \pi^*(q)$, где $q = \eta s$, необходимые и достаточные условия сообщения Агентом достоверных данных и выполнения плана относительно воздействия и уязвимости при процедуре планирования формулируются следующим образом: обеспечивается сообщение достоверных данных и выполнение плана тогда и только тогда, когда для любых допустимых сообщений (η, s) таких, что $0 \leq \eta \leq 1$, $0 \leq s \leq 1$, существуют множества ограничения согласования X^c , для которых справедливо $X^c \cap P(q) \neq \emptyset$ и

$$\varphi(\pi^*(q), q) = \max_{x \in X^c \cap P(q)} \varphi(x, q),$$

или

$$\begin{aligned} \sigma(\pi^*(q)) - \frac{\beta qx^0}{qx^0 - \pi^*(q)} &= \\ &= \max_{x \in X^c \cap P(q)} [\sigma(x) - \frac{\beta qx^0}{qx^0 - x}], \end{aligned} \quad (2)$$

Пример. Пусть функция финансирования линейна, $\sigma(x) = kx$, $X^c = [0, x^0]$, $v \geq kx^0$, $\alpha = 0$. Из формулы (2) получаем процедуру планирования $\pi^*(q) = qx^0 - \sqrt{\beta qx^0 / k}$, обеспечивающую сообщение достоверных данных $\eta = \xi$, $s = r$.

Условие (2) позволяет определить решение задачи А) о неманипулируемости механизма.

3.4. Оптимальный механизм расходования средств на адаптационные работы

Для определения оптимального механизма воспользуемся методологией, описанной в работе [26]. Заметим, что целевая функция УО достигает минимума по z , равного λg , при $z = x^0 p$ и максимума $Bbx^0 p + \lambda g$ при $z = 0$, т. е. $\lambda g \leq \Phi(y, g) \leq$

$\leq Bbx^0 p + \lambda g$. Введем в рассмотрение параметр γ , определяющий максимальный требуемый уровень целевой функции УО, $\lambda g \leq \Phi(y, g) \leq \gamma$. Параметр γ принимает значение на отрезке $[\lambda g, Bbx^0 p + \lambda g]$. Рассмотрим множество пар (p, z) для фиксированного значения параметра γ , для которых

$$Bb(x^0 p - z) + \lambda g \leq \gamma. \quad (3)$$

Обозначим это множество $Q_\gamma = \{(p, z) \mid Bb(x^0 p - z) + \lambda g \leq \gamma\} = \{(p, z) \mid z \geq px^0 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}\}$. Рассмотрим процедуры планирования, аргумент и соответствующее ему значение которых принадлежат множеству Q_γ и которые удовлетворяют условию (2). Эти процедуры планирования в случае сообщения Агентом достоверной информации обеспечивают значение целевой функции УО не больше, чем γ .

Перепишем неравенство (3) в виде $z \geq px^0 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}$. Соответственно, нижнюю границу множества Q_γ запишем в виде равенства $z = px^0 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}$.

Для простоты рассмотрим случай «сильного штрафа» [24], когда величина штрафа v достаточно велика, например, $\sigma(z) - \frac{\beta qx^0}{qx^0 - z} < v$ при любых допустимых z . При таком штрафе выбор Агентом объема работы z совпадает с планом, $z = x$.

Рассмотрим необходимые условия экстремума для целевой функции Агента $f'_x(x, x, \xi, r) = 0$, которые в соответствии с формулой (1) можно переписать в виде

$$\sigma'(x) = \frac{\beta x^0 p}{(x^0 p - x)^2}. \quad (4)$$

Найдем функцию стимулирования, обеспечивающую выполнение необходимых условий экстремума на нижней границе множества Q_γ , а именно при $x = x^0 p - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}$. Перепишем это равенство в виде $p = [x + \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}] / x^0$ и подставим в формулу (4). Получаем уравнение

$$\sigma'(x) = \beta \frac{(Bb)^2}{(\gamma - \lambda g)^2} x + \beta \frac{Bb}{\gamma - \lambda g}.$$

Отсюда получаем выражение для функции финансирования, обеспечивающей максимум целевой функции Агента на границе множества Q :

$$\begin{aligned} \sigma(x) &= \beta \int_0^x \left[\frac{(Bb)^2}{(\gamma - \lambda g)^2} t + \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} \right] dt = \\ &= \beta \frac{(Bb)^2}{2(\gamma - \lambda g)^2} x^2 + \beta \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} x. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученная функция финансирования (5) вместе с процедурой планирования

$$\pi^*(q) = x^0 q - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb} \quad (6)$$

описывают структуру оптимального механизма и обеспечивают значение критерия для УО не выше γ . Оценим теперь минимальное значение параметра γ и тем самым найдем оптимальный механизм. Определим план и финансирование для наилучшей оценки $q = q_2$:

$$\begin{aligned} x_2 = \pi^*(q_2) &= x^0 q_2 - \frac{\gamma - \lambda g}{Bb}, \\ \sigma(x_2) &= \beta \frac{(Bb)^2}{2(\gamma - \lambda g)^2} x_2^2 + \beta \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} x_2. \end{aligned}$$

Минимальное значение $\gamma = \gamma^*$ можно определить из условия полного использования фонда финансирования τg , направляемого на стимулирование работ, решив относительно γ уравнение

$$\sigma(x_2) = \beta \left[\frac{(Bb)^2}{2(\gamma - \lambda g)^2} x_2^2 + \frac{Bb}{\gamma - \lambda g} x_2 \right] = \tau g \quad (7)$$

на отрезке $[\lambda g, Bbx^0 q_2 + \lambda g]$.

Подставляя выражение для x_2 и сократив подобные члены, уравнение (7) можно переписать в виде

$$\frac{(Bb)^2}{(\gamma - \lambda g)^2} (x^0 q_2)^2 = \frac{2\tau g}{\beta}.$$

Отсюда имеем

$$\gamma^* = \gamma = \lambda g + \begin{cases} Bbx^0 q_2 \sqrt{\frac{\beta}{2\tau g}}, & \text{если } \frac{\beta}{2\tau g} \leq 1, \\ Bbx^0 q_2, & \text{если } \frac{\beta}{2\tau g} > 1. \end{cases}$$

Выражения (5) и (6) при $\gamma = \gamma^*$ определяют решение задач А) и Б).

Модель планирования и финансирования адаптационных работ, с одной стороны, является детализацией модели, рассмотренной в работе [26] и учитывающей специфику включения параметров

воздействия и уязвимости. С другой стороны, она является обобщением из-за включения в целевую функцию УО зависимости от фонда финансирования. Дело в том, что для функции затрат более общего вида, рассматриваемой в статье [26], не удастся в явном виде разрешить уравнения и получить в явном виде оптимальные функцию стимулирования и процедуру планирования, обеспечивающие сообщение в УО достоверных данных. Для функции затрат, рассматриваемой в предлагаемой модели, это удастся сделать. Отметим, что работа [26] развивает предшествующие результаты [24, 25], а именно получено решение задачи синтеза оптимального механизма, включающего процедуру планирования, функцию поощрения и функцию штрафов в условиях неполной информированности УО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крупномасштабность инфраструктуры, наличие многофакторной неопределенности и необходимость принятия неотложных решений приводят к значительным трудностям формирования программы адаптационных работ, определения технических решений и их реализации.

В этих условиях оправданно применение даже ограниченно рациональных решений. Особенно это справедливо на начальных этапах, предшествующих более глубокому обследованию объектов, требующему значительных финансовых и временных затрат для приемлемой диагностики объектов, уточнения климатических прогнозов с учетом местных особенностей ландшафта, состояния верхнего слоя земной поверхности, состояния износа инфраструктурных объектов.

В статье предложены три возможности применения ограниченно рациональных решений.

Первая возможность – это определение на первом этапе первоначального списка претендентов для проведения адаптационных мероприятий методом комплексного оценивания, в котором существенно используются мнения экспертов.

Вторая возможность – после выполнения соответствующих исследований объектов из предварительного списка, сформированного на первом этапе, для них определяются уточненные оценки риска негативного влияния изменения климата и требуемые инвестиции. С использованием этих оценок предлагается формировать результирующий список объектов. Для этого предлагается размещать инвестиционные средства в последовательности уменьшения удельного показателя риска для каждого объекта до тех пор, пока не будет исчер-



пан инвестиционный фонд. Этот удельный показатель равен отношению оценки риска к оценке требуемых инвестиций на адаптационные мероприятия для рассматриваемого объекта.

Третья возможность – это разработка и применение механизма стимулирования выполнения адаптационных работ, обеспечивающего получение достоверных данных от персонала инфраструктурных объектов и рациональное использование инвестиционных вложений.

В перспективе возможность уточнять прогнозы изменений климата в процессе реализации адаптационных мероприятий делает целесообразным применение дорожных карт, в которых учитываются развитие технологий, развитие инфраструктуры и разные сценарии изменения климата. Дорожная карта в данном случае представляет собой описание плановых траекторий реализации мероприятий по противодействию негативным последствиям изменения климата, учитывающим необходимость смещения парадигмы от реагирования на стихийные бедствия после их возникновения в сторону проактивного подхода к снижению опасности бедствий на основе метеорологического, гидрологического и климатического мониторинга и прогнозов. В дорожной карте определяется во временном разрезе возможный порядок реализации адаптационных мероприятий с учетом возможных сценариев прогнозов изменения климата и прогнозируемых сценариев развития инфраструктуры. Например, для железнодорожного транспорта это включает развитие дорог, подвижного состава, видов используемого топлива и энергии для движения поездов, систему управления движением, системы автоматизации и телемеханики. Дорожная карта основывается на долгосрочном прогнозе климата и развития инфраструктуры и периодически уточняется в зависимости от изменения соответствующих прогнозов и результатов метеорологического, гидрологического и климатического мониторинга (например, каждые 5 лет).

В перспективе также необходимо создание единой информационной системы прогнозирования изменения климата на основе систем искусственного интеллекта и текущего мониторинга, а также создания цифровых двойников объектов инфраструктуры, позволяющей проводить анализ изменения климата, состояния уязвимости инфраструктурных объектов и оценку рисков неблагоприятных воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и

мониторингу окружающей среды (Росгидромет) / под ред. В.М. Катцова, – Санкт-Петербург: Климатический центр Росгидромета, 2017. – 106 с. – URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (дата обращения 10.09.2023). [Report on climatic risks in the Russian Federation. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet) / Ed. by V.M. Kattsova. – St. Petersburg: Climatic Center of Roshydromet, 2017. – 106 p. – URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (accessed September 10, 2023). (In Russian)]

2. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ. Общее резюме. – СПб.: Научное издание технологий, 2022. – 124 с. [Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet). The Third Assessment Report on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation. General Summary. – St. Petersburg: High technology, 2022. – 124 p. (In Russian)]
3. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета). Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) / под ред. В.М. Катцова, Б.Н. Порфирьева. – СПб.: Климатический центр Росгидромета, 2020. – 120 с. – URL: <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/dokladRGM.pdf> (дата обращения 10.09.2023). [Report on the Scientific and Methodological Basis for the Development of Adaptation Strategies to Climate Change in the Russian Federation (In the Area of Competence of Roshydromet). Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring (Roshydromet) / Ed. by V.M. Kattsova, B.N. Porfiriyeva. – St. Petersburg: Climate Center of Roshydromet, 2020. – 120 p. – URL: <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/dokladRGM.pdf> (accessed September 10, 2023). (In Russian)]
4. Адаптация к изменениям климата. Принципы, требования и руководящие указания (ISO 14090:2019, IDT). Национальный стандарт Российской Федерации. – М: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2019. – 32 с. – URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/gost_r_iso_14090-2019.pdf (дата обращения 10.09.2023). [Adaptation to climate change. Principles, Requirements and Guidelines (ISO 14090:2019, IDT). National Standard of the Russian Federation. – Moscow: Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2019. – 32 p. – URL: https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/gost_r_iso_14090-2019.pdf (accessed September 10, 2023). (In Russian)]
5. Медведев А.А. Адаптация к климатическим изменениям: глобальный эколого-экономический тренд и его значение для России // Вестник Московского областного университета. Серия: Естественные науки. – 2018. – № 4. – С. 11–19. – DOI: 10.18384/2310-7189-2018-4-11-19. [Medvedkov, A.A. Adaptation to Climate Change: Global Environmental and Economic Trend and Its Significance for Russia // Bulletin of the Moscow Regional University. Series: Natural Sciences. – 2018. – No. 4. – P. 11–19. – DOI: 10.18384/2310-7189-2018-4-11-19. (In Russian)]
6. Быков А.А. О рисках изменения климата и устойчивого развития // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18. – № 4. – С. 8–14. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-4-8-14>. [Bykov A.A. On the Risks of Climate Change and

- Sustainable Development // Problems of Risk Analysis. – 2021. – Vol. 18, no. 4. – P. 8–14. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-4-8-14>. (In Russian)]
7. *Мухеев П.Н.* О подходах к учету рисков изменения климатических условий при планировании и реализации нефтегазовых проектов // Проблемы анализа риска. – 2021. – Т. 18. – № 1. – С. 52–65. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-1-52-65>. [Mikheev, P.N. On Approaches to Taking into Account the Risks of Changes in Climate Conditions When Planning and Implementing Oil and Gas Projects // Problems of Risk Analysis. – 2021. – Vol. 18, no. 1. – P. 52–65. – DOI: <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2021-18-1-52-65>. (In Russian)]
 8. *Апулу О.Г., Потравный И.М., Вега А.Ю.* Эколого-экономическое обоснование выбора технологий рекультивации загрязненных нефтью земель. – М.: Экономика, 2021. – 136 с. [ApuLu, O.G., Potravny, I.M., Vega, A.Yu. Ecological and Economic Justification for the Choice of Technologies for Reclamation of Oil-Contaminated Lands. – М.: Economy, 2021. – 136 p. (In Russian)]
 9. *Хлебникова Е.И., Дацюк Т.А., Салль И.А.* Воздействие изменений климата на строительство, наземный транспорт, топливно-энергетический комплекс // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2014. – № 574. – С. 125–178. [Khlebnikova, E.I., Datsyuk, T.A., Sall, I.A. Impact of Climate Change on Construction, Land Transport, Fuel and Energy Complex // Proceedings of the Main Geophysical Observatory named after. A.I. Voejkova. – 2014. – No. 574. – P. 125–178. (In Russian)]
 10. *Черешнюк С.В., Тимашова Л.В.* Учет, мониторинг и прогноз климатических условий при проектировании и эксплуатации воздушных линий электропередачи. карты климатического районирования // Энергия единой сети. – 2021. – № 4 (59). – С. 65–75. [Chereshnyuk, S.V., Timashova, L.V. Accounting, Monitoring and Forecasting of Climatic Conditions during the Design and Operation of Overhead Power Lines. Maps of Climatic Zoning // Energy of a Single Network. – 2021. – No. 4 (59). – P. 65–75. (In Russian)]
 11. *Влияние климатических рисков и устойчивое развитие финансового сектора Российской Федерации. Доклад для общественных консультаций.* – М.: Центральный банк Российской Федерации, 2020. – 34 с. – URL: http://www.cbr.ru/content/document/file/108263/consultation_paper_200608.pdf (дата обращения 10.09.2023). [Impact of Climate Risks and Sustainable Development of the Financial Sector of the Russian Federation. Report for Public Consultation. – М.: Central Bank of the Russian Federation, 2020. – 34 p. – URL: http://www.cbr.ru/content/document/file/108263/consultation_paper_200608.pdf (accessed September 10, 2023). (In Russian)]
 12. *Palin, E., Stipanovic Oslakovic, I., Gavin, K., Quinn, A.* Implications of Climate Change for Railway Infrastructure // WIREs Climate Change. – 2021. – Vol. 12, no. 5. – DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.728>.
 13. *Operation and Construction Measures for Ensuring Climate-Resilient Railway Infrastructure // Climate ADAPT.* – 2021. – URL: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/metadata/adaptation-options/operation-and-construction-measures-for-ensuring-climate-resilient-railway-infrastructure> (дата обращения 10.09.2023). [Accessed September 10, 2023].
 14. *Weather Resilience and Climate Change Adaptation Strategy. Safety, Technical and Engineering.* – London: Network Rail, 2017. – URL: <https://safety.networkrail.co.uk/wp-content/uploads/2017/02/NR-WRCCA-Strategy-2017-2019.pdf> (дата обращения 10.09.2023). [Accessed September 10, 2023].
 15. *Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation: Executive Report.* – London: Rail Safety and Standards Board Ltd., 2016. URL: https://adaptationscotland.org.uk/download_file/view_inline/390 (дата обращения 10.09.2023). [Accessed September 10, 2023].
 16. *Dawson, R., Thompson, D., Johns, D., et al.* A Systems Framework for National Assessment of Climate Risks to Infrastructure // Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, physical, and Engineering Sciences. – 2018. – 376. – Art. no. 20170298.
 17. *Последствия изменения климата для международных транспортных сетей и адаптация к ним.* – Нью-Йорк–Женева: ООН, 2013. – 270 с. – URL: https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014r.pdf (дата обращения 10.09.2023). [Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks. – New York–Geneva: UN, 2012. – 248 p. URL: https://unece.org/DAM/trans/main/wp5/publications/climate_change_2014r.pdf (accessed September 10, 2023).]
 18. *Бурков В.Н., Еналеев А.К., Строгонов В.И., Федянин Д.Н.* Модели и структура управления разработкой и внедрением инновационных средств и технологий (на примере железнодорожного транспорта) I. Механизмы отбора приоритетных проектов и распределения ресурсов // Управление большими системами. – 2018. – Вып. 74. – С. 81–107. [Burkov, V., Enaleev, A., Strogonov, V., and Fedyanin, D. Models and Management Structure for the Development and Implementation of Innovative Technologies in Railway Transportation. I. Mechanisms of Priority Projects Selection and Resource Allocation. // Automation and Remote Control. – 2020. – Vol. 81, no. 7. – P. 1316–1329.]
 19. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами / 3-е изд. – М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2012. – 584 с. [Novikov, D.A. Theory of Management of Organizational Systems / 3rd ed. – Moscow: Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 2012. – 584 s. (In Russian)]
 20. *Механизмы управления / под ред. Д.А. Новикова.* Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: ЛЕНАНД, 2013. – 216 с. [Mechanism Design and Management. Mathematical Methods for Smart Organizations / In: Business Issues, Competition and Entrepreneurship. – NOVA publishers: New York, 2013. – 187 p.]
 21. *Korgin, N.A., Sergeev, V.A.* Identification of Integrated Rating Mechanisms on Complete Data Sets // IFIP Advances in Information and Communication Technology. – 2021. – Vol. 630. – P. 610–616.
 22. *Merer, H.K., Pferschy, U., Pisinger, D.* Knapsack Problem. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. – 546 p.
 23. *Бурков В.Н., Еналеев А.К.* Обобщенная задача о ранце // Тр. одиннадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2018)». – Москва, 2018. – Т. 1. – С. 117–123. [Burkov, V.N., Enaleev, A.K. Optimal Resource Allocation in Network Structures // Proceedings of 11th Conference Management of Large-Scale System Development MLSD'2018. – Moscow: IEEE, 2018. – P. 1–5. – URL <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551936>.]
 24. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. – М.: Наука, 1977. – 255 с. [Burkov, V.N. Fundamentals of the Mathematical Theory of Active Systems. – М.: Nauka, 1977. – 255 s. (In Russian)].



25. Бурков В.Н., Еналеев А.К. Оптимальность принципа открытого управления. Необходимые и достаточные условия достоверности информации в активных системах // Автоматика и телемеханика. – 1985. – № 3. – С. 73–80. [Burkov, V.N., and Enaleev, A.K. Optimality of the Principle of Open Control. Necessary and Sufficient Conditions for Reliability of Information in Active Systems // Automation and Remote Control. – 1985. – Vol. 46, no. 3. – P. 341–348.]
26. Еналеев А.К. Оптимальность согласованных механизмов функционирования в активных системах // Управление большими системами. – 2011. – Вып. 33. – С. 143–166. [Enaleev, A.K. Optimal Incentive-Compatible Mechanisms in Active Systems // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, no. 3. – P. 491–505.]
27. Еналеев А.К. Правильные механизмы планирования в активных организационных системах с обменом информацией // Труды шестнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2023). – Москва, 2023. – С. 1655–1662. [Enaleev, A. Plan Implementation and Data Revelation in Active Organizational Systems // 16th International Conference «Management of large-scale system development» (MLSD'2023). – Moscow: IEEE, 2023. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/MLSD58227.2023.10303997.]

Статья представлена к публикации руководителем РПС Г. А. Угольником.

Поступила в редакцию 17.12.2023,
после доработки 15.02.2024.
Принята к публикации 21.02.2024.

Вега Анна Юрьевна – канд. экон. наук, Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, г. Москва,
✉ Vega.AY@rea.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1002-8317>

Еналеев Анвер Касимович – канд. техн. наук, Институт проблем управления имени В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ anverena@mail.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4450-9533>

© 2024 г. Вега А. Ю., Еналеев А. К.



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

INTEGRATED CLIMATE CHANGE IMPACT ASSESSMENT AND AN ADAPTATION FINANCING MECHANISM FOR INFRASTRUCTURE FACILITIES

A. Yu. Vega* and A. K. Enaleev**

*Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia,

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

*✉ Vega.AY@rea.ru, **✉ anverena@mail.ru

Abstract. This paper addresses the planning and management aspects of adaptation measures for mitigating the adverse impacts of climate change on economic infrastructure facilities. We navigate through the complexities of risk assessment in the face of climate change uncertainties. The integrated assessment of infrastructure facilities using climate forecast maps and facilities vulnerability maps is structurally described. An approach is proposed to form a portfolio of infrastructure facilities. They are selected in two stages as follows. In the first stage, a preliminary portfolio of facilities is formed using integrated assessment. In the second stage, investment resources are sequentially allocated to preliminary portfolio's facilities in descending order of their specific risk assessment. Due to a limited investment fund, the second stage yields the final portfolio of facilities for implementing adaptation measures. We present an incentive mechanism for adaptation measures under the Principal's incomplete information. This mechanism is optimal and provides reliable data from the facilities to the Principal (possesses strategy-proofness).

Keywords: climate change, adaptation, integrated risk assessment, selection of infrastructure facilities, allocation of investment funds, costs, financing mechanisms, incentives.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДИНАМИКУ ОТРАСЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ РЫНКА ТРУДА НА ОСНОВЕ БАЛАНСОВОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

А. П. Невечеря*, Е. В. Попова**

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», г. Краснодар,

**ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», г. Краснодар

*✉ artiom1989@mail.ru, **✉ elena-popov@yandex.ru

Аннотация. Предложен подход к учёту управляющих воздействий на динамику отраслевой структуры рынка труда при прогнозировании показателей отраслевой занятости. Применяемая схема прогнозирования основана на балансовой математической модели межотраслевых перемещений трудовых ресурсов. В рассмотренном ранее одним из авторов варианте схемы прогнозирования тренды показателей, характеризующих межотраслевую мобильность рабочей силы, определялись независимо друг от друга. В настоящей работе осуществлена модификация данной схемы: предложен способ группировки показателей межотраслевых перемещений и критерий определения общего тренда показателей внутри каждой группы. С помощью модифицированной схемы прогнозирования вычислены прогнозы отраслевой занятости на рынке труда РФ в 2011–2016 гг., произведено сравнение с ранее полученными результатами. По данным отраслевой занятости и безработицы за 2017–2021 гг., предоставляемым согласно классификатору ОКВЭД-2, осуществлён прогноз ожидаемого уровня занятости в конце 2022 г. На примере рынка труда РФ в 2017–2022 гг. рассмотрен способ определения результатов управления: продемонстрированы изменения прогнозов отраслевой занятости в случае учёта управляющих воздействий на аграрный и промышленный сектора исследуемого рынка.

Ключевые слова: отраслевая структура рынка труда, балансовая математическая модель, межотраслевые перемещения трудовых ресурсов, управляющие воздействия, эффект управления, прогнозирование занятости, рынок труда.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость управления, воздействующего на динамику отраслевой структуры рынка труда, обусловлена стремлением управляющих акторов к повышению экономической эффективности процессов рынка труда [1, 2], созданием условий для эффективной и стабильной занятости населения [3, 4], обеспечением согласованности между спросом и предложением на квалифицированные трудовые ресурсы [5], достижением баланса между профессиональной структурой выпускников системы образования и востребованностью специалистов, обладающих определёнными наборами компетенций [6], необходимостью исключения

ситуаций возникновения острой нехватки кадров в сегментах рынка [7, 8], необходимостью предупреждения и преодоления процессов, способных спровоцировать кризисные явления на рынке труда [9, 10].

Основным актором, применяющим управляющие воздействия, является государство; сами управляющие воздействия могут принимать формы субсидирования программ переподготовки квалифицированных специалистов [11], корректировки образовательных стандартов высших учебных заведений [12], финансовой поддержки деловой активности в сегментах рынка труда [13], стимулирования исследований и разработок, направленных на переход к наукоёмким и высокотехнологичным производствам [14].



Результат выбираемых управляющих воздействий должен как можно больше соответствовать целям их принятия, в связи с чем необходим прогноз эффективности управления [15, 16]; одними из основных критериев эффективности являются отраслевые занятость и безработица [17, 18]. Прогнозирование влияния управляющих воздействий по данным критериям эффективности может быть осуществлено на основе схем прогнозирования, способных учитывать управляющие воздействия на уровне межотраслевого взаимодействия трудовых ресурсов и доставляющих качественные прогнозы показателей отраслевой структуры рынка труда.

Для прогнозирования отраслевых показателей занятости и безработицы применяются различные формализуемые и интуитивные модели динамики отраслевой структуры рынка труда [19, 20].

Применение интуитивных моделей влечёт риски уменьшения надёжности прогнозов вследствие субъективности основанных на данных моделях схем прогнозирования [21] и контринтуитивности социально-экономических, в частности рыночных, процессов [22, 23].

При прогнозировании отраслевых показателей рынка труда с помощью формализуемых моделей на надёжность результатов негативно влияет двойственность проблемы прогнозирования динамики отраслевой структуры: с одной стороны, отраслевые показатели рынка труда сильно агрегированы [24], вследствие чего при непосредственном прогнозировании по значениям этих показателей не учитываются тренды факторов, на которые данные показатели могут быть сегментированы [25]; с другой стороны, сегментирование агрегированных показателей приводит к появлению в математической модели факторов, регулярная объективная статистика по которым отсутствует [26].

Одним из решений двойственности проблемы прогнозирования является сегментирование показателей отраслевой занятости и безработицы с помощью балансовой математической модели [27]. Для этой модели:

- разработаны метод и алгоритм вычисления значений факторов, полученных в результате сегментирования, только по значениям отраслевых показателей рынка труда [28], при этом для вычисления отраслевых показателей рынка труда достаточно данных, предоставляемых Федеральной службой государственной статистики [29];

- реализована схема прогнозирования, в которой тренды сегментирующих показатели рынка

труда факторов определяются независимо друг от друга.

В настоящей работе рассмотрены общие принципы учёта управляющих воздействий на динамику отраслевой структуры рынка труда при применении схемы прогнозирования, основанной на такой балансовой математической модели. Также рассмотрен вариант модификации схемы, направленный на улучшение ожидаемого качества прогноза в случаях, когда тенденции группы факторов, сегментирующих один и тот же показатель рынка труда, задаются одним выбранным для конкретной группы видом тренда. Полученная на основе данной схемы методика прогнозирования отраслевой занятости с возможностью учёта эффектов управления была апробирована для рынка труда РФ.

1. БАЛАНСОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В целях упрощения определения значений показателей рынка труда и показателей межотраслевых перемещений трудовых ресурсов введём обозначения для возможных состояний каждого элемента рабочей силы исследуемого рынка: $S_1^{(i)}$ – имеет занятость в отрасли i ; $S_2^{(i)}$ – является безработным, последнее место занятости которого было в отрасли i , $i = \overline{1, n}$, где n – количество отраслей; $S_2^{(0)}$ – является безработным, не имеющим занятости на исследуемом рынке труда с момента (последнего) появления на нём.

Рассмотрим следующие *показатели рынка труда*: $N_j^{(i)}(t)$ – численность рабочей силы, находящейся в конце года t в состоянии $S_j^{(i)}$, $j = 1, 2$, $i_1 = \overline{1, n}$, $i_2 = \overline{0, n}$. Для рынка труда РФ значения этих показателей можно вычислить по данным Федеральной службы государственной статистики. Математическая модель динамики отраслевой структуры рынка труда имеет следующий общий вид:

$$N_j^{(i)}(t+1) = N_j^{(i)}(t) + q_{j,\text{in}}^{(i)}(t) - q_{j,\text{out}}^{(i)}(t), \quad (1)$$

$$j = 1, 2, i = \overline{1, n},$$

$$N_2^{(0)}(t+1) = N_2^{(0)}(t) + \Delta N_2^{(0)}(t) - q_{2,\text{out}}^{(0)}(t). \quad (2)$$

Здесь $q_{j,\text{in}}^{(i)}(t)$ – объём рабочей силы, находящейся в конце года $t+1$ в состоянии $S_j^{(i)}$, а в конце года t

– в состоянии, отличном от $S_j^{(i)}$; $q_{j,\text{out}}^{(i)}(t)$ – объём рабочей силы, находящейся в конце года t в состоянии $S_j^{(i)}$, а в конце года $t+1$ – в состоянии, отличном от $S_j^{(i)}$; $\Delta N_2^{(0)}(t)$ – экзогенная переменная модели, приток трудовых ресурсов на рынок труда в течение года $t+1$; величина $q_{1,\text{in}}^{(i)}(t)$ также называется входящим потоком трудовых ресурсов в отрасль i в течение года $t+1$, величина $q_{1,\text{out}}^{(i)}(t)$ – исходящим потоком трудовых ресурсов из отрасли i в течение года $t+1$ [27]; $j = \overline{1, 2}$, $i, i_1 = \overline{1, n}$, $i_2 = \overline{0, n}$.

Построение балансовой математической модели динамики отраслевой структуры заключается в детализации величин $q_{j,\text{in}}^{(i)}(t)$, $q_{j,\text{out}}^{(i)}(t)$, $j = \overline{1, 2}$, $i, i_1 = \overline{1, n}$, $i_2 = \overline{0, n}$, позволяющей определять межотраслевые перемещения трудовых ресурсов на исследуемом рынке. Сравним два варианта детализации. Первый вариант [26, 27] выглядит следующим образом:

$$q_{1,\text{in}}^{(i)}(t) = \sum_{j=1}^n N_2^{(j)}(t) P_1^{(j,i)}(t) + \left[\Delta N_2^{(0)}(t) + N_2^{(0)}(t) \right] P_1^{(0,i)}(t) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n N_1^{(j)}(t) P_4^{(j,i)}(t), \quad (3)$$

$$q_{1,\text{out}}^{(i)} = N_1^{(i)}(t) \left[P_2^{(i)}(t) + P_3^{(i)}(t) \right] + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n N_1^{(j)}(t) P_4^{(i,j)}(t), \quad (4)$$

$$q_{2,\text{in}}^{(i)}(t) = N_1^{(i)}(t) P_2^{(i)}(t), \quad (5)$$

$$q_{2,\text{out}}^{(i)}(t) = N_2^{(i)}(t) \sum_{j=1}^{n+1} P_1^{(i,j)}(t), \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$q_{2,\text{out}}^{(0)}(t) = \left[\Delta N_2^{(0)}(t) + N_2^{(0)}(t) \right] \sum_{j=1}^{n+1} P_1^{(0,j)}(t), \quad (6)$$

где $P_1^{(i,j)}(t)$ – вероятность того, что работник в течение года $t+1$ перейдёт из состояния $S_2^{(i)}$ (в конце года t) в состояние $S_1^{(j)}$ (в конце года $t+1$); $P_2^{(k)}(t)$ – вероятность того, что работник в течение

года $t+1$ перейдёт из состояния $S_1^{(k)}$ в состояние $S_2^{(k)}$; $P_3^{(k)}(t)$ – вероятность того, что работник в течение года $t+1$ перейдёт из состояния $S_1^{(k)}$ в состояние $S_2^{(n+1)}$; $P_4^{(k_1, k_2)}(t)$ – вероятность того, что работник в течение года $t+1$ перейдёт из состояния $S_1^{(k_1)}$ в состояние $S_1^{(k_2)}$; $i = \overline{0, n}$, $j = \overline{1, n+1}$, $k, k_1, k_2 = \overline{1, n}$, $k_1 \neq k_2$. Переход в состояние $S_2^{(n+1)}$ следует интерпретировать как выход работника из исследуемого рынка труда.

Из определения этих вероятностей следует, что

$$P_1^{(i,j)}(t) \geq 0, \quad \sum_{k=1}^{n+1} P_1^{(i,k)}(t) \leq 1, \quad i = \overline{0, n}, \quad j = \overline{1, n+1}, \quad (7)$$

$$P_2^{(i)}(t), P_3^{(i)}(t), P_4^{(j,i)}(t) \geq 0, \quad P_2^{(i)}(t) + P_3^{(i)}(t) + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n P_4^{(i,k)}(t) \leq 1, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j. \quad (8)$$

Математическую модель (1)–(8) назовём детализированной балансовой математической моделью.

В отличие от математической модели (1)–(8), в балансовой модели с уменьшенным уровнем детализации не рассматривается возможность смены отраслевой принадлежности занятого работника рынка труда в течение одного года [28]. Другими словами, в случае такого уменьшения детализации $P_4^{(k_1, k_2)}(t) = 0$, $k_1, k_2 = \overline{1, n}$, $k_1 \neq k_2$, в формулах (3), (4), (8).

Рассматриваемые вероятности являются показателями межотраслевых перемещений трудовых ресурсов, которые сегментируют показатели рынка труда с помощью соответствующей балансовой математической модели (детализированной или с уменьшенным уровнем детализации).

В обоих случаях уравнения (1), (2) балансовой математической модели можно представить в виде

$$N(t, t+1) = A(t) P(t). \quad (9)$$

Здесь

$$N(t, t+1) = \left(\Delta_1^1, \dots, \Delta_1^n, \Delta_2^1, \dots, \Delta_2^n, \Delta_2^0 \right)^T, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta_1^i &= N_1^{(i)}(t+1) - N_1^{(i)}(t), \\ \Delta_2^i &= N_2^{(i)}(t+1) - N_2^{(i)}(t), \\ i &= \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (11)$$



$$\Delta_2^0 = N_2^{(0)}(t+1) - N_2^{(0)}(t) - \Delta N_2^{(0)}(t); \quad (12)$$

$P(t)$ – вектор показателей межотраслевых перемещений, используемых в конкретной балансовой математической модели; матрица $A(t)$ однозначно определяется видом векторов $N(t, t+1)$, $P(t)$.

Сформулируем задачу (7)–(9): найти вектор $P(t)$, удовлетворяющий уравнению (9) и неравенствам (7), (8).

Так как балансовая математическая модель (7)–(9) содержит $2n + 1$ показатель рынка труда и $n^2 + 5n + 1$ (для балансовой модели с уменьшенным уровнем детализации) или $2n^2 + 4n + 1$ (для детализированной балансовой модели) показателей межотраслевых перемещений, то задача (7)–(9) является некорректно поставленной. Метод её решения был рассмотрен ранее [28].

2. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РЫНКА ТРУДА НА ОСНОВЕ ОБЩИХ ВНУТРИОТРАСЛЕВЫХ ТРЕНДОВ

Под задачей прогнозирования показателей рынка труда подразумевается вычисление значений $N_j^{(i)}(t_0 + k + 1)$ по известным значениям показателей $N_j^{(i)}(t)$, $t = \overline{t_0, t_0 + k}$, $j = 1, 2$, $i_1 = \overline{1, n}$, $i_2 = \overline{0, n}$. Здесь $[t_0, t_0 + k]$ – период основания прогноза, $k + 1$ – длина периода основания прогноза.

2.1. Подходы к прогнозированию показателей рынка труда

Рассмотрим следующие подходы к прогнозированию:

1) непосредственно по показателям: значение каждого показателя $N_j^{(i)}(t_0 + k + 1)$ вычисляется по значениям этого же показателя посредством выбора и экстраполяции его тренда за период основания прогноза; для показателя выбирается тот тренд, который обеспечивает наилучшее качество его прогноза в год $t_0 + k$ по значениям этого же показателя в годы $t = \overline{t_0, t_0 + k - 1}$; $j = 1, 2$, $i_1 = \overline{1, n}$, $i_2 = \overline{0, n}$;

2) на основе балансовой модели (7)–(9) с уменьшенным уровнем детализации межотраслевых потоков ($P_4^{(k_1, k_2)}(t) = 0$, $k_1, k_2 = \overline{1, n}$, $k_1 \neq k_2$);

3) на основе детализированной балансовой модели (7)–(9).

В работе [26] предложены подходы к прогнозированию с помощью балансовой математической модели, основанные на определении тренда каждого показателя межотраслевых перемещений вне зависимости от трендов других показателей межотраслевых перемещений. В настоящей работе подходы, в которых используется балансовая математическая модель, основаны на выделении групп показателей межотраслевых перемещений, у которых могут быть общие тренды.

Приведём схему реализации данных подходов.

1. Этап предварительного получения данных.

Решим k задач (7)–(9) для значений $t = \overline{t_0, t_0 + k - 1}$, получим векторы $P(t)$, $t = \overline{t_0, t_0 + k - 1}$.

2. Этап верификации. Выбирается оптимальный вид тренда каждого показателя межотраслевых перемещений (из N заранее определённых видов линий тренда).

Критерий выбора трендов. В случае общих внутриотраслевых трендов для группы показателей межотраслевых перемещений, детализирующих показатель $N_j^{(i)}(t)$, выбирается тот вид тренда (с номером K), который обеспечивает наименьшее отклонение прогнозной величины $N_{j, \text{пр}}^{(i)}(t_0 + k)$ от её фактического значения $N_j^{(i)}(t_0 + k)$, $j = 1, 2$, $i_1 = \overline{1, n}$, $i_2 = \overline{0, n}$. Величина $N_{j, \text{пр}}^{(i)}(t_0 + k)$ вычисляется по значениям:

– соответствующей компоненты вектора

$$N_{\text{пр}}(t_0 + k - 1, t_0 + k) = A(t_0 + k - 1) P_{\text{пр}}(t_0 + k - 1),$$

где вектор $P_{\text{пр}}(t_0 + k - 1)$ получен экстраполяцией векторов $P(t)$, $t = \overline{t_0, t_0 + k - 2}$, с помощью тренда K ;

– величины $N_j^{(i)}(t_0 + k - 1)$.

В общем случае при вычислении прогнозов различных показателей рынка труда для одних и тех же показателей межотраслевых перемещений могут быть выбраны различные виды линий тренда.

Формальная запись этапа верификации выглядит следующим образом.

2.1. Используя тип тренда с номером i , вычислим вектор $P_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k - 1)$, $i = \overline{1, N}$, экстраполируя временных рядов, образованных компонентами векторов $P(t)$, $t = \overline{t_0, t_0 + k - 2}$.

2.2. С помощью формулы (9) определим различные прогнозы показателей рынка труда в год

$t_0 + k$ на основе вычисленных векторов $P_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k - 1)$, $i = \overline{1, N}$:

$$N_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k - 1, t_0 + k) = A(t_0 + k - 1)P_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k - 1).$$

2.3. Определим функцию $\alpha: \{1, \dots, 2n + 1\} \rightarrow \{1, \dots, N\}$, сопоставляющую каждому показателю рынка труда линию тренда, которая позволяет экстраполировать показатели межотраслевых перемещений так, чтобы обеспечить наилучшее качество прогноза данного показателя. В этом случае для $i \in \{1, \dots, 2n + 1\}$

$$\begin{aligned} \alpha(i) = K_i \Leftrightarrow & \|S_i(N(t_0 + k - 1, t_0 + k) - \\ & - N_{\text{пр}}^{(K_i)}(t_0 + k - 1, t_0 + k))\|_{2, 2n+1} \leq \\ & \|S_i(N(t_0 + k - 1, t_0 + k) - \\ & - N_{\text{пр}}^{(j)}(t_0 + k - 1, t_0 + k))\|_{2, 2n+1}, \\ & \forall j \in \{1, \dots, N\}, \end{aligned}$$

где $\|\cdot\|_{2, 2n+1}$ – евклидова норма в \mathbb{R}^{2n+1} ; матрица S_i имеет следующий блочный вид:

$$S_i = \begin{pmatrix} \Theta_{i-1, i-1} & \Theta_{i-1, 1} & \Theta_{i-1, 2n+1-i} \\ \Theta_{1, i-1} & 1 & \Theta_{1, 2n+1-i} \\ \Theta_{2n+1-i, i-1} & \Theta_{2n+1-i, 1} & \Theta_{2n+1-i, 2n+1-i} \end{pmatrix},$$

где Θ_{i_1, i_2} – нулевая матрица размера $i_1 \times i_2$. Тогда i -я компонента вектора $H = S_i(N(t, t+1) - N_{\text{пр}}^{(K_i)}(t, t+1))$ равна i -й компоненте разности $N(t, t+1) - N_{\text{пр}}^{(K_i)}(t, t+1)$, остальные компоненты вектора H – нули.

Таким образом, получено сопоставление показателей рынка труда с типом тренда детализирующих их показателей межотраслевых перемещений. Результаты верификации используются далее.

3. Этап прогнозирования. Вычислим прогнозные значения каждого показателя рынка труда, используя векторы экстраполированных показателей межотраслевых перемещений. Для каждого показателя рынка труда экстраполяция показателей межотраслевых перемещений осуществляется типом тренда, сопоставленным с данным показателем на предыдущем шаге алгоритма.

Формальная запись этапа прогнозирования.

3.1. Используя тип тренда с номером i , вычислим вектор $P_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k)$, $i = \overline{1, N}$, экстраполяцией компонент векторов $P(t)$, $t = \overline{t_0, t_0 + k - 1}$.

3.2. Используя функцию $\alpha(i)$, определим вектор прогнозных значений показателей рынка труда

$$\begin{aligned} N_{\text{пр}}(t_0 + k, t_0 + k + 1) = \\ = \sum_{i=1}^{2n+1} S_i A(t_0 + k) P_{\text{пр}}^{(\alpha(i))}(t_0 + k). \end{aligned} \quad (13)$$

3.3. Прогноз показателей рынка труда вычислим по формулам (11), (12) из выражений (10), (13):

$$\begin{aligned} N_j^{(i)}(t_0 + k + 1) = & (N_{\text{пр}}(t_0 + k, t_0 + k + 1))_{i+(j-1)n} + \\ & + N_j^{(i)}(t_0 + k), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = 1, 2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} N_2^{(0)}(t_0 + k + 1) = & (N_{\text{пр}}(t_0 + k, t_0 + k + 1))_{2n+1} + \\ & + N_2^{(0)}(t_0 + k) + \Delta N_{2, \text{пр}}^{(0)}(t_0 + k), \end{aligned} \quad (15)$$

где $(N_{\text{пр}}(t_0 + k, t_0 + k + 1))_i$ – i -я компонента вектора $N_{\text{пр}}(t_0 + k, t_0 + k + 1)$; $\Delta N_{2, \text{пр}}^{(0)}(t_0 + k)$ – приток трудовых ресурсов на исследуемый рынок в течение года $t_0 + k + 1$, который может быть вычислен экстраполяцией значений $\Delta N_2^{(0)}(t)$, $t = \overline{t_0, t_0 + k - 1}$ (ранее [28] было показано, что прогноз показателей отраслевой занятости устойчив к отклонениям величины $\Delta N_{2, \text{пр}}^{(0)}(t_0 + k)$ от $\Delta N_2^{(0)}(t_0 + k)$).

Предложенная схема позволяет получать прогнозы показателей отраслевой занятости и безработицы по значениям этих показателей за период основания прогноза. При этом учитываются тренды показателей межотраслевых перемещений трудовых ресурсов на рынке труда.

2.2. Апробация и валидация схемы прогнозирования на статистических данных рынка труда Российской Федерации в 2006–2016 гг.

Согласно действовавшему до 2017 г. классификатору ОКВЭД-1 рынок труда РФ состоял из следующих 12-ти укрупнённых групп отраслей: № 1 – сельское и лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство; № 2 – добыча полезных ископаемых



мых; № 3 – обрабатывающие производства; № 4 – производство и распределение электроэнергии, газа и воды; № 5 – строительство; № 6 – оптовая и розничная торговля, ремонт автотранспортных средств, мотоциклов, бытовых изделий и предметов личного пользования, гостиницы и рестораны; № 7 – транспорт и связь; № 8 – финансовая деятельность, операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг; № 9 – государственное управление и обеспечение военной безопасности, социальное обеспечение; № 10 – образование; № 11 – здравоохранение и предоставление социальных услуг; № 12 – другие виды экономической деятельности.

Используя данные, предоставляемые Федеральной службой государственной статистики [29], по значениям показателей рынка труда РФ в 2006–2015 гг. построим прогнозы показателей отраслевой занятости на данном рынке в 2011–2016 гг.; длина периода основания каждого прогноза – пять лет.

В качестве возможных трендов временных рядов показателей здесь и далее в работе будем рассматривать константный, линейный и нелинейный тренды [27]. Эмпирически установлено, что тренд вида $f(t) = c_1 + c_2\sqrt{t} + c_3t$ в среднем обеспечивает лучшее качество экстраполяции показателей межотраслевых перемещений рынка труда РФ 2006–2011 гг. по сравнению с квадратичным, логарифмическим, степенным и экспоненциальным трендами, в связи с чем в качестве используемого в

схеме прогнозирования нелинейного тренда выбран $f(t)$.

Результаты прогнозирования представлены в виде таблицы надёжности (табл. 1): в настоящей работе прогноз считается ненадёжным тогда и только тогда, когда погрешность прогноза больше 2%. Ненадёжные прогнозы обозначены цифрой 1, надёжные – цифрой 0. Строки таблицы соответствуют номеру отрасли рынка труда РФ, столбцы – номеру подхода (см. начало п. 2.1), который применялся для прогнозирования занятости в данной отрасли.

Таким образом, с помощью подходов к прогнозированию непосредственно по показателям рынка труда, на основе балансовой модели с уменьшенным уровнем детализации, на основе детализированной балансовой модели было получено соответственно 29, 25 и 28 ненадёжных прогнозов.

Для рассмотренного рынка труда в случае, когда для каждого показателя межотраслевых перемещений тренд устанавливается по отдельности независимо от трендов других показателей [26], надёжность прогноза на основе балансовой модели с уменьшенным уровнем детализации и на основе детализированной балансовой модели характеризовалась соответственно 13-ю и 11-ю ненадёжными прогнозами, что превосходит показатели надёжности, полученные для случая общих внутриотраслевых трендов на основе этих же балансовых математических моделей (25 и 28 соответственно).

Таблица 1

Надёжность прогнозов показателей 12-отраслевой структуры занятости на рынке труда Российской Федерации в 2011–2016 гг.

№ отрасли	2011 г.			2012 г.			2013 г.			2014 г.			2015 г.			2016 г.		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
6	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1
9	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
10	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
11	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0
12	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0
Σ	7	4	4	5	5	7	5	8	6	4	3	5	2	4	4	6	1	2

2.3. Прогнозирование отраслевой занятости рынка труда Российской Федерации в конце 2022 г.

Таблица 2

С 2017 г. согласно классификатору ОКВЭД-2 рынок труда РФ содержит 20 отраслей (исключая деятельность экстерриториальных организаций): № 1 – сельское и лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство; № 2 – добыча полезных ископаемых; № 3 – обрабатывающие производства; № 4 – обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха; № 5 – водоснабжение; водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений; № 6 – строительство; № 7 – торговля оптовая и розничная; ремонт автотранспортных средств и мотоциклов; № 8 – транспортировка и хранение; № 9 – деятельность гостиниц и предприятий общественного питания; № 10 – деятельность в области информации и связи; № 11 – деятельность финансовая и страховая; № 12 – деятельность по операциям с недвижимым имуществом; № 13 – деятельность профессиональная, научная и техническая (без учёта научных исследований и разработок); № 14 – научные исследования и разработки; № 15 – деятельность административная и сопутствующие дополнительные услуги; № 16 – государственное управление и обеспечение военной безопасности; социальное обеспечение; № 17 – образование; № 18 – деятельность в области здравоохранения и социальных услуг; № 19 – деятельность в области культуры, спорта, организации досуга и развлечений; № 20 – предоставление прочих видов услуг.

Применим рассмотренные в п. 2.1 подходы для получения прогноза показателей отраслевой структуры рынка труда в 2022 г., используя в качестве периода основания прогноза 2017–2021 гг. Результаты прогноза приведены в табл. 2; использовались подходы к прогнозированию: 1 – непосредственно по показателям, 2 – на основе балансовой математической модели с уменьшенным уровнем детализации; 3 – на основе детализированной балансовой математической модели.

Из табл. 2 видно, что наибольшая абсолютная величина разности значений прогнозов занятых, полученных для одной отрасли с помощью разных подходов, равняется 500,76 тыс. чел. (отрасль № 7; подходы 2 и 3), наибольшая величина разности относительно среднего прогнозируемого значения – 5,91 % (отрасль № 6; подходы 1 и 2). Таким образом, для подходов к прогнозированию, основанных на критерии выбора общих внутриотраслевых трендов показателей межотраслевых переме-

Прогнозы отраслевой занятости для рынка труда РФ в конце 2022 г., тыс. чел.

№ отрасли	Подходы к прогнозированию		
	1	2	3
1	4 490,60	4 415,15	4 525,81
2	11 64,18	1 128,94	1 141,79
3	9 974,40	10 199,10	10 007,60
4	1 583,00	1 551,72	1 571,58
5	708,80	692,27	693,90
6	6 392,16	6 780,43	6 523,50
7	13 236,30	13 677,49	13 176,74
8	5 672,68	5 786,95	5 755,62
9	1 840,48	1 878,01	1 836,16
10	1 592,43	1 583,03	1 613,71
11	1 263,18	1 257,77	1 242,46
12	1 899,50	1 943,15	1 866,99
13	1 942,30	2 053,27	1 939,61
14	753,04	733,95	755,70
15	2 036,12	2 073,33	2 077,08
16	3 638,20	3 606,33	3 633,87
17	5 320,70	5 279,67	5 259,30
18	4 483,72	4 463,71	4 417,04
19	1 144,80	1 137,59	1 138,65
20	1 583,60	1 571,87	1 562,26
Σ	70 720,19	71 813,71	70 739,36

щений (и показателей рынка труда), остаётся актуальной задача сопоставления номера отрасли и применяемого для прогнозирования занятости в ней подхода.

Согласно теории прогностики, для получения качественного прогноза показателей рынка труда используются значения этих показателей за период основания прогноза и факторы, формализующие ожидаемое внешнее воздействие на динамику прогнозируемых показателей в течение периода упреждения прогноза [30, 31]. К таким внешним воздействиям относятся управленческие решения, способные оказать значимое влияние на динамику отраслевой структуры рынка труда.

3. УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИКОЙ ОТРАСЛЕВОЙ СТРУКТУРЫ РЫНКА ТРУДА

Эффектом управляющего воздействия будем называть преобразования компонент вектора показателей межотраслевых перемещений трудовых ресурсов вследствие осуществляемого управления. *Результатом управляющего воздействия* – изменения показателей рынка труда.



В п. 2.2 продемонстрировано, что схема прогнозирования, основанная на балансовой математической модели (7)–(9), позволяет получать прогнозы отраслевой занятости, надёжность которых превосходит аналогичные прогнозы, полученные непосредственно по показателям отраслевой структуры рынка труда. Кроме того, рассматриваемая схема является модифицируемой: некоторые варианты схемы позволяют вдвое уменьшить количество ненадёжных прогнозов на конкретных примерах.

В связи с этим применение предложенной схемы может также способствовать увеличению точности прогнозов влияния управляющих воздействий. В данном параграфе рассмотрим подход, позволяющий учитывать управление динамикой отраслевой структуры рынка труда в схеме прогнозирования показателей рынка труда.

3.1. Преобразование показателей межотраслевых перемещений при управляющих воздействиях

Для определения преобразований показателей межотраслевых перемещений при управляющих воздействиях на динамику отраслевой структуры рынка труда введём в рассмотрение переменные: $P_1^{(i,n+2)}(t)$ – вероятность того, что находящийся в конце года t в состоянии $S_2^{(i)}$ работник в конце года $t + 1$ также будет в состоянии $S_2^{(i)}$ (безработный с последним местом занятости в отрасли i останется таким же безработным); $P_4^{(i,i)}(t)$ – вероятность того, что находящийся в конце года t в состоянии $S_1^{(i)}$ работник в конце года $t + 1$ также будет в состоянии $S_1^{(i)}$ (занятый в отрасли i останется занятым в этой же отрасли). В целях обеспечения возможности обобщения преобразований введём дополнительные определения для переменных: $P_1^{(n+i,j)}(t) \stackrel{\text{def}}{=} P_4^{(i,j)}(t)$, $P_1^{(n+i,n+1)}(t) \stackrel{\text{def}}{=} P_3^{(i)}(t)$, $P_1^{(n+i,n+2)}(t) \stackrel{\text{def}}{=} P_2^{(i)}(t)$, $i, j = \overline{1, n}$. Тогда из формул (7), (8) получим:

$$P_1^{(i,j)}(t) \geq 0, \quad j = \overline{1, n+2},$$

$$\sum_{k=1}^{n+2} P_1^{(i,k)}(t) = 1, \quad i = \overline{0, 2n}. \quad (16)$$

Переменные каждого из $(2n + 1)$ -го уравнений в выражении (16) – вероятности событий, образующих полную группу. Вероятности в уравнении i будем называть показателями группы i . Заметим,

что показатели группы i являются характеристиками исходящих потоков из сегмента безработных с последней занятостью в отрасли i ($i \leq n$) или исходящих потоков занятых из $(i - n)$ -й отрасли ($i > n$). Номер отрасли, в которую направлен конкретный исходящий поток трудовых ресурсов, будем называть номером соответствующего показателя группы i (тогда $P_1^{(i,j)}(t)$, $i = \overline{0, 2n}$, $j = \overline{1, n+2}$, $-j$ -й показатель группы i).

Пусть эффектом управляющего воздействия является ожидаемое изменение m_1 показателей межотраслевых перемещений группы i с номерами i_j на $100(k_{i_j} - 1) \%$ (k_{i_j} – коэффициент изменения показателя группы i с номером i_j), $j = \overline{1, m_1}$, $1 \leq m_1 \leq n + 2$. Тогда для $\sum_{j \in L_1} k_j P_1^{(i,j)}(t) \leq 1$, $k_j \geq 0$, $j \in L_1$, где $L_1 = \{i_j | j = \overline{1, m_1}\}$, преобразованные показатели группы i , для которых заданы ожидаемые вследствие управляющего воздействия изменения, определяются следующим образом:

$$\dot{P}_1^{(i,j)}(t) = k_j P_1^{(i,j)}(t), \quad j \in L_1. \quad (17)$$

Отличные от нуля значения показателей группы i , ожидаемые изменения которых вследствие управляющего воздействия не заданы, могут быть определены из равенства отношений преобразованных и преобразуемых значений этих показателей:

$$\frac{\dot{P}_1^{(i,j_1)}(t)}{\dot{P}_1^{(i,j_2)}(t)} = \frac{P_1^{(i,j_1)}(t)}{P_1^{(i,j_2)}(t)}, \quad j_1, j_2 \in L, \quad (18)$$

где $L = \{1, 2, \dots, n+2\} \setminus (L_1 \cup L_2)$, L_2 – множество номеров показателей группы i , которые равны нулю.

Тогда из формул (17), (18) получаем определение значений всех преобразованных показателей группы i :

$$\dot{P}_1^{(i,j)}(t) = \begin{cases} 0, & j \in L_2, \\ \frac{\left(1 - \sum_{j \in L_1} k_j P_1^{(i,j)}(t)\right) P_1^{(i,j)}(t)}{\sum_{j \in L} P_1^{(i,j)}(t)}, & j \in L, \\ k_j P_1^{(i,j)}(t), & j \in L_1. \end{cases} \quad (19)$$

Линейный оператор R , задающий преобразование (19), однозначно определяется: числом i – но-

мером группы показателей; множеством $M = \{(j, k_j) | j \in L_1\}$ – сопоставлениями номеров показателей группы i , для которых заданы ожидаемые изменения, с коэффициентами изменений этих показателей; вектором показателей межотраслевых перемещений $P(t) = (P_1^{(0,1)}(t), \dots, P_1^{(0,n+2)}(t), \dots, P_1^{(2n,1)}(t), \dots, P_1^{(2n,n+2)}(t))$. Матричная форма оператора R имеет вид:

$$R = R(i, M, P(t)) = \text{diag} \left(\underset{(i-1)(n+2)}{1, \dots, 1}, p_1, \dots, p_{n+2}, \underset{(2n-i)(n+2)}{1, \dots, 1} \right),$$

$$\text{где } p_j = \begin{cases} 0, & P_1^{(i,j)}(t) = 0, \\ \frac{\dot{P}_1^{(i,j)}(t)}{P_1^{(i,j)}(t)}, & P_1^{(i,j)}(t) \neq 0. \end{cases}$$

В случае, если эффектом управляющего воздействия является ожидаемое изменение значений показателей в группах с номерами i_j , $j = \overline{1, m}$, оператор R , задающий преобразование вектора показателей межотраслевых перемещений, однозначно определяется: номерами групп показателей i_j , $j = \overline{1, m}$; M_j – множествами сопоставлений номеров показателей с коэффициентами изменений в группах i_j , $j = \overline{1, m}$; вектором $P(t)$ и имеет вид:

$$R = \prod_{j=1}^m R(i_j, M_j, P(t)). \quad (20)$$

3.2. Определение результатов управляющих воздействий

Если управление воздействует на прогноз, определяемый в соответствии с выражениями (13)–(15), тогда линейный оператор R_i (20) должен быть определён для каждого $P_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k)$, $i = \overline{1, N}$ (N – количество рассматриваемых видов тренда), при фиксированных i_j , M_j , $j = \overline{1, m}$:

$$R_i = \prod_{j=1}^m R(i_j, M_j, P_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k)), \quad i = \overline{1, N}. \quad \text{В этом}$$

случае результат управляющего воздействия (прогноз показателей отраслевой занятости) может быть вычислен по формуле (14) из прогнозного вектора показателей рынка труда

$$N_{\text{пр}}(t_0 + k, t_0 + k + 1) = \sum_{i=1}^{2n+1} S_i A(t_0 + k) R_{\alpha(i)} P_{\text{пр}}^{(\alpha(i))}(t_0 + k). \quad (21)$$

В общем случае на момент осуществления управляющего воздействия его эффект не является однозначно установленным. Каждый из L ожидаемых эффектов будем называть сценарием, тогда сценарий с номером l , $l = \overline{1, L}$, определяется ли-

нейными операторами $R_{l,i} = \prod_{j=1}^m R(i_{l,j}, M_{l,j}, P_{\text{пр}}^{(i)}(t_0 + k))$, $i = \overline{1, N}$, и соответствующим ему прогнозным вектором показателей рынка труда $N_{\text{пр},l}(t_0 + k, t_0 + k + 1)$, вычисляемым по формуле (21). Тогда вектор $N_{\text{пр}}(t_0 + k, t_0 + k + 1)$ можно определить как средневзвешенное значений $N_{\text{пр},l}(t_0 + k, t_0 + k + 1)$ с соответствующими им весами ω_l , $l = \overline{1, L}$. Вес ω_l может быть интерпретирован либо как вероятность сценария l , $l = \overline{1, L}$, либо как доля влияния соответствующего этому сценарию эффекта на результирующее влияние управляющего воздействия.

3.3. Влияние управляющих воздействий на прогноз отраслевой занятости в аграрном и промышленном секторах рынка труда РФ в 2022 г.

В качестве примера управляющего воздействия рассмотрим государственное инвестирование в аграрный и промышленный сектора РФ (посредством финансирования программ высшего образования, направленных на подготовку узкоспециализированных работников, и прямых бюджетных ассигнований, направленных на поддержание предприятий секторов) [32–34]. Эти сектора включены в первые пять отраслей в классификаторе ОКВЭД-2.

Определим для данного управляющего воздействия следующие пять сценариев, дифференцированных по отраслям рынка труда РФ, испытывающим эффект управления в течение 2022 г.: увеличение интенсивности потока межотраслевых ресурсов из состояния $S_2^{(0)}$ в состояние $S_1^{(j)}$ вдвое (увеличение числа трудоустроивающихся в отрасли j работников из числа безработных, не имевших занятости на рынке) и двукратное уменьшение интенсивности потока трудовых ресурсов из состояния $S_1^{(j)}$ в состояние $S_2^{(j)}$ (уменьшение числа ра-



ботников, покидающих отрасль j и не получающих трудоустройство в других отраслях), $l = \overline{1,5}$.

Результаты рассматриваемых управляющих воздействий – изменения прогнозов отраслевой занятости на конец 2022 г., полученных с помощью детализированной балансовой математической модели (см. п. 2.3), определим для каждого сценария по формуле (21), где $t_0 + k = 2021$, а $P_{\text{пр}}^{(1)}(2021)$, $P_{\text{пр}}^{(2)}(2021)$, $P_{\text{пр}}^{(3)}(2021)$ – прогнозные векторы, полученные соответственно на основе константного, линейного и нелинейного трендов. Линейные операторы $R_{l,i}$ вида (20), заданные для конкретного сценария l и вида тренда i , $l = \overline{1,5}$, $i = \overline{1,3}$, определяются следующим образом:

$$R_{l,i} = R\left(0, M_{l,1}, P_{\text{пр}}^{(i)}(2021)\right) \times \\ \times R\left(n+l, M_{l,2}, P_{\text{пр}}^{(i)}(2021)\right), l = \overline{1,5}, i = \overline{1,3},$$

где $M_{l,1} = \{(l, \tilde{k})\}$, $M_{l,2} = \{(n+2, 1/\tilde{k})\}$, $\tilde{k} = 2$, $n = 20$ – количество рассматриваемых отраслей рынка.

Для заданных операторов $R_{l,i}$, $i = \overline{1,3}$, вычислим $N_{\text{пр},l}(2021, 2022)$, $l = \overline{1,5}$; каждое из этих значений – вектор прогнозных показателей рынка труда за 2022 г., учитывающий эффект управления сценария l . Прогноз отраслевой занятости для каждого сценария l , вычисленный согласно формуле (14) по значениям $N_{\text{пр},l}(2021, 2022)$, $l = \overline{1,5}$, приведён в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что для сценария l прогнозируемое количество занятых значительно изменяется только в отрасли l , $l = \overline{1,5}$. Оценки весов среднего геометрического (результатирующего влияния управления; см. п. 3.2) полученных прогнозов отраслевой занятости в каждом из сценариев могут быть различными. В случае с аграрным сектором (включён в отрасль № 1) отмечается неоднозначность влияния государственных инвестиций на динамику отраслевой занятости [34]: увеличение числа привлекаемых высококвалифицированных специалистов в отрасль компенсируется снижением общего числа работников в связи с цифровой трансформацией и изменениями технологических укладов [35]. Те же процессы цифровой трансфор-

Таблица 3

Прогнозы отраслевой занятости для рынка труда РФ в конце 2022 г. (тыс. чел.), полученные на основе детализированной балансовой модели для различных сценариев (эффектов управления)

№ отрасли	Сценарий l				
	1	2	3	4	5
1	4 666,44	4 519,90	4 516,47	4 520,14	4 523,12
2	1 138,90	1 226,71	1 136,18	1 138,31	1 140,15
3	10 051,24	10 039,97	10 543,40	10 041,78	10 058,18
4	1 575,46	1 574,99	1 573,76	1 672,87	1 577,56
5	693,63	694,14	693,00	694,16	733,93
6	6 516,41	6 512,62	6 508,91	6 513,49	6 519,01
7	13 161,80	13 148,77	13 143,83	13 151,78	13 166,03
8	5 780,17	5 773,82	5 766,45	5 774,85	5 783,99
9	1 832,88	1 832,56	1 830,03	1 832,64	1 834,44
10	1 615,62	1 615,19	1 611,62	1 615,11	1 617,03
11	1 246,00	1 245,13	1 241,79	1 245,16	1 247,40
12	1 863,43	1 862,64	1 860,15	1 862,82	1 865,01
13	1 936,15	1 935,61	1 933,06	1 935,74	1 937,75
14	755,91	756,33	755,13	756,41	757,25
15	2 081,83	2 081,23	2 079,79	2 081,84	2 084,33
16	3 647,07	3 644,00	3 643,66	3 645,53	3 650,08
17	5 287,04	5 279,88	5 271,08	5 281,02	5 291,53
18	4 440,84	4 434,70	4 426,83	4 435,66	4 444,80
19	1 136,00	1 135,70	1 133,69	1 135,77	1 137,25
20	1 559,94	1 560,62	1 557,57	1 560,33	1 560,97
Σ	70 986,76	70 874,49	71 226,40	70 895,40	70 929,81

магии могут способствовать более равномерному развитию отраслей промышленного сектора [36]. Если в соответствии с приведёнными исследованиями в рамках тестового расчёта первый сценарий рассматривать как невозможный, а веса остальных сценариев принять равными друг другу, то на основе анализа результирующего прогнозируемого влияния рассматриваемого управляющего воздействия можно получить следующие выводы: по сравнению с приведённым прогнозом отраслевой занятости (см. п. 2.3) ожидается:

- значительное увеличение числа занятых работников в отрасли № 2 (на 18,5 тыс. чел.), отрасли № 3 (на 163 тыс. чел. – до уровня 2017 года), отрасли № 4 (на 28 тыс. чел. – до уровня 2019 года), отрасли № 8 (на 19 тыс. чел. – изменяются в том числе прогнозы занятости в отраслях, отличных от тех, прямое воздействие на которые исследовалось в рассматриваемых сценариях) и отрасли № 17 (на 21,5 тыс. чел.);

- уменьшение числа занятых в отрасли № 1 (на 6 тыс. чел.), отрасли № 6 (на 10 тыс. чел.), отрасли № 7 (на 24 тыс. чел.) и отрасли № 12 (на 4,5 тыс. чел.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании приведён и апробирован подход к учёту управляющих воздействий на рынок труда при прогнозировании отраслевых показателей занятости. Эффективность подхода обусловлена надёжностью его составляющих: балансовой математической модели динамики отраслевой структуры рынка и схемы прогнозирования показателей рынка труда, основанной на данной модели.

Показано, что для рынка труда Российской Федерации 2011–2016 гг. в случае независимых друг от друга тенденций показателей межотраслевых перемещений качество прогноза динамики показателей отраслевой занятости лучше по сравнению со случаем, когда виды трендов показателей межотраслевых перемещений, детализирующих один и тот же показатель рынка труда, считаются одинаковыми (общие внутриотраслевые тенденции). Тем не менее, общие внутриотраслевые тенденции могут использоваться в схеме прогнозирования показателей рынка труда для проверки гипотезы об одинаковом виде трендовых линий у группы факторов, сегментирующих конкретный показатель рынка.

Также на рассматриваемом примере схема прогнозирования, основанная на общих внутриотраслевых трендах, показала такую же надёжность, как

подход к прогнозированию непосредственно по показателям рынка труда; при этом для ряда наблюдений (2011 и 2016 г.) предлагаемая схема обеспечивает существенно большую надёжность прогноза. Следовательно, существует группа случаев, когда применение рассмотренного в данной статье подхода к прогнозированию является предпочтительным. Формализация этой группы случаев и оценка того, насколько в данной группе эффективна предложенная схема прогнозирования – цель дальнейших исследований.

Основанный на представленной схеме прогнозирования подход к определению результатов управляющих воздействий на динамику отраслевой структуры рынка труда апробирован для случая, когда эффектом управления является ожидаемое изменение показателей межотраслевых перемещений. На примере рынка труда РФ 2017–2022 гг. показано, как заданные управляющие воздействия на аграрный и промышленный сектора влияют на общий прогноз отраслевой занятости в конце 2022 г.

Таким образом, рассмотренная в работе схема прогнозирования на основе балансовой математической модели и подход к учёту управляющих воздействий, ожидаемое влияние которых на межотраслевую мобильность трудовых ресурсов в течение периода упреждения прогноза известно, образуют методику прогнозирования результатов принятия управленческих решений на динамику отраслевой структуры рынка труда, которая может быть применена для предварительной оценки эффективности и рисков управления. Также применение данной методики может быть обобщено для произвольных многоотраслевых экономических систем, регулирующие действия над которыми могут быть представлены в виде изменений интенсивностей межотраслевых потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьева О.Д., Топилин А.В. Балансовый метод управления занятостью населения в плановой и рыночной экономике России // Научные труды: ИНП РАН. – 2016. – Т. 14. – С. 461–474. [Vorobieva, O.D., Topilin, A.V. Managing employment in Russia's planned and market economies: balance method with employment of the population in Russia's planned and market economies // Nauchnye trudy: INP RAN. – 2016. – Vol. 14. – P. 461–474. (In Russian)]
2. Вахтерова Е.О., Гоман И.В. Государственное регулирование рынка труда // Вестник Самарского государственного университета. Сер.: Экономика и управление. – 2014. – № 8 (119). – С. 168–171. [Vakhterova, E.O., Goman, I.V. State regulation of labor market // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika i upravlenie. – 2014. – No. 8 (119). – P. 168–171. (In Russian)]



3. Панкратьев А.А. Модель сбалансирования рынка труда как инструмент смягчения дефицита кадров на производстве // Организатор производства. – 2019. – Т. 27, № 4. – С. 7–18. [Pankratiev, A.A. Model balancing the labour market as a tool to mitigate the labour shortage in the manufacturing // Organizer of production. – 2019. – Vol. 27, no. 4. – P. 7–18. (In Russian)]
4. Токарский Б.Л., Нефедьева Е.И., Змановский И.С. Занятость трудовой деятельностью и ее прогноз как фактор формирования качества жизни населения // Известия Иркутской государственной экономической академии: электронный научный журнал. – 2010. – № 6. – С. 1–8. [Tokarskiy, B.L., Nefediyeva, E.I., Zmanovskiy, I.S. Employment and its forecast as factor of forming population's life quality // Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy. – 2010. – No. 6. – P. 1–8. (In Russian)]
5. Нефедова Т.Г., Мкртчян Н.В. Региональные различия размещения и прогноза трудовых ресурсов сельского хозяйства России // Проблемы прогнозирования. – 2018. – № 1 (166). – С. 85–98. [Nefedova, T.G., Mkrtychyan, N.V. regional differences of placing and forecasting labor resources of Russian agriculture // Studies on Russian Economic Development. – 2018. – Vol. 29, no. 1. – P. 62–71.]
6. Питухин Е.А., Мороз Д.М., Астафьева М.П. Прогнозирование кадровых потребностей региональной экономики в разрезе профессий // Экономика и управление. – 2015. – Т. 7, № 117. – С. 41–49. [Pitukhin, E.A., Moroz, D.M., Astafyeva, M.P. Forecast of personnel needs by occupation for the regional economy // Economics and Management. – 2015. – Vol. 7, no. 117. – P. 41–49. (In Russian)]
7. Позубенкова Э.И., Кузнецова Е.В. Прогнозная модель управленческого кадрового состава сельского хозяйства Пензенской области // Нива Поволжья. – 2008. – Т. 1, № 6. – С. 82–85. [Pozubenkova, E.I., Kuznetsova, E.V. Prognostnaya model' upravlencheskogo kadrovogo sostava sel'skogo hozyajstva Penzenskoj oblasti // Niva Povolzh'ya. – 2008. – Vol. 1, no. 6. – P. 82–85. (In Russian)]
8. Cahuc, P., Malherbet, F., Prat, J. The detrimental effect of job protection on employment: evidence from France. IZA Discussion paper no. 12 384. – Bonn: IZA – Institute of Labor Economics, 2019. – 51 p.
9. Ernst, E., Merola, R., Reljic, J. Labour market policies for inclusiveness: A literature review with a gap analysis. ILO Working Paper no. 78. – Geneva: International Labour Organization, 2022. – 64 p.
10. Стрижов Е.В. Государственное регулирование структурных сдвигов в экономике // Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. – 2011. – № 2 (40). – С. 26–28. [Strizhov, E.V. State regulation of structural shifts in economy // Scientific notes of Orel state university. – 2011. – No. 2 (40). – P. 26–28. (In Russian)]
11. Коровкин А.Г., Долгова И.Н., Королев И.Б. и др. Занятость и рынок труда в России: проблемы и ограничения // Проблемы прогнозирования. – 2005. – № 5. – С. 119–142. [Korovkin, A.G., Dolgova, I.N., Korolev, I.B., et al. Employment and the labor market in russia: problems and limitations // Studies on Russian Economic Development. – 2005. – Vol. 16, No. 5. – P. 510–524.]
12. Субанаква Т.О., Бюраева Ю.Г. Прогнозирование кадровых потребностей как метод достижения сбалансированности рынка труда и системы образования // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. – 2018. – № 3. – С. 36–55. [Subanakova, T.O., Byuraeva, Yu.G. Forecasting recruitment needs as a method of achieving a balance of the labour market and the education system // Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Social'no-ekonomicheskie nauki. – 2018. – No. 3. – P. 36–55. (In Russian)]
13. Рудь М.А., Рудь Е.М., Кубасова И.В. Государственное регулирование рынка труда в России // Вестник Саратовского государственного социально-экономического университета. – 2007. – № 1 (15). – С. 170–173. [Rud', M.A., Rud', E.M., Kubasova, I.V. Gosudarstvennoe regulirovanie rynka truda v Rossii // Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo social'no-ekonomicheskogo universiteta. – 2007. – No. 1(15). – P. 170–173. (In Russian)]
14. Рахимова С.А. Структурные сдвиги в экономике, основанные на инновационном процессе // Вестник Томского государственного университета. Экономика. – 2016. – № 3 (35). – С. 41–52. [Rakhimova, S.A. Structural shifts in economy through formation and development of high-tech types of production based on the innovation process // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. – 2016. – No. 3 (35). – P. 41–52. (In Russian)]
15. Змановский И.С. Прогнозирование на различных уровнях регулирования рынка труда // Известия Иркутской государственной экономической академии: электронный научный журнал. – 2011. – № 4. – С. 1–6. [Zmanovskiy, I.S. Forecasting at various levels of labor market regulation // Izvestiya of Irkutsk State Economics Academy. – 2011. – No. 4. – P. 1–6. (In Russian)]
16. Стукен Т.Ю., Лапина Т.А., Коржова О.С. Методы и инструменты оценки эффективности активной политики занятости в регионах // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 120–130. [Stuken, T.Yu., Lapina, T.A., Korzhova, O.S. Methods and tools for assessing the effectiveness of regional active labor market policy // Herald of Omsk University. Series «Economics». – 2021. – Vol. 19, no. 1. – P. 120–130. (In Russian)]
17. Голованова Л.А. Методический подход к регулированию регионального рынка труда // Вестник ТОГУ. – 2020. – № 2 (57). – С. 47–56. [Golovanova, L.A. Methodical approach to regulation of the regional labor market // Bulletin of PNU. – 2020. – No. 2 (57). – P. 47–56. (In Russian)]
18. Кочетков В.В., Ратушняк Е.С. Показатели оценки эффективности управления // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2017. – № 3(97). – С. 1–20. [Kochetkov, V.V., Ratushnyak, E.S. Pokazateli ocenki effektivnosti upravleniya // Upravlenie ekonomicheskimi sistemami: elektronnyj nauchnyj zhurnal. – 2017. – No. 3(97). – P. 1–20. (In Russian)]
19. Лотов А.В. Введение в экономико-математическое моделирование. – М.: Наука, 1984. – 392 с. [Lotov, A.V. Introduction to economic and mathematical modeling. – Moscow: Nauka, 1984. – 392 s. (In Russian)]
20. Armstrong, J.S. Forecasting for marketing / In: Quantitative methods in marketing. Second Edition. Ed. by G.J. Hooley and M.K. Hussey. – London: International Thompson Business Press, 1999. – P. 92–119.
21. Прогнозирование и планирование в условиях рынка: учебное пособие для вузов / под ред. Т.Г. Морозовой, А.В. Пиккулькина. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 279 с.

- [*Prognozirovanie i planirovanie v usloviyah rynka: uchebnoe posobie dlya vuzov / pod red. T.G. Morozovoj, A.V. Pikul'kina.* – М.: YUNITI-DANA, 2003. – 279 s. (In Russian)]
22. *Forrester, J.W.* Counterintuitive behavior of social systems // *Theory and Decision.* – 1971. – Vol. 2. – P. 109–140.
23. *Taleb, N.N.* The black swan. The impact of highly improbable. – London: Penguin Books, 2010. – 446 p.
24. *Кузьмин В.В., Кузнецов С.Г., Кулагина Н.М., Попов А.Д.* Проблемы прогнозирования параметров занятости и рынка труда // *Научные труды: ИНП РАН.* – 2010. – Т. 8. – С. 703–726. [*Kuzmin, V.V., Kuznetsov, S.G., Kulagina, N.M., Popov, A.D.* Parameters of employment and labor market: problems of forecasting // *Nauchnye trudy: INP RAN.* – 2010. – Vol. 8. – P. 703–726. (In Russian)]
25. *Невечеря А.П.* Задача прогнозирования динамики трудовых ресурсов // *Материалы II международной конференции «Наука. Новое поколение. Успех».* – Краснодар, 2021. – С. 24–26. [*Nevecherya, A.P.* Labor resources dynamics forecasting problem // *Materialy II mezhdunarodnoj konferencii «Наука. Новое поколение. Успех».* – Krasnodar, 2021. – P. 24–26. (In Russian)]
26. *Дроботенко М.И., Невечеря А.П.* Прогнозирование отраслевой структуры занятости населения // *Экономика и математические методы.* – 2023. – Т. 59, № 1. – С. 22–29. [*Drobotenko, M.I., Nevecherya, A.P.* Forecasting the sectoral structure of population employment // *Economics and mathematical methods.* – 2023. – Vol. 59, no. 1. – P. 22–29. (In Russian)]
27. *Дроботенко М.И., Невечеря А.П.* Прогнозирование динамики трудовых ресурсов на многоотраслевом рынке труда // *Компьютерные исследования и моделирование.* – 2021. – Т. 13, № 1. – С. 235–250. [*Drobotenko, M.I., Nevecherya, A.P.* Forecasting the labor force dynamics in a multisectoral labor market // *Computer Research and Modeling.* – 2021. – Vol. 13, no. 1. – P. 235–250. (In Russian)]
28. *Невечеря А.П.* Исследование динамики трудовых ресурсов на основе многоотраслевой математической модели рынка труда // *Экономика и математические методы.* – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 129–140. [*Nevecherya, A.P.* Analysis of labor force dynamics in intersectoral mathematical model of the labor market // *Economics and mathematical methods.* – 2016. – Vol. 52, no. 2. – P. 129–140. (In Russian)]
29. *Российский статистический ежегодник. 2022: статистический сборник / под ред. С.С. Галкина, С.Н. Бобылева, Е.А. Бурлаковой и др.* – М.: Росстат, 2022 – 691 с. [*Russian statistical yearbook. 2022: statistical handbook / pod red. S.S. Galkina, S.N. Bobyleva, E.A. Burlakovoj, et al.* – Moscow: Rosstat, 2022. – 691 s. (In Russian)]
30. *Anahita, S.* Workforce forecasting models: a systematic review // *Journal of forecasting.* – 2018. – Vol. 37, no. 7. – P. 739–753.
31. *Forecasting: principles and practice. 3rd ed. Ed. by R. Hyndman, G. Athanasopoulos.* – Melbourne: OTexts, 2021. – 292 p.
32. *Зверева Г.П., Яковлев Н.А.* Оценка инвестиций в формировании трудового потенциала для аграрного сектора экономики // *Инновации и инвестиции.* – 2019. – № 12. – С. 306–309. [*Zvereva, G.P., Yakovlev, N.A.* Assessment of investments in the formation of labor potential for the agricultural sector of the economy // *Innovation & Investment.* – 2019. – No. 12. – P. 306–309. (In Russian)]
33. *Ибяттов Ф.М., Мачульский М.А.* Реализация государственной политики в сфере субсидирования промышленных предприятий // *Вестник университета.* – 2020. – № 4. – С. 63–69. [*Ibyatov, F.M., Machul'skii, M.A.* Implementation of state policy in the field of subsidizing industrial enterprises // *Vestnik Universiteta.* – 2020. – No. 4. – P. 63–69. (In Russian)]
34. *Никулина Ю.Н.* Влияние аграрных субсидий на сельскую занятость // *Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий.* – 2020. – № 4. – С. 53–62. [*Nikulina, Yu.N.* Influence of agricultural subsidies on rural employment // *Economy of agricultural and processing enterprises.* – 2020. – No. 4. – P. 53–62. (In Russian)]
35. *Шагайда Н.И., Узун В.Я.* Тенденции развития и основные вызовы аграрного сектора России: аналитический доклад. – М.: Центр стратегических разработок, 2017. – 90 с. [*Shagaida, N., Uzun, V.* Development tendencies and challenges of Russian agriculture. – Moscow: Center for Strategic Research, 2017. – 90 p. (In Russian)]
36. *Astafyeva, O.E., Moiseenko, N.A., Kozlovsky, A.V.* Digitalization of the construction industry as a condition for sustainable development // *Proceedings of the International Scientific Conference «Smart nations: global trends in the digital economy».* – Moscow, 2022. – P. 379–385.

Статья представлена к публикации членом редколлегии
С.В. Ратнер.

Поступила в редакцию 28.08.2023,
после доработки 25.11.2023.
Принята к публикации 18.12.2023.

Невечеря Артём Павлович – преподаватель, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», Краснодар,
✉ artiom1989@mail.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6736-4691>

Попова Елена Витальевна – д-р экон. наук, канд. физ.-мат. наук, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», Краснодар,
✉ elena-popov@yandex.ru,
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8533-6897>

© 2024 г. Невечеря А. П., Попова Е. В.



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



FORECASTING THE IMPACT OF CONTROL ACTIONS ON THE SECTORAL STRUCTURE DYNAMICS OF A LABOR MARKET BASED ON THE BALANCE MATHEMATICAL MODEL

A. P. Nevecherya* and E. V. Popova**

*Kuban State University, Krasnodar, Russia

**Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

*✉ artiom1989@mail.ru, **✉ elena-popov@yandex.ru

Abstract. This paper proposes an approach to considering control actions on the sectoral structure dynamics of a labor market when forecasting sectoral employment indicators. The forecasting scheme is based on the balance mathematical model of inter-sectoral labor resource movements. In the forecasting scheme considered previously, the trends of indicators characterizing inter-sectoral labor force mobility were determined independently of each other. In what follows, this forecasting scheme is modified by introducing a grouping method for the indicators of inter-sectoral labor resource movements and a criterion for determining the general trend of indicators within each group. The modified forecasting scheme is applied to calculate sectoral employment forecasts for the labor market of the Russian Federation in 2011–2016, and the forecasts are compared with the previous results. The expected employment rate is forecasted for the end of 2022 using sectoral employment and unemployment data for 2017–2021 according to the second edition of the All-Russian Classifier of Types of Economic Activity (OKVED). A method for determining the result of control actions is presented on an example of the Russian Federation labor market in 2017–2022: changes in the sectoral employment forecasts are demonstrated in the case of considering control actions on the agricultural and industrial sectors of the market.

Keywords: the sectoral structure of a labor market, balance mathematical model, inter-sectoral labor resource movements, control actions, the effect of control actions, employment forecasting, labor market.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ ОБСТОЯТЕЛЬСТВ В УПРАВЛЕНИИ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Е. В. Варюхина*, В. В. Клочков**

***ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», г. Жуковский,
**Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва

*✉ e.varyukhina@yandex.ru, **✉ vlad_klochkov@mail.ru

Аннотация. Предложен подход к оценке эффективности интеллектуальных технологий выявления опасных сочетаний обстоятельств в авиатранспортных системах. Формализовано влияние таких технологий на безопасность полетов и общую стоимость владения авиационной техникой. Разработана простая модель оценки эффективности внедрения интеллектуальных технологий (для выявления единичной скрытой проблемы). Качественный анализ этой модели позволил выявить роль различных ее параметров – таких как численность и налет парка авиационной техники, длительность и стоимость устранения системной проблемы, ущерб от событий различной степени серьезности. Также предложен подход к моделированию процессов выявления и устранения опасных сочетаний обстоятельств на протяжении жизненного цикла авиатранспортных систем с учетом эффекта обучения. Этот эффект состоит в том, что при накоплении опыта функционирования авиатранспортной системы и постепенном устранении скрытых системных проблем интенсивность их проявления со временем сокращается. Основным параметром, характеризующим интеллектуальные технологии выявления скрытых закономерностей в обстоятельствах инцидентов, является показатель относительного ускорения их выявления. Оба вида моделей позволяют в конечном счете оценить зависимость ожидаемых потерь от данного обобщающего параметра. Также важны зависимости результатов модельных расчетов от прочих параметров предложенных моделей, в том числе от длительности и стоимости устранения выявленных проблем, ущерба от различных событий, численности и налета парка авиационной техники. Показано, что технологии интеллектуального анализа данных максимально эффективны в авиатранспортной системе при малой численности парка воздушных судов и при низких интенсивностях их эксплуатации.

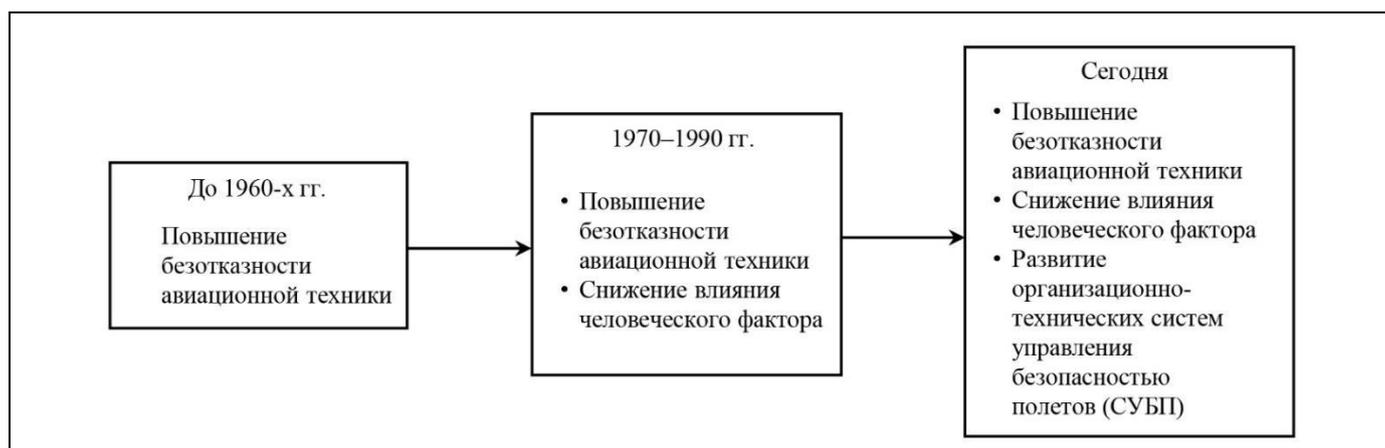
Ключевые слова: безопасность полетов, скрытые опасности, интеллектуальные технологии.

ВВЕДЕНИЕ

Эволюция подходов к управлению безопасностью полетов (БП), отраженная не только в научных работах, но и в поэтапном изменении руководящих документов ИКАО, представляет собой перенос фокуса внимания с повышения безотказности авиационной техники (АТ) в 1950–1960-х гг. к снижению влияния человеческого фактора в 1970–

1980-е гг. (см. рисунок) Приблизительно с начала 2010-х гг., помимо надежности АТ и человеческого фактора, учитываются организационные факторы и в целом сложность больших организационно-технических систем [1, 2].

Работы, касающиеся повышения БП путем развития организационных аспектов, активно ведутся рядом ученых. Например, в статьях [3, 4] рассматривается применение модели «дерева развития



Эволюция подходов к обеспечению безопасности полетов в гражданской авиации

авиационного события» для превентивного управления риском. В работе [5] для учета информации из добровольных сообщений сотрудников, связанных со спецификой деятельности конкретной авиакомпании, применение модели «дерева развития авиационного события» дополняется байесовским подходом. Разрабатываются системы прогнозирования авиационных происшествий, основанные на описанных выше методах [6].

В работах [7–9] предлагается рассматривать аварии как следствия критических сочетаний событий, которые могут быть вызваны отказами воздушных судов (ВС), преднамеренными нарушениями инструкций персоналом, внешними воздействиями. Сами по себе данные события могут быть не опасны, но их совокупность может быть критичной. Используются модели деревьев событий, минимальные сечения которых рассматриваются как модели критических сочетаний событий, для которых определяют вероятности реализации тех или иных сочетаний. Разрабатываются подходы для обеспечения БП в авиатранспортных системах (АТС), которые анализируют вероятности возникновения критических сочетаний событий [10]. Проведенный в работе [11] анализ показал, что причины авиационных происшествий (АП) как следствие ошибок персонала и отказов техники имеют системный, а не случайный характер. Исследуются возможности расширения использования звукового канала для ввода и вывода информации, в том числе для систем навигации и управления самолета, а также контроля его состояния [12].

Однако АТС (которая включает в себя такие взаимодействующие элементы, как изделия АТ, объекты инфраструктуры гражданской авиации, авиационный персонал) – крупномасштабная, сложная и многосвязная система. Поэтому ее не-

возможно точно смоделировать и изначально оптимально спроектировать (с учетом критериев БП и целевой эффективности). В любой реальной АТС в той или иной степени имеют место системные проблемы обеспечения безопасности авиационной деятельности, в том числе:

- конструктивно-производственные недостатки (КПН) АТ и объектов инфраструктуры;
- системные недостатки в сфере подготовки и поддержания квалификации авиационного персонала (т. е. аналоги КПН в этой сфере);
- системные недостатки в сфере организации эксплуатации АТ и объектов инфраструктуры, организации работы авиационного персонала.

Потенциально они могут быть причинами возникновения инцидентов различной степени серьезности и АП. В то же время указанные проблемы носят системный характер и непосредственно далеко не всегда очевидны. Сначала они являются скрытыми, поскольку изначально при создании элементов АТС все-таки учитывались требования обеспечения безопасности, поэтому очевидно неэффективные конструктивные, технологические, организационные решения просто не были бы приняты. Неочевидные проблемы и противоречия в части обеспечения безопасности выявляются уже в процессе функционирования АТС, эксплуатации АТ и т. п. Опыт развития авиации и авиастроения во всем мире, опыт реальной работы по повышению безопасности авиационной деятельности свидетельствует о том, что это повышение и достигается в значительной степени благодаря постепенному выявлению и устранению скрытых проблем. Причем в идеале это выявление должно происходить по возможности не в ответ на уже реализовавшиеся опасности с последствиями серьезного уровня (реактивный принцип управления безопасностью), а наоборот, на основе превентивного ана-

лиза предпосылок к таким опасным ситуациям (проактивный принцип, более эффективный с точки зрения сохранения жизни и здоровья людей, а также с экономической точки зрения).

В 2000-е гг. происходит бурное развитие интеллектуальных технологий, нацеленных на повышение безопасности полетов. Это связано с ускоряющимся развитием интеллектуальных методов анализа данных и тенденцией повышения требуемого уровня БП. На сегодняшний день актуальными задачами, которые можно решать с помощью интеллектуальных технологий, являются следующие задачи для повышения БП:

- распознавание элементов взлетно-посадочных полос, рулежных дорожек;
- распознавание объектов в воздухе;
- обнаружение конфликтных ситуаций в воздушном движении;
- формирование индикации закабинной обстановки в кабине без остекления;
- мониторинг состояния и действий пилота;
- обработка данных для предиктивной диагностики состояния авиационной техники;
- виртуальные помощники пилота / виртуальный второй пилот / виртуальный пилот;
- задачи управления.

Интеллектуальный анализ больших массивов данных о состоянии совокупностей объектов АТС (изделий АТ, объектов инфраструктуры, авиационного персонала) позволяет обнаруживать скрытые закономерности изменения состояния, в том числе обуславливающие опасности. На внедрение таких технологий возлагают основные надежды специалисты в области управления безопасностью полетов и авиационной деятельности в целом.

Например, разработана интеллектуальная система сбора и анализа полетных данных авиационных двигателей, куда входит программный комплекс «Аналитик», используемый для оперативного анализа послеполетных параметров двигателя и его систем [13]. Как указано в данной работе, средства диагностирования технического состояния ВС требуют анализа большой базы данных и, следовательно, длительного времени на их обработку. Указанный программный комплекс позволяет значительно сократить время анализа полетной информации благодаря созданию такого инструмента, как формализованный запрос.

Американское космическое агентство (NASA) отработывает разработанные технологии на данных авиакомпании Southwest [14]. Так, с их помощью были найдены текстовые описания посадок в добровольных сообщениях, которые прямо не указывают на нестабильный заход на посадку, однако соответствуют ему с большой долей вероятности.

Результат исследования позволил повысить качество заходов на посадку.

Организация Smith's Aerospace с поддержкой Федерального управления гражданской авиации США (FAA) разработала технологию, основанную на алгоритмах data mining, и продемонстрировала ее применение на базе данных British Airways о происшествиях и данных из системы FDM (flight data monitoring) [15]. Использование технологии позволило выявить определенные закономерности по датам, взлетам, посадкам, экипажам и пр.

В 2017 г. было проведено исследование по прогнозированию задержек рейсов с помощью методов data mining в авиакомпаниях США [16], в 2019 г. в Индии [17].

Также исследователи занимаются задачей повышения осведомленности экипажа через слуховой канал воздействия путем создания слуховых интерфейсов [18].

Создание и внедрение таких технологий могут быть весьма дорогостоящими и – при неоптимальном применении – не принести ожидаемого повышения показателей безопасности полетов. Поэтому необходимы объективные оценки влияния новых интеллектуальных технологий на уровень безопасности полетов и целевой и экономической эффективности применения авиации.

1. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ В АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

С формальной точки зрения описываемые здесь интеллектуальные технологии позволяют раньше выявлять скрытые системные проблемы обеспечения безопасности полетов и авиационной деятельности. Практически это достигается благодаря возможности быстрой автоматизированной обработки больших массивов данных, содержащих в себе «расширенные векторы» показателей состояния объектов, сопоставления сочетаний таких компонент этих векторов, которые ранее не подвергались анализу. Причем этот анализ проводится в режиме реального времени или близком к нему – на основе полетных данных с бортовых регистраторов или портативных устройств, или даже письменных и устных донесений авиационного персонала о различных событиях, поступающих в централизованную информационную систему (по возможности, охватывающую всю АТС), по крайней мере по окончании каждого полета. Именно в таких «расширенных векторах показателей состояния» элементов АТС могут выявляться схожие со-



четания, паттерны, которые и свидетельствуют об общности обстоятельств зарегистрированных событий (преимущественно – предпосылок к событиям с более тяжелыми последствиями). Это, в свою очередь, и является основанием для дальнейшего углубленного анализа проблем обеспечения безопасности – уже нередко не поддающегося автоматизации.

Важно, что более раннее выявление скрытых системных проблем обеспечения безопасности достигается на основе информации об инцидентах, т. е. событий с последствиями низкого уровня серьезности. Такие события не приносят непосредственного ущерба с точки зрения безопасности, но могут приносить экономический ущерб, связанный с изменением плана полета (обозначим его $c_{инц}$, ден. ед. в среднем на один инцидент). Обозначим их интенсивность $\lambda_{инц}$, инцидентов на летный час (л. ч.) или полетный цикл (п. ц.), среднегодовой налет ВС в тех же единицах обозначим η , л. ч. или п. ц. в год, а численность рассматриваемого парка N ВС. Таким образом, если системная проблема не будет выявлена и устранена, в среднем за период длительностью T лет таких инцидентов в рассматриваемой системе происходит

$$Q(T) = N \eta T \lambda_{инц}.$$

В то же время инциденты с низким уровнем серьезности, будучи внешними проявлениями скрытых системных проблем, могут быть предпосылками к событиям с более серьезными последствиями, вплоть до АП. В целях приближенного моделирования можно принять предположение о том, что отношение вероятности АП к вероятности инцидента ($p_{АП}/p_{инц}$) сохраняется постоянным. При этом АП уже приносят ущерб с точки зрения безопасности полетов, вплоть до человеческих жертв (предположим, что он может быть выражен в некоторых единицах как $d_{АП}$ в среднем на одно АП), а также весьма существенный экономический ущерб $c_{АП} \gg c_{инц}$, ден. ед. в среднем на одно происшествие.

И если ранее углубленный анализ общих обстоятельств различных событий в АТС предпринимался лишь после серии авиационных происшествий с тяжелыми последствиями (и то лишь в лучшем случае, поскольку чаще всего участники расследований авиационных происшествий и инцидентов были ограничены в детальной доступной информации и в охвате АТС, даже в масштабах одной страны), то благодаря новым информационным технологиям появляется возможность с

приемлемыми затратами времени и других ресурсов автоматически анализировать и «расширенные векторы показателей состояния» элементов АТС для менее серьезных и гораздо более частых событий – что на несколько порядков расширяет доступную статистическую базу. Благоприятные возможности для проактивного управления безопасностью открывает то обстоятельство, что массив данных об инцидентах намного обширнее, чем массив данных об авиационных происшествиях, которые в современной авиации уже относятся к редким событиям, поскольку $(p_{АП}/p_{инц}) \ll 1$. С учетом современных условий развития российской гражданской авиации и авиастроения такое расширение доступной эмпирической базы для анализа особенно актуально. При относительно малочисленных парках АТ, по сравнению с численностью парка крупнейших мировых авиационных держав, в российской авиации и авиастроении (что неизбежно при их автономном, автаркическом развитии) исключительно важным становится фактор ускорения обнаружения скрытых проблем. Важно подчеркнуть, что это ускорение касается изначально не столько календарного времени, сколько суммарного налета парка АТ или, еще точнее, накопленного количества предпосылок к авиационным происшествиям, по достижении которого в среднем искомые системные проблемы будут выявлены.

Можно считать, что для выявления скрытой проблемы требуется некоторая «критическая масса» однородных инцидентов с низким уровнем серьезности. Обозначим это минимально необходимое количество инцидентов $Q_{инц}^{min}$ (разумеется, его следует понимать как ожидаемое, усредненное). Изучаемые здесь интеллектуальные технологии позволяют снизить этот порог, причем, многократно, до некоторого уровня $Q_{инц}^{min AI} < Q_{инц}^{min}$. Существуют конкретные детальные математические модели выявления скрытых закономерностей в больших массивах данных с учетом размерности анализируемых «векторов показателей состояния». Причем, здесь имеются в виду не конкретные методы их выявления (представляющие собой разновидности методов многомерного статистического анализа), а именно модели связи количества анализируемых событий, точности и достоверности статистических выводов, влияния на них размерности «вектора показателей состояния» и т. п.

После выявления скрытых закономерностей начинается углубленное изучение выявленных системных проблем, выработка и реализация соответствующих решений, направленных на снижение

либо вероятности появления опасных сочетаний, либо серьезности их проявлений (причем решений также системных – например, изменение конструкции АТ, принципов и программ подготовки авиационного персонала, организации эксплуатации АТ и организации работы персонала). Это может быть весьма длительным и дорогостоящим процессом, включающим в себя НИР, ОКР, комплекс практических мероприятий в сфере производства, эксплуатации АТ и др. Можно считать, что комплекс мероприятий по устранению или минимизации влияния выявленных системных проблем имеет определенную стоимость $C_{устр}$ и длительность $T_{устр}$, причем его длительность выражается уже в календарном времени – в годах, а не в летных часах или полетных циклах. В то же время за период выявления и устранения скрытой проблемы успевают произойти некоторое количество инцидентов, влекущих за собой лишь экономический ущерб. Кроме того, сохраняется и возможность перерастания этих инцидентов в реальные авиационные происшествия, сопряженные не только с экономическими потерями, но также с потерей жизни и здоровья людей.

2. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ В АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Таким образом, для оценки эффективности внедрения интеллектуальных технологий выявления системных проблем обеспечения безопасности на основе анализа больших массивов данных необходимо сопоставить для исходной «критической массы» событий с низкой серьезностью и для нового ее значения, многократно уменьшенного благодаря интеллектуальному анализу больших массивов данных о состоянии объектов АТС:

- ожидаемые (за период до выявления и устранения системной проблемы) экономические затраты и потери, связанные с возникновением инцидентов разной степени серьезности;

- ожидаемые за тот же период потери жизни и здоровья людей.

Ожидаемые экономические и неэкономические потери за период моделирования можно выразить следующими формулами:

$$C(T) = C_{устр} + (N \eta \lambda_{инц} T_{устр} + Q_{инц}^{min}) \times \left(c_{инц} + \frac{P_{АП}}{P_{инц}} c_{АП} \right);$$

$$D(T) = (N \eta \lambda_{инц} T_{устр} + Q_{инц}^{min}) \frac{P_{АП}}{P_{инц}} d_{АП},$$

где T – длительность периода моделирования, лет, которая заведомо должна превосходить ожидаемые длительности выявления и устранения системной проблемы (здесь для простоты считается, что она устраняется полностью):

$$T \geq T_{устр} + \frac{Q_{инц}^{min}}{N \eta \lambda_{инц}}.$$

Внедрение интеллектуальных технологий выявления системных проблем обеспечения безопасности на основе анализа больших массивов данных позволяет уменьшить значение содержащегося в этих формулах параметра $Q_{инц}^{min}$ до уровня $Q_{инц}^{min AI} < Q_{инц}^{min}$ (причем предполагается, что сокращение этой «критической массы» событий окажется многократным). Зависимость ущерба, как экономического, так и неэкономического, от этого ключевого параметра – линейная, но не прямо пропорциональная, поскольку в ней присутствуют и постоянные члены, связанные с устранением системной проблемы. И с качественной точки зрения важно соотношение двух слагаемых ожидаемого времени до выявления и устранения системной проблемы – собственно ожидаемых длительностей ее выявления $Q_{инц}^{min}/N \eta \lambda_{инц}$ и устранения $T_{устр}$. Если превалирует первое слагаемое, тогда основной вклад в величину ущерба вносит именно «критическая масса» инцидентов, по которым и будет выявлена системная проблема в обеспечении безопасности.

Заметим, что указанная дробь $Q_{инц}^{min}/N \eta \lambda_{инц}$ будет при прочих равных условиях тем больше, чем ниже численность и среднегодовой налет парка АТ, а также интенсивность проявления предпосылок к авиационным происшествиям. Иначе говоря, именно в таких условиях (характерных для возможного автаркического сценария развития российской гражданской авиации и авиастроения) будут наиболее значимы и эффективны исследуемые здесь интеллектуальные технологии выявления скрытых закономерностей на основе анализа больших массивов данных об инцидентах.

Что касается абсолютного выигрыша в ожидаемых затратах и потерях, он может быть выражен в виде

$$\Delta C^{AI}(T) = C(T) - C^{AI}(T) = (Q_{инц}^{min} - Q_{инц}^{min AI}) \left(c_{инц} + \frac{P_{АП}}{P_{инц}} c_{АП} \right),$$



где $C^{AI}(T)$ – дополнительные затраты собственно на внедрение изучаемых здесь технологий интеллектуального анализа больших массивов данных. Строго говоря, они создаются и внедряются отнюдь не для выявления единственной системной проблемы. Основа соответствующей «сквозной» интеллектуальной технологии вообще универсальна для всех отраслей экономики и видов деятельности.

На первый взгляд, абсолютный выигрыш вообще не зависит от большей части параметров предложенной модели. Однако его относительный «вес» (по отношению к начальному значению), как показано выше, зависит от соотношения ожидаемых длительностей обнаружения и устранения системных проблем до и после внедрения указанных технологий, а оно, в свою очередь, зависит от среднегодового налета и размера парка АТ, от интенсивности проявления предпосылок к авиационным происшествиям, от длительности устранения системной проблемы.

На основе введенных здесь категорий такая «внешняя» модель оценки эффективности интеллектуальных технологий повышения безопасности авиационной деятельности может быть построена и исследована в виде простых арифметических формул. Она названа здесь «внешней», поскольку собственно параметры изучаемых технологий входят в нее как исходные данные. Она оперирует результирующим параметром – достигаемым благодаря интеллектуальным технологиям сокращением «критической массы» предпосылок к АП, которой достаточно для выявления скрытой проблемы. Тем не менее даже качественный анализ такой простой модели уже позволяет выявить роль различных ее параметров – таких как численность и налет парка АТ, длительность и стоимость устранения системной проблемы, ущерб от событий различной степени серьезности.

Рассмотрим

Пример. Опасные сочетания событий переходят в инциденты с вероятностью 0,1. До внедрения технологии удавалось выявить опасную закономерность после того, как произошло 100 инцидентов, что соответствует тому, что произошло 1000 опасных сочетаний. После этого внедряется интеллектуальная авиационная технология выявления опасных сочетаний, которая анализирует не инциденты (по крайней мере, не только), а полетные данные. Появляется возможность выявлять опасные сочетания на основе анализа такого количества данных, в которых встречается, например, 100 опасных сочетаний (зависит от конкретной технологии). Таким образом, $Q_{\text{инц}}^{\min} = 1000$, $Q_{\text{инц}}^{\min AI} = 100$.

Теперь сравним значение показателя эффективности технологии $\Delta C(T)/C(T)$ при разных значениях численности парка N и среднегодового налета ВС η . Рассмотрим два значения численности и два значения налета. Результаты представлены в таблице.

Расчетный пример сравнения эффективности технологии для различных парков и налетов

Показатель эффективности	Численность парка N и среднегодовой налет ВС η			
	$N = 5000,$ $\eta = 3000$	$N = 100,$ $\eta = 3000$	$N = 5000,$ $\eta = 1000$	$N = 100,$ $\eta = 1000$
$\Delta C(T)/C(T)$	19 %	84 %	40 %	88 %

Таким образом, максимальное сокращение затрат на повышение БП будет достигаться при малых значениях количества ВС определенного типа (что характерно для нашей страны) и их налета.

Что касается больших парков (в мировом масштабе), в них хорошо работают вероятностные законы и просто в силу большего общего налета опасные сочетания выявляются раньше. Для больших парков технологии выявления опасных сочетаний также будут иметь эффект, однако в относительных значениях этот эффект будет меньше.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫЯВЛЕНИЯ И УСТРАНЕНИЯ ОПАСНЫХ СОЧЕТАНИЙ НА ПРОТЯЖЕНИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВИАТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Помимо выявления и устранения (или минимизации влияния до некоторого достижимого уровня) отдельной системной проблемы в обеспечении безопасности, можно рассмотреть и долгосрочный процесс выявления и устранения таких проблем в целом. Это тем более целесообразно, поскольку дополнительные затраты на внедрение технологий интеллектуального анализа больших массивов данных $C^{AI}(T)$, даже применительно к авиации, скорее всего осуществляются отнюдь не в расчете на выявление и устранение единственной проблемы в области безопасности полетов.

Рассматривая обнаружение и устранение различных системных проблем обеспечения безопасности в АТС как единый длительный процесс, а не разовый акт (как в рассмотренной выше элементарной модели), можно предположить, например, что вначале обнаруживаются и устраняются наиболее значимые проблемы (создающие наибольшие угрозы для безопасности) – и потому, что они, вероятнее всего, проявятся раньше других (в силу высокой частоты проявления), и потому, что их устранение становится приоритетным (поскольку они несут угрозы наибольшего ущерба). Тогда можно рассмотреть процесс выявления и

устранения системных проблем на долгосрочных интервалах – на протяжении жизненного цикла всего технологического уклада, на базе которого построена данная АТС, – подобно процессу обучения learning-by-doing, широко известному в сфере производства сложной продукции. Можно ввести темп обучения γ , показывающий, насколько сильно сокротится вероятность проявления системных проблем (или, например, риск их проявления, т. е. произведение вероятности на ожидаемый ущерб), к примеру, при удвоении опыта функционирования АТС. Тогда текущий – при накопленном опыте анализа инцидентов в объеме Q событий – уровень интенсивности проявления системных проблем в АТС (в расчете на единицу ее работы – на рейс, на летный час, на пассажиро- или тонно-километр) может быть выражен логарифмической формулой следующего вида:

$$\lambda_{\text{инц}}(Q) = \lambda_{\text{инц}}^{\infty} + (\lambda_{\text{инц}}^0 - \lambda_{\text{инц}}^{\infty}) (1 - \gamma)^{\log_2 \frac{Q}{Q_{\text{инц}}^{\text{min}}}}$$

Здесь $\lambda_{\text{инц}}^0$ – интенсивность инцидентов при нулевом опыте функционирования АТС. Логарифмическая модель процесса обучения и накопления опыта фактически отражает то, что процесс устранения системных проблем, начинаясь с выявления и устранения самых значимых и весомых проблем, далее замедляется. Кроме того, введенный в эту модель «неснижаемый остаток» $\lambda_{\text{инц}}^{\infty}$ показывает, что повышение безопасности имеет естественные пределы, обусловленные законами природы и возможностями технологий данного технологического уклада. Процесс обучения, т. е. выявления и устранения системных проблем, лишь позволяет приблизиться к этому пределу.

Что касается влияния интеллектуальных технологий выявления скрытых закономерностей, в рамках такой модели оно фактически может быть представлено как эквивалентное «ускорение» обучения, т. е. умножение накопленного опыта на некоторый постоянный коэффициент, соответствующий относительно сокращению потребного (для выявления скрытой проблемы) количества инцидентов $Q_{\text{инц}}^{\text{min}} / Q_{\text{инц}}^{\text{min AI}}$.

При этом, как и в модели устранения единичной системной проблемы, можно учесть задержку в устранении системных проблем обеспечения безопасности, введя лаг $T_{\text{устр}}$ лет (или иных календарных периодов) между накоплением опыта анализа инцидентов и внедрением найденных решений в практику работы АТС.

Для обеих разновидностей моделей – выявления и устранения единичной проблемы либо про-

цесса устранения системных проблем на протяжении жизненного цикла всего технологического уклада – требуется в конечном счете оценить зависимость ожидаемых потерь (экономических и неэкономических) от основного обобщающего параметра, характеризующего интеллектуальные технологии выявления скрытых закономерностей в предпосылках к летным происшествиям – показателя относительного ускорения их выявления. Также, разумеется, важны зависимости результатов модельных расчетов от прочих параметров предложенных моделей, в том числе от длительности и стоимости устранения выявленных проблем, ущерба от различных событий, численности и налета парка АТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Параметрический анализ показывает, что интеллектуальные технологии выявления системных проблем обеспечения безопасности на основе анализа больших массивов данных принесут наибольший эффект (наиболее сильное относительное сокращение материального и нематериального ущерба) при относительно малочисленных парках АТ, малой интенсивности ее эксплуатации и малых масштабах АТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полетов. – Монреаль: ИКАО, 2013. – 44 с. [Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. Safety Management. – Montreal: ICAO, 2013. – 44 p.]
2. Руководство по управлению безопасностью полетов. Doc 9859. Издание 4. – Монреаль: ИКАО, 2018. – 300 с. [Safety Management Manual. Doc 9859. Iss. 4. – Montreal: ICAO 2018. – 182 p.]
3. Шаров В.Д., Макаров В.П. Методология применения комбинированного метода FMEA-FTA для анализа риска авиационного события // Научный вестник МГТУ ГА. – 2011. – № 174. – С. 18–24. [Sharov, V.D., Makarov, V.P. Using a Combination of FMEA – FTA Techniques in Airline Safety Risk Analysis Methodology // The Civil Aviation High Technologies (Nauchnyi Vestnik MGTU GA). – 2011. – No. 174. – P. 18–24. (In Russian)]
4. Бутов А.А., Шаров В.Д., Макаров В.П., Орлов А.И. Прогнозирование и предотвращение авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2012. – № 5 (36). – С. 309–313. [Butov, A.A., Sharov, V.D., Makarov, V.P., Orlov, A.I. Aviation Accidents Forecasting and Prevention at the Organization and Performance of Flights // Vestnik of the Samara State Aerospace University. – 2012. – No. 5 (36). – P. 309–313. (In Russian)]



5. Шаров В.Д. Применение байесовского подхода для уточнения вероятностей событий в автоматизированной системе прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 43. – С. 240–253. [Sharov, V.D. Application of Bayesian Approach to Update Events' Probabilities in Automated System of Aviation Accidents Forecasting and Prevention // Large-Scale Systems Control. – 2013. – Iss. 43. – P. 240–253. (In Russian)]
6. Бутов А.А., Волков М.А., Макаров В.П. и др. Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок // Изв. Самарского науч. центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4(2). – С. 380–385. [Butov, A.A., Volkov, M.A., Makarov, V.P., et al. The Automated System of Aviation Accidents Forecasting and Prevention at the Organization and Performance of Flights // Journal of the Samara Research Center of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – Vol.14, no. 4 (2). – P. 380–385. (In Russian)]
7. Богомолов А.С. Анализ путей возникновения и предотвращения критических сочетаний событий в человеко-машинных системах // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2017. – Т. 17, № 2. – С. 219–230. [Bogomolov, A.S. Analysis of the Ways of Occurrence and Prevention of Critical Combinations of Events in Man-Machine Systems // Saratov University News. New Series. Series Mathematics. Mechanics. Informatics. – 2017. – Vol. 17, no. 2. – P. 219–230. (In Russian)]
8. Филимонюк Л.Ю. Проблема критических сочетаний событий в сложных системах // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2014. – Вып. 9 (68). – С. 241–243. [Filimonuk, L.Y. Critical Combination of Events Problem in Complex Systems // Mathematical Methods in Technique and Technologies – ММТТ. – 2014. – Iss. 9 (68). – P. 241–243. (In Russian)]
9. Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С. и др. Проблемы критических сочетаний событий в системе «Экипаж – Воздушное судно – Диспетчер» // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2015. – Вып. 2. – С. 10–16. [Novozhilov, G.V., Rezchikov, A.F., Neymark, M.S., et al. The Problem of Events' Critical Combination in «Crew – Airplane – Air-Traffic Controller» Systems // All-Russian Scientific-Technical Journal "Polyot" ("Flight"). – 2015. – Iss. 2. – P. 10–16. (In Russian)]
10. Богомолов А.С., Иващенко В.А., Кушников В.А. и др. Моделирующий комплекс для анализа критических сочетаний событий в авиационных транспортных системах // Проблемы управления. – 2018. – № 1. – С. 74–79. [Bogomolov, A.S., Ivashchenko, V.A., Kushnikov, V.A., et al. Modeling Complex for Critical Events Combinations Analysis in Aviation Transport Systems // Control Sciences. – 2018. – No. 1. – P. 74–76. (In Russian)]
11. Новожилов Г.В., Резчиков А.Ф., Неймарк М.С. и др. Человеческий фактор в авиационно-транспортных системах // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. – 2013. – № 5. – С. 3–10. [Novozhilov, G.V., Rezchikov, A.F., Neymark, M.S., et al. Human Factor in Aviation Transport Systems // All-Russian Scientific-Technical Journal «Polyot» («Flight»). – 2013. – No. 5. – P. 3–10. (In Russian)]
12. Носуленко И. А., Басюл И. А., Зыбин Е. Ю., Леликов М. А. Пространственное разделение информации в самолетном переговорном устройстве // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – №7 (224). – С. 109–119. [Nosulenko, V.N., Basul, I. A., Zybin, E. Yu., Lelikov, M.A. Spatial Separation of Information in the Aircraft Communication Device // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. – 2021. – No. 7 (224). – P. 109–119. (In Russian)]
13. Добрянский Г.В., Мельникова Н.С., Мовила В.Н. и др. Интеллектуальная система сбора и анализа полетных данных авиационного двигателя // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2022. – Т. 26. – № 3 (97). – С. 100–112. [Dobryanskiy, G.V., Melnikova, N.S., Movila, V.N., et al. Intelligent System for Collecting and Analyzing Aircraft Engine Flight Data // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. – 2022. – Vol. 26, no. 3 (97). – P. 100–112. (In Russian)]
14. Data Mining Tools Make Flights Safer, More Efficient // NASA Spinoff. – 2013. – URL: https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2013/t_3.html (дата обращения 07.12.2023). [Accessed December 7, 2023.]
15. Larder, B. and Summerhayes, N. Application of Smiths Aerospace Data Mining Algorithms to British Airways 777 and 747 FDM Data. A Technology Demonstration. – Washington, DC: Global Aviation Information Network, 2004. – URL: https://flightsafety.org/files/FDM_data_mining_report.pdf (дата обращения 07.12.2023). [Accessed December 7, 2023.]
16. Baluch, M., Bergstra, T., El-Hajj, M. Complex Analysis of United States Flight Data Using a Data Mining Approach // 2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). – Las Vegas, NV, USA, 2017. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/CCWC.2017.7868414.
17. Chakrabarty, N. A Data Mining Approach to Flight Arrival Delay Prediction for American Airlines // 2019 9th Annual Information Technology, Electromechanical Engineering and Microelectronics Conference (IEMECON). – Jaipur, India, 2019. – P. 102–107. – DOI: 10.1109/IEMECONX.2019.8876970.
18. Devansh, Sh., Ayushi, L., Danish, J., Lynette, D. Airline Delay Prediction using Machine Learning and Deep Learning Techniques // International Journal of Recent Technology and Engineering. – 2020. – Vol. 9. – Iss. 2. – P. 1049–1054.

Статья представлена к публикации руководителем
PPC В. А. Кушниковым.

Поступила в редакцию 18.09.2023,
после доработки 07.12.2023.
Принята к публикации 24.01.2024.

Варюхина Екатерина Витальевна – канд. техн. наук, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», г. Жуковский,
✉ e.varyukhina@yandex.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5156-316X>

Клочков Владислав Валерьевич – д-р экон. наук, канд. техн. наук, ФГБУ «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», г. Жуковский; Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,
✉ vlad_klochkov@mail.ru
ORCID iD <https://orcid.org/0000-0003-4149-7562>

© 2024 г. Варюхина Е. В., Клочков В. В.



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

ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF INTELLECTUAL TECHNOLOGIES FOR IDENTIFYING HAZARDOUS COMBINATIONS OF EVENTS IN CIVIL AVIATION FLIGHT SAFETY MANAGEMENT

E. V. Varyukhina* and V. V. Klochkov**

*National Research Center Zhukovsky Institute, Zhukovsky, Russia

**National Research Center Zhukovsky Institute, Zhukovsky, Russia;
Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*✉ e.varyukhina@yandex.ru, **✉ vlad_klochkov@mail.ru

Abstract. This paper proposes an approach to assessing the effectiveness of intellectual technologies (artificial intelligence and machine learning) for identifying hazardous combinations of events in air transport systems. The influence of such technologies on flight safety and the aircraft's total cost of ownership is formalized. A simple model is developed to assess the effectiveness of implementing intellectual technologies when identifying a single hidden problem. This model is qualitatively analyzed to reveal the role of its parameters (the size and flight hours of the aircraft fleet, the duration and cost of systemic problem elimination, and damage from events of different severity). In addition, we model the identification and elimination of hazardous combinations of events during the life cycle of air transport systems considering the learning effect. According to this effect, the intensity of hidden systemic problems decreases over time with the accumulation of experience in the operation of an air transport system and the gradual elimination of such problems. The relative acceleration in the identification of hidden patterns is the main indicator that characterizes intellectual technologies for identifying such patterns in incidents. Both types of models can be used to estimate the dependence of expected losses on this indicator. It is also important to consider the dependences of model calculation results on other parameters of the models, including the duration and cost of eliminating the identified problems, damage from various events, and the size and flight hours of the aircraft fleet. As is demonstrated below, intellectual technologies are most effective in an air transport system with a small aircraft fleet and a low intensity of aircraft operation.

Keywords: flight safety, hidden hazards, intellectual technologies.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТСРОЧКИ ПОИМКИ ЦЕЛИ В АДТ-ИГРЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОДНОГО ИЛИ ДВУХ ЗАЩИТНИКОВ[#]

А. А. Галяев*, А. С. Самохин**, М. А. Самохина***

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

*✉ galaev@ipu.ru, ** ✉ samokhin@ipu.ru, ***✉ ph@ipu.ru

Аннотация. Рассматривается вариант Attacker-Defender-Target задачи с одним или двумя защитниками в плоской постановке. Предполагается, что цель и защитники движутся прямолинейно с постоянной скоростью, атакующий движется по догонной траектории без ограничения на радиус кривизны. Скорость защитников меньше скорости цели, скорость атакующего – больше. Смысл использования защитников заключается в том, чтобы атакующий вначале занимался их перехватом, и только после этого переключался на преследование основной цели. Тем самым время перехвата основной цели увеличивается, и она может стать недостижима для имеющего ограниченный запас топлива атакующего. Оптимизируются углы и времена выпуска защитников, в том числе рассматривается вариант выпуска защитников с одной стороны от цели. Исследование осуществляется для различных моделей работы системы самонаведения автономного атакующего аппарата: движения к центру масс всех преследуемых объектов, к ближайшей цели по расстоянию или по угловой дальности. Проведено численное моделирование, показывающее важность выбора угла выпуска защитников, целесообразность использования второго защитника, получены сценарии, в которых использование защитников делает основную цель недостижимой для атакующего.

Ключевые слова: преследование, система самонаведения, использование защитников, автономный аппарат, оптимизация, численное моделирование, перехват, АДТ.

ВВЕДЕНИЕ

Групповое противодействие автономным аппаратам, решающим различные целевые задачи, становится все более и более актуальным на текущем уровне развития интеллектуальных алгоритмов и технологий. В последнее время появились публикации, рассматривающие так называемые MDT-игры (Missile-Target-Defender), или по-другому – АДТ-игры (Attacker-Defender-Target), «атакующий – защитник – цель» [1–6]. В подобных задачах коалиция цель – защитник (защитники) играет против атакующего цель игрока. Задача защитника – перехватить атакующего игрока и не допустить его встречи с целью. Цель при этом совер-

шает маневр уклонения. В качестве защитника могут выступать как ударное мобильное средство типа антиракеты, так и ложная цель-имитатор, отвлекающая на себя атакующего игрока [2].

Обзор методов определения управления для каждого из агентов в АДТ-играх приведён в статье [3]. Управление может определяться на основе как нейросетевых [3, 4], так и классических подходов. В работе [3] отмечается, что нейросетевые подходы пока удаётся применять только в относительно простых постановках, и осуществляется попытка развития данной методики с использованием результатов, полученных на основе теории дифференциальных игр.

В статье [5] удалось решить задачу геометрически – найти управление, при котором защитник, более манёвренный, чем цель, гарантированно оказывается на пути движения атакующего к цели.

[#] Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00134).

В работах [6–8] АДТ-игры исследуются на основе теории дифференциальных игр, в них также рассматривается случай защитника, движущегося быстрее цели.

Большинство работ посвящено анализу ситуации с одной целью, одним защитником и одним атакующим. Но в статьях [8, 9] получены результаты в ситуации сразу с двумя атакующими. В публикации [9] для этого решается уравнение Риккати и проведено нелинейное численное моделирование. В работе [10] рассмотрен случай сразу нескольких преследователей, осуществлено моделирование для сценария, когда их не более пяти. В статье [11] исследовалась дифференциальная игра с несколькими нападающими, несколькими защитниками и неподвижной целью.

В настоящей работе рассматривается задача «атакующий – защитник – цель» в плоской постановке. В упомянутых выше статьях предполагается наличие одного защитника или неподвижность цели, в текущем же исследовании рассматривается возможность выигрыша при использовании двух защитников, движущихся медленнее перемещающейся цели. При этом для цели и защитников рассматривается упрощённая динамика прямолинейного движения с постоянной скоростью, а для атакующего не учитывается ограничение на минимальный радиус кривизны траектории.

Другой особенностью рассматриваемой более прикладной постановки является отсутствие у атакующего полной информации об игре и использование известного всем игрокам закона самонаведения.

Отдельно исследуются случаи одного и двух защитников. При этом считается, что защитники двигаются медленнее цели, а атакующий – быстрее. Предполагается, что запас хода атакующего конечен, преследование осуществляется в течение ограниченного времени. Защитники представляют собой ложные цели и действуют в коалиции с основной целью. Задача защитников – отвлечь внимание атакующего на себя, дав возможность цели уйти от преследования.

Атакующий, цель и защитник представлены автономными аппаратами. Цель и защитники движутся равномерно прямолинейно, при этом траектория движения цели задана, а траектории движения защитников являются объектом исследования.

Предполагается, что автономный атакующий аппарат перемещается также с постоянной скоростью, но оснащён системой самонаведения (СН) и двигается по более сложной траектории. Вначале

атакующий движется к центру масс всех видимых объектов, осуществляя совместное преследование, далее он преследует объекты отдельно, по очереди, пока не поразит основную цель или пока у него не закончится топливо. Очередность выбирается, исходя из расстояния или угловой дальности до объектов, и может меняться в ходе преследования.

При движении атакующий использует пропорциональную навигацию (англ. *Proportional Navigation*, PN) – достаточно эффективный закон наведения, который используется в той или иной форме в большинстве самонаводящихся автономных аппаратов [12–14]. Согласно PN вектор скорости атакующего должен вращаться со скоростью, пропорциональной скорости вращения линии визирования и в том же направлении.

Считается, что на некотором расстоянии до защитника атакующий распознаёт, что перед ним находится не основная цель, и переключается на преследование следующего объекта.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Описание сценария атаки и ухода от перехвата

В работе рассматривается случай атаки одиночного атакующего на цель, оснащённую одним или двумя защитниками – ложными целями. Атакующий, цель и защитники представляют собой материальные точки. Случай одного защитника далее рассматривается в § 2, двух – в § 3. Атака начинается в момент времени $t=0$. Обозначим через $d(t)$ расстояние от атакующего до основной цели в момент времени t . Тогда в начальный момент времени расстояние между атакующим и целью задано: $d(0) = \text{const}$. Цели известны о начале атаки. Время атаки ограничено заданной величиной τ_{\max} , после чего считается, что у атакующего не остаётся топлива для дальнейшего преследования.

Предлагаемая тактика защиты состоит в мгновенном запуске целью защитника, который должен отвлечь СН атакующего автономного объекта, тем самым дав возможность цели уйти от поражения атакующим. Отдельно рассматривается случай, когда у цели есть второй защитник, который либо выпускается одновременно с первым в начальный момент времени, либо оптимизируется время его выпуска, а также исследуется ситуация, при которой защитников можно выпускать только с одной стороны от цели.

1.2. Модель движения автономных аппаратов

В задаче перехвата важно соотношение скоростей рассматриваемых объектов. Скорость атакующего v_A выше скорости цели v_T и скорости ложных целей – защитников v_D , скорость цели выше скорости защитников.

Так как скорость атакующего больше скоростей цели и защитников, то атакующий догонит цель за конечное время. Расчёты проводятся до момента τ поимки атакующим основной цели, при этом во время моделирования предполагалось, что запас хода атакующего неограничен, но если в результате оказывается, что $\tau > \tau_{\max}$, то считается, что цели удалось успешно уклониться от атаки.

Атакующий осуществляет перехват выбранной цели согласно закону пропорциональной навигации: $\Delta\theta = k\Delta\lambda$, где θ – угол поворота вектора скорости атакующего, λ – угол визирования цели, а k – коэффициент пропорциональности. В работе полагалось, что $k = 1$.

На рис. 1 изображена начальная конфигурация. Начало координат в момент старта атаки $t = 0$ совпадает с положением цели. Ось абсцисс направлена перпендикулярно вектору, соединяющему атакующего и цель в начальный момент времени. От неё в положительном направлении отсчитываются углы движения цели γ_T и защитников γ_{D1}, γ_{D2} .

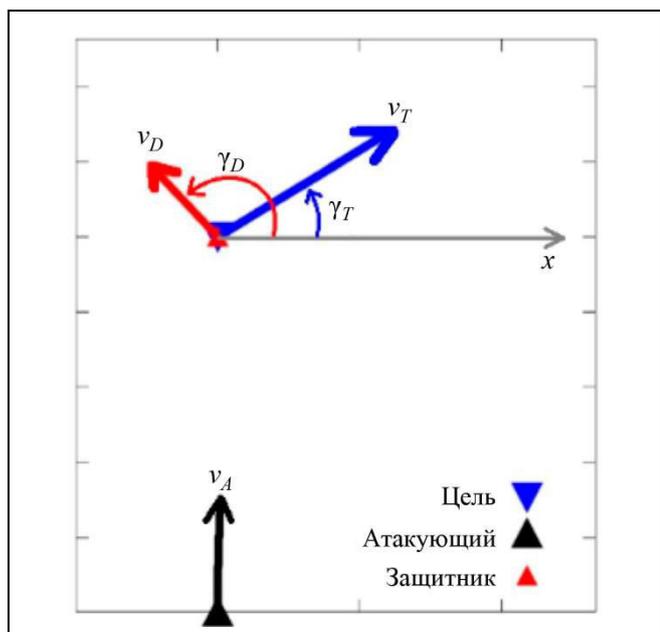


Рис. 1. Схема начальной конфигурации: расположение и направление движения атакующего, цели, защитника в момент начала атаки

В декартовой системе координат движение цели описывается соотношениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_T = v_T \cos(\gamma_T), \\ \dot{y}_T = v_T \sin(\gamma_T), \end{cases}$$

где $(x_T(t), y_T(t)) = \mathbf{r}_T(t)$ — координаты цели в момент времени t , при этом $x_T(0) = y_T(0) = 0$.

Движение защитников описывается аналогичными соотношениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_{D_i} = v_D \cos(\gamma_{D_i}), \\ \dot{y}_{D_i} = v_D \sin(\gamma_{D_i}), \end{cases}$$

где $i = 1$ или 2 ; $(x_{D_i}(t), y_{D_i}(t)) = \mathbf{r}_{D_i}(t)$ – координаты i -го защитника в момент времени t , при этом $x_{D_1}(0) = y_{D_1}(0) = 0$, так как первый защитник выпускается сразу в момент начала атаки, координаты второго защитника D_2 , в случае его наличия, в момент времени τ его выпуска совпадают с координатами цели: $x_{D_2}(\tau_D) = x_T(\tau_D)$, $y_{D_2}(\tau_D) = y_T(\tau_D)$.

Цель и защитники движутся прямолинейно, в одном сценарии углы γ_T и γ_{D_i} являются константами.

Обозначим через $\mathbf{r}_A(t)$ положение атакующего в момент времени t , тогда закон управления атакующего при движении по догонной траектории записывается следующим образом:

$$\dot{\mathbf{r}}_A(t) = v_A(t) \frac{\hat{\mathbf{r}}(t) - \mathbf{r}_A(t)}{|\hat{\mathbf{r}}(t) - \mathbf{r}_A(t)|}. \quad (1)$$

Здесь $\hat{\mathbf{r}}(t)$ – положение выбранной для преследования цели.

Предполагается, что вначале атакующим осуществляется совместное преследование, при котором $\hat{\mathbf{r}}(t)$ – центр масс основной цели T и защитников,

т. е. $\hat{\mathbf{r}}(t) = \frac{1}{2}(\mathbf{r}_T(t) + \mathbf{r}_{D_1}(t))$ в случае одного

выпущенного защитника и $\hat{\mathbf{r}}(t) = \frac{1}{3}(\mathbf{r}_T(t) + \mathbf{r}_{D_1}(t) +$

$+\mathbf{r}_{D_2}(t))$ в случае двух выпущенных защитников.

В момент, когда расстояние от атакующего до центра масс равно расстоянию между целью и одним из защитников, групповое преследование заканчивается и начинается поочередное преследование.

Цель коалиции основной цели и защитников – добиться того, чтобы ни в один момент времени $\tilde{t} \in [0, \tau_{\max}]$ не было выполнено равенство $\mathbf{r}_T(\tilde{t}) = \mathbf{r}_A(\tilde{t})$, означающее перехват цели атакующим.

При моделировании в § 2, 3 для расчётов брались следующие величины, приведённые к безраз-

мерному виду, для скоростей агентов, начального расстояния от атакующего до цели и максимально допустимого времени перехвата:

$$\begin{cases} v_D = 0,3, \\ v_T = 0,6, & d(0) = 10, \quad \tau_{\max} = 30. \\ v_A = 0,9, \end{cases}$$

В работе рассматриваются различные фиксированные значения γ_T , требуется найти угол выпуска одного защитника γ_{D1} или двух – γ_{D1} и γ_{D2} и время выпуска второго защитника τ_D , максимизирующие время перехвата атакующим основной цели $\tau \rightarrow \max$. Параметры оптимизации будут уточнены для каждого пункта § 2 отдельно.

2. СЛУЧАЙ ОДНОГО ЗАЩИТНИКА

В § 2 и 3 представлены результаты численного моделирования для различных сценариев: атаки под разным углом, одного или двух защитников, оптимизации времени выпуска второго защитника. Для проведения расчётов был реализован программный комплекс на языке С. При моделировании использовалась сетка в пространстве параметров задачи, применялся метод градиентного спуска, было проведено параметрическое исследование. Интегрирование траектории атакующего осуществлялось с контролем относительной локальной погрешности [15, 16].

На рис. 3–7 чёрным цветом показана траектория атакующего $r_A(t)$, синим – цели $r_T(t)$, красным – защитников $r_{Di}(t)$. Траектории представлены в декартовой системе координат. Треугольниками соответствующих цветов отмечены положения атакующего, цели, защитника в начальный момент времени. Жирными точками тех же цветов на траекториях атакующего, цели и защитника отмечены их положения в момент окончания группового преследования, а зелёным квадратом – центр масс цели и защитника в этот момент времени. Окружностями отмечены позиции атакующего и первого защитника в момент времени τ_D выпуска второго защитника.

2.1. Выбор оптимального угла выпуска защитника

В случае наличия только одного защитника, выпускаемого в начальный момент времени, оптимизируемым функционалом является

$$\tau \rightarrow \max. \quad (2)$$

$$\gamma_{D1}$$

Важность выбора угла выпускаемого защитника в этом случае показана на рис. 2. Сплошная кривая соответствует преследованию вначале защитника, затем цели, штриховая – случаю, в котором после движения к центру масс атакующий сразу выбирает преследование основной цели.

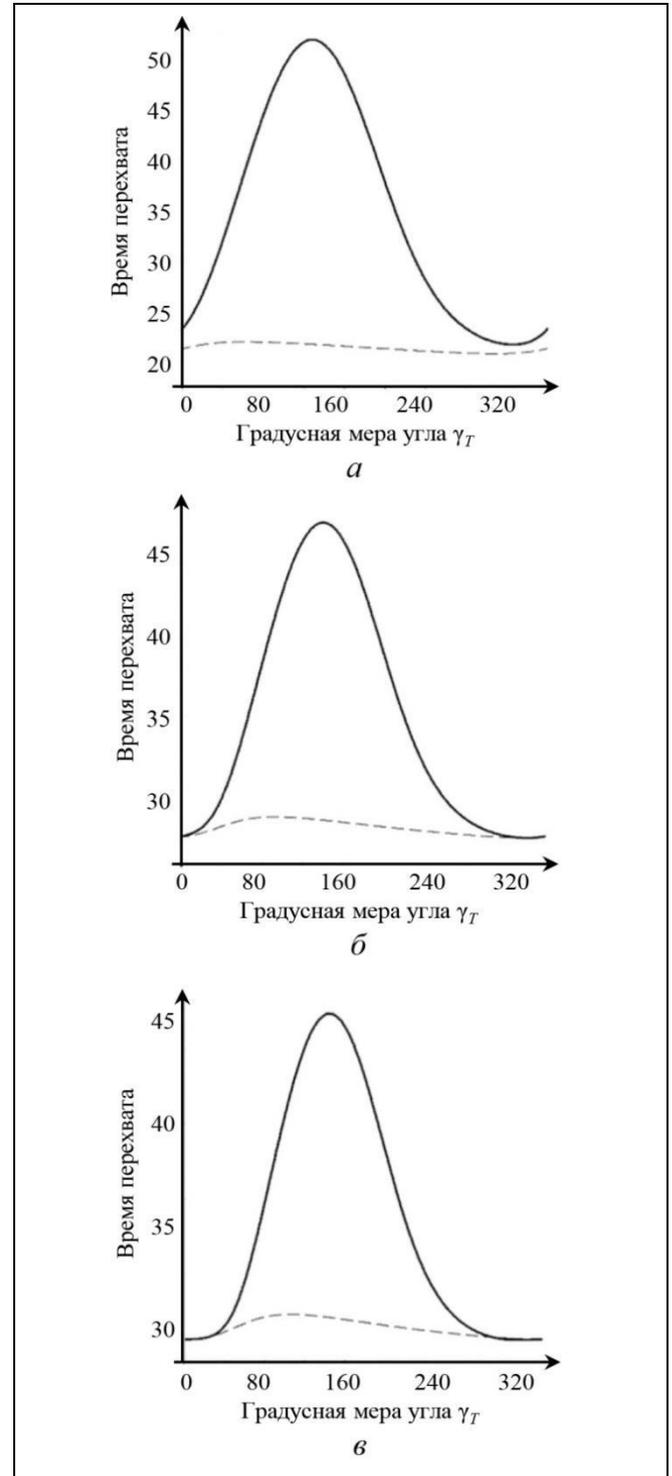


Рис. 2. Увеличение времени перехвата в зависимости от угла выпуска защитника γ_{D1} для разных углов движения цели: а – $\gamma_T = 0$, б – $\gamma_T = 30^\circ$, в – $\gamma_T = 45^\circ$



В случае, изображённом на рис. 2, а, оптимальным углом выпуска защитника оказывается $\gamma_{D1} = 128,7^\circ$, время перехвата цели τ увеличивается с 20 до 51,5; в случае, изображённом на рис. 2, б, $\gamma_{D1} = 140,5^\circ$, время перехвата цели τ увеличивается с 26,6 до 47,7; в случае, изображённом на рис. 2, в, $\gamma_{D1} = 146^\circ$, время перехвата цели τ увеличивается с 29,4 до 45,4.

Отметим, что без защитника во всех этих случаях атакующий успешно перехватывает цель в течение времени, на которое у него хватает энергоресурса: $\tau_{\max} = 30$. В случае же использования защитника повышаются шансы на то, что за время жизни атакующего ему не удастся перехватить цель.

2.2. Траектории движения для оптимальных значений углов выпуска защитника

Соответствующие лучшим полученным углам γ_{D1} траектории движения атакующего, цели и защитника приведены на рис. 3. Они построены с использованием упрощённого закона движения атакующего по догонной траектории (1), при этом по-прежнему рассматривается функционал (2).

В случае, изображённом на рис. 3, а, для $\gamma_T = 0^\circ$ групповое преследование заканчивается при $t = 6,29$, когда расстояние от атакующего до центра масс равно расстоянию между целью и защитником и составляет 5,17. Атакующий достигает области распознавания ложности защитника в момент времени $t = 14,51$, на момент $t = 30$ окончания энергоресурса у атакующего расстояние до цели составляет 6,48.

В случае, изображённом на рис. 3, б, для $\gamma_T = 30^\circ$ групповое преследование заканчивается при $t = 7,11$, когда расстояние от атакующего до центра масс равно 5,40. Защитник настигается в момент времени $t = 14,12$, дистанция до цели в конце составляет $d(30) = 5,33$. В случае, изображённом на рис. 3, в, $\gamma_T = 45^\circ$, групповое преследование заканчивается при $t = 7,57$, когда расстояние от атакующего до центра масс равно 5,45. Атакующий распознает в защитнике ложную цель в момент времени $t = 13,88$, при $t = 30$ расстояние до цели $d(30) = 4,65$.

Тем самым выбор правильного угла выпуска защитника γ_{D1} может существенно увеличить время перехвата основной цели. Для увеличения вероятности неуспеха атакующего целесообразно задействовать нескольких защитников.

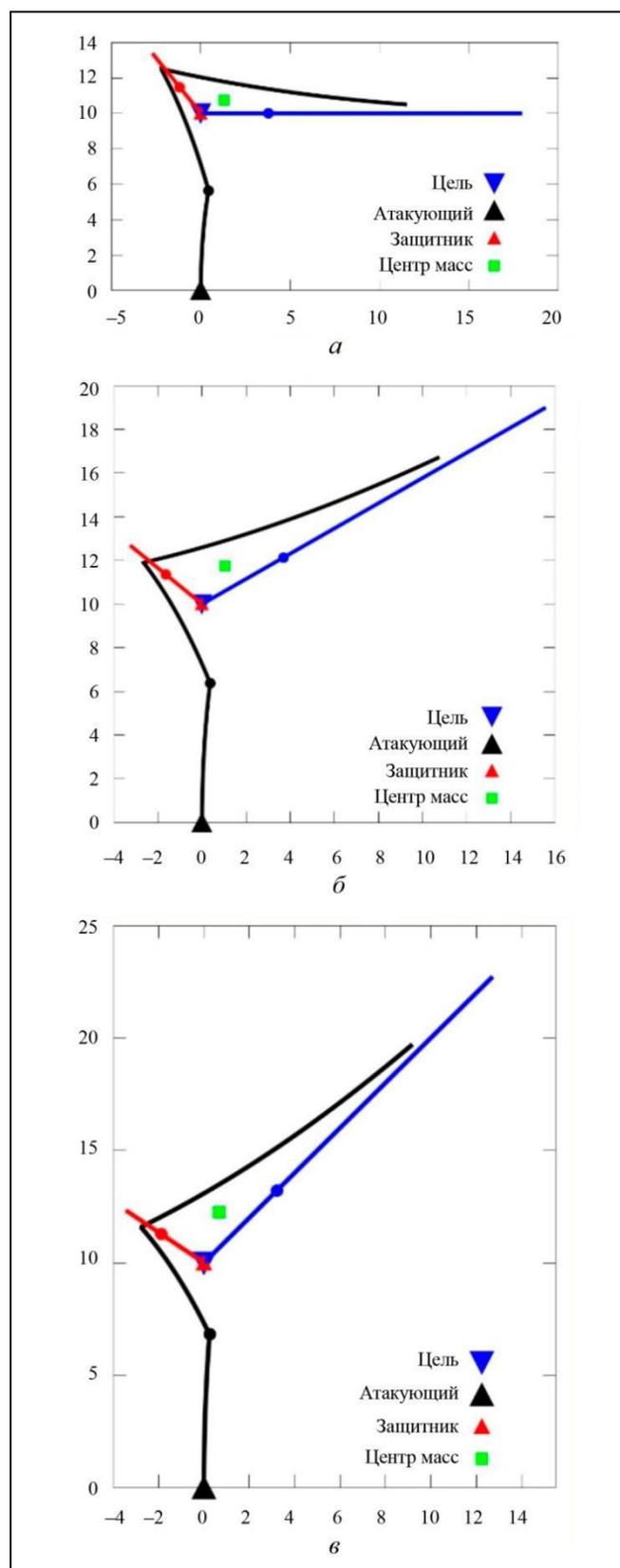


Рис. 3. Траектории движения атакующего (чёрная линия), цели (синяя линия), защитника (красная линия), соответствующие лучшему углу γ_{D1} выпуска защитника (см. рис. 2) при преследовании атакующим вначале центра масс защитника и цели, затем защитника, затем цели: а – $\gamma_T = 0^\circ$, б – $\gamma_T = 30^\circ$, в – $\gamma_T = 45^\circ$

3. СЛУЧАЙ ДВУХ ЗАЩИТНИКОВ

3.1. Случай $\gamma_T = 0$

На рис. 4 приведены траектории с двумя защитниками, рассматривается случай $\gamma_T = 0$. Атакующий вначале преследует центр масс объекта и защитников, затем переходит к поочередному преследованию ближайших целей.

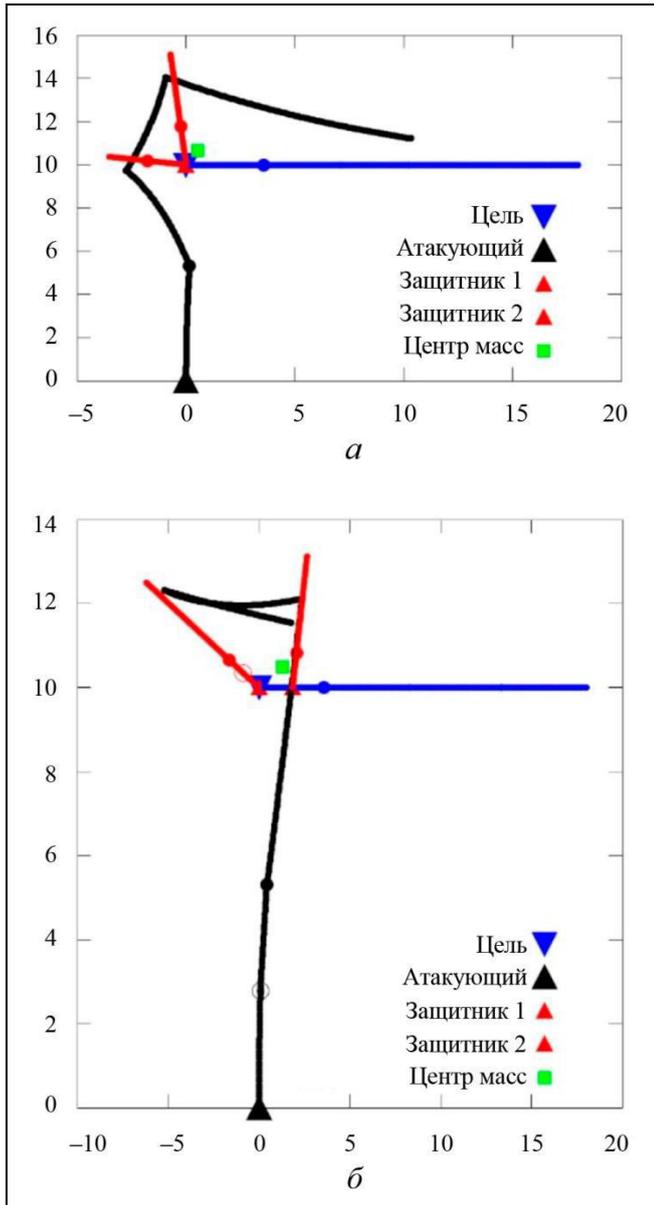


Рис. 4. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие: а – лучшему углу выпуска второго защитника γ_{D2} , б – лучшему углу выпуска обоих защитников γ_{D1} и γ_{D2} и лучшему времени старта второго защитника τ_D

На рис. 4, а оба защитника выпускаются в начальный момент времени, задача решается с

функционалом $\tau \rightarrow \max$. Первый защитник выпущен под углом $\gamma_{D1} = 174^\circ$, тогда оптимальным углом выпуска второго защитника оказывается $\gamma_{D2} = 98^\circ$, время перехвата цели при этом составит $\tau = 56$. На момент окончания энергоресурса у атакующего при $t = 30$ расстояние до цели $d(30) = 7,77$.

На рис. 4, б рассматривается случай $\gamma_T = 0$, угол выпуска первого защитника γ_{D1} , время τ_D и угол выпуска γ_{D2} второго защитника оптимизируются, т. е. решается задача

$$\tau \rightarrow \max_{\gamma_{D1}, \gamma_{D2}, \tau_D} \quad (3)$$

В этом случае время перехвата составит 84,6, что превышает запас энергоресурса атакующего, угол выпуска первого защитника 158° , второго – 76° . Второго защитника лучше всего выпустить через время $\tau_D = 3,1$ после начала атаки. В этом случае атакующий вначале попытается перехватить второго защитника, затем отправится на перехват первого, так как в момент распознавания во втором защитнике ложной цели первый защитник окажется ближе к атакующему, чем основная цель. И только после определения первой цели как ложной атакующий отправится на перехват основной цели. При этом в момент окончания энергоресурса у атакующего расстояние до цели $d(30) = 16,32$.

На рис. 5–7 представлены результаты моделирования в течение времени τ_{\max} с двумя защитниками для $\gamma_T = 30$ (графики слева) и $\gamma_T = 45^\circ$ (графики справа). Время выпуска второго защитника, углы выпуска первого и второго защитников также оптимизируются. Угол движения цели γ_T задан, первый защитник выпускается в начальный момент времени.

Защитники отмечены красным цветом и перестают отображаться в момент их распознавания в качестве ложной цели. Время перехвата получено численным моделированием развития обстановки до момента перехвата, на графиках сам перехват не отражён, так как моделирование проводится до времени $t = 30$ окончания энергоресурса атакующего. При запасе энергоресурса атакующего лишь на время движения $\tau_{\max} = 30$ перехват в данных сценариях при использовании защитников невозможен.

В подписях ко всем графикам указаны время перехвата τ углы выпуска защитников γ_{D1} и γ_{D2} , время выпуска второго защитника τ_D , расстояние от атакующего до цели $d(30)$ в момент заверше-



ния сценария – когда у атакующего заканчивается энергоресурс.

Далее в п. 3.2 рассматриваются функционал и параметры оптимизации (3).

3.2. Случаи $\gamma_T = 30^\circ$ и $\gamma_T = 45^\circ$

3.2.1. Движение атакующего к ближайшему объекту

В начале траектории в каждом случае атакующий некоторое время движется к центру масс всех видимых объектов, затем при существенном удалении их друг от друга выбирает для преследования одну из целей. В случае обнаружения атакующим во время движения более удобной в некотором смысле цели или опознания текущей цели в качестве ложной он переключается на следующую цель, которая в рассматриваемых моделях определяется разными алгоритмами; результаты их работы приведены на графиках далее.

При движении атакующего к ближайшему объекту получаются траектории, представленные на рис. 5, а, с временем перехвата основной цели $\tau = 79,3$ и рис. 5, б с временем перехвата $\tau = 76,3$. Второй защитник при этом позволяет

существенно увести атакующего от цели после распознавания атакующим первого защитника и время перехвата получается значительно больше, чем в случае наличия одного защитника. Однако такие траектории не очень реалистичны, так как в момент распознавания первого защитника основной объект находится в поле зрения атакующего, а второй защитник – вне его, поэтому атакующий должен продолжить движение именно к основному объекту. Учёт поля зрения атакующего представлен в п. 3.2.2.

3.2.2. Учёт зоны видимости атакующего

Здесь представлен сценарий, в котором атакующий при принятии решения, к какой цели далее двигаться после этапа совместного преследования, определяет ближайшую цель в своей зоне видимости – внутренних точках угла градусной меры L , содержащего вектор скорости атакующего и симметричного относительно него. Если же в зоне видимости целей нет, то атакующий отправляется преследовать цель, ближайшую по угловому расстоянию к зоне видимости, а не по абсолютному расстоянию на плоскости.

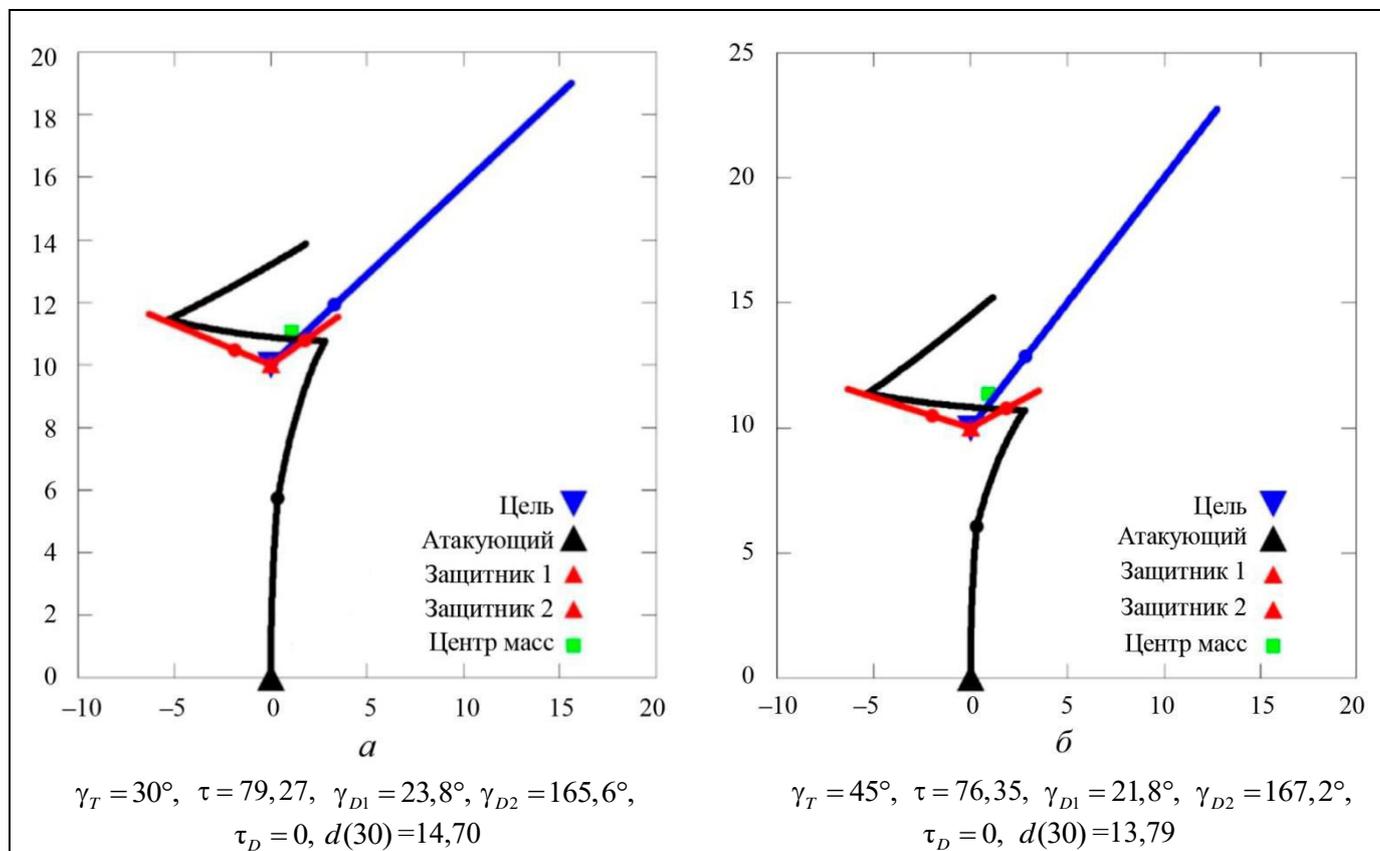


Рис. 5. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие движению атакующего к ближайшему объекту

Результаты моделирования такого сценария поведения представлены на рис. 6 и 7. Вначале атакующий некоторое время движется к центру масс всех видимых объектов, после чего начинает движение к ближайшему объекту в поле видимости,

который определяется на каждом такте наблюдений. При этом если в поле видимости находится только один объект, то атакующий движется к нему, как бы далеко он ни был, не переключаясь на близкие по расстоянию объекты, находящиеся

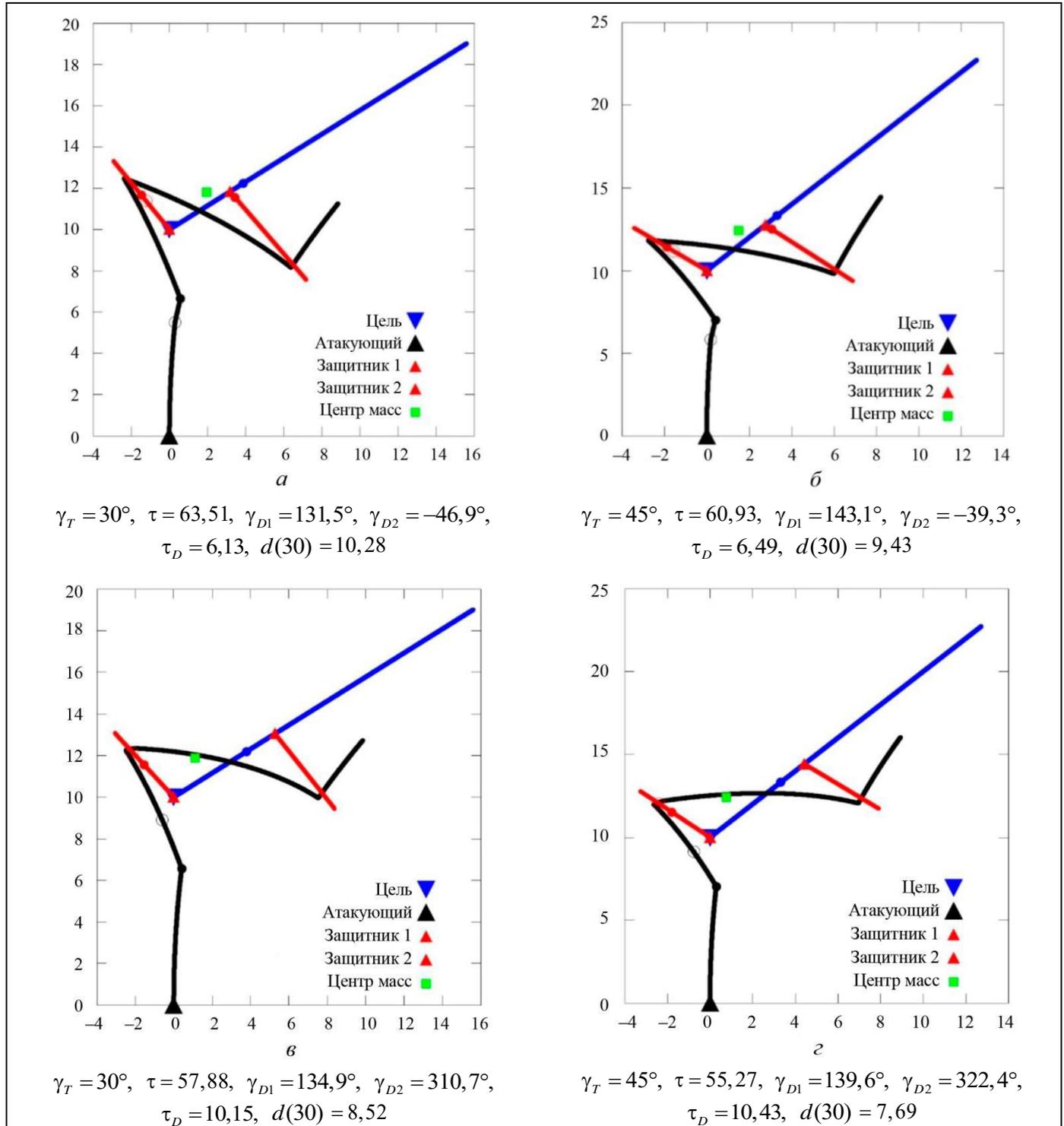


Рис. 6. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие движению атакующего: *a, б* – к ближайшему объекту в зоне видимости $L < 30^\circ$; *в, г* – после опознания первого защитника к ближайшему объекту в зоне видимости $L < 30^\circ$ и при смене курса с цели на другого защитника только в том случае, если он в какой-то момент, не ранее чем через время $\Delta t = 0,5$ после опознания первого защитника в качестве ложной цели, окажется ближе основной цели к атакующему и будет находиться в зоне $L < 15^\circ$



вне зоны видимости. Оказывается, и в этом более реалистичном случае защитники позволяют существенно увеличить время перехвата, делая его недостижимым для атакующего.

Характер траекторий на рис. 6, *a* и *б* похож. После опознания первого защитника в качестве ложной цели атакующий переключается на основной объект. Но при движении в сторону основного объекта практически сразу внутри зоны видимости атакующего $L < 30^\circ$ близко к угловой границе этой зоны обнаруживается второй защитник. При этом второй защитник находится ближе основной цели, поэтому атакующий резким поворотом переключается на него, и только после распознавания второго защитника в качестве ложной цели отправляется к основной цели. На рис. 6, *a* рассматривается случай $\gamma_T = 30^\circ$, время перехвата составляет $\tau = 63,5$, что превышает запас энергоресурса атакующего, а также существенно больше времени перехвата при таком γ_T в случае наличия лишь одного защитника, составляющего $\tau = 47,7$. На рис. 6, *б* рассматривается случай $\gamma_T = 45^\circ$, время перехвата составит $\tau = 61$, что также превышает запас энергоресурса атакующего и больше времени перехвата при таком γ_T в случае лишь одного защитника, составляющего $\tau = 45,4$.

Случаи, изображённые на рис. 6, *в*, *г*, соответствуют переходу атакующим после опознания первого защитника к движению к ближайшему объекту в зоне видимости $L < 30^\circ$, а смена курса с выбранной цели на другого защитника возможна только в том случае, если этот защитник в какой-то момент, по прошествии как минимум $\Delta t = 0,5$ единиц времени с момента опознания первого защитника, окажется ближе к атакующему, чем выбранная основная цель, и будет находиться в более узкой зоне видимости атакующего $L < 15^\circ$. Данный случай соответствует более быстрому перехвату атакующим основной цели и более плавному повороту атакующего после распознавания первой цели, что также обеспечивается существенно более поздним выпуском второго защитника, для того чтобы он наблюдался атакующим внутри зоны видимости как можно дальше от её границы.

3.2.3. Выпуск защитников с одной стороны от цели

Случай, представленный на рис. 7, построен в предположениях, соответствующих рис. 6, *a*, *б*, однако добавлено условие выпуска всех защитников с одной стороны от цели, т. е. векторы скоро-

стей обоих защитников должны лежать в одной полуплоскости относительно прямой, по которой движется основная цель.

Получены два принципиально разных по виду семейства траекторий.

На рис. 7, *a*, *б* представлены лучшие по значению функционала траектории, на которых второй защитник выпускается через время $\tau_D = 4,5 \div 5$ после начала атаки и следует примерно в место старта цели, уводя атакующего к первому защитнику от уже ушедшей с этой позиции цели.

На рис. 7, *в*, *г* приведены траектории, соответствующие существенно отличным локально оптимальным семействам, на которых в область старта цели защитники не отправляются, при этом они лишь немного проигрывают по значениям функционала траекториям из случаев, изображённых на рис. 7, *a*, *б*. В случае, изображённом на рис. 7, *в*, $\gamma_T = 30^\circ$, атакующий сначала отправляется ко второму защитнику, затем к первому и потом уже к основной цели, время перехвата $\tau = 55,8$. В случае, изображённом на рис. 7, *г*, $\gamma_T = 45^\circ$, атакующий, напротив, сначала отправляется к первому защитнику, затем – ко второму и в последнюю очередь – к основной цели. В этом случае время перехвата минимально среди рассмотренных вариантов, $\tau = 47$, что всё равно не позволяет атакующему достигнуть цели. При этом на такой траектории происходит очень надёжное переключение атакующего с первого защитника на второго, так как в момент переключения второй защитник и цель находятся под очень близкими углами обзора для атакующего, но защитник при этом намного ближе к атакующему, чем цель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведено моделирование перехвата атакующим цели в случае наличия у уходящей от преследования цели одного или двух защитников (ложных целей) при использовании различных правил преследования. Предполагалось, что основная цель и защитники движутся прямолинейно с постоянными скоростями. Углы выпуска защитников оптимизировались, также рассматривались задача оптимизации времени выпуска второго защитника и случай выпуска защитников с одной стороны от цели.

Реализован программный комплекс, симулирующий АДТ-игру, представлены результаты численных расчётов для разных моделей поведения

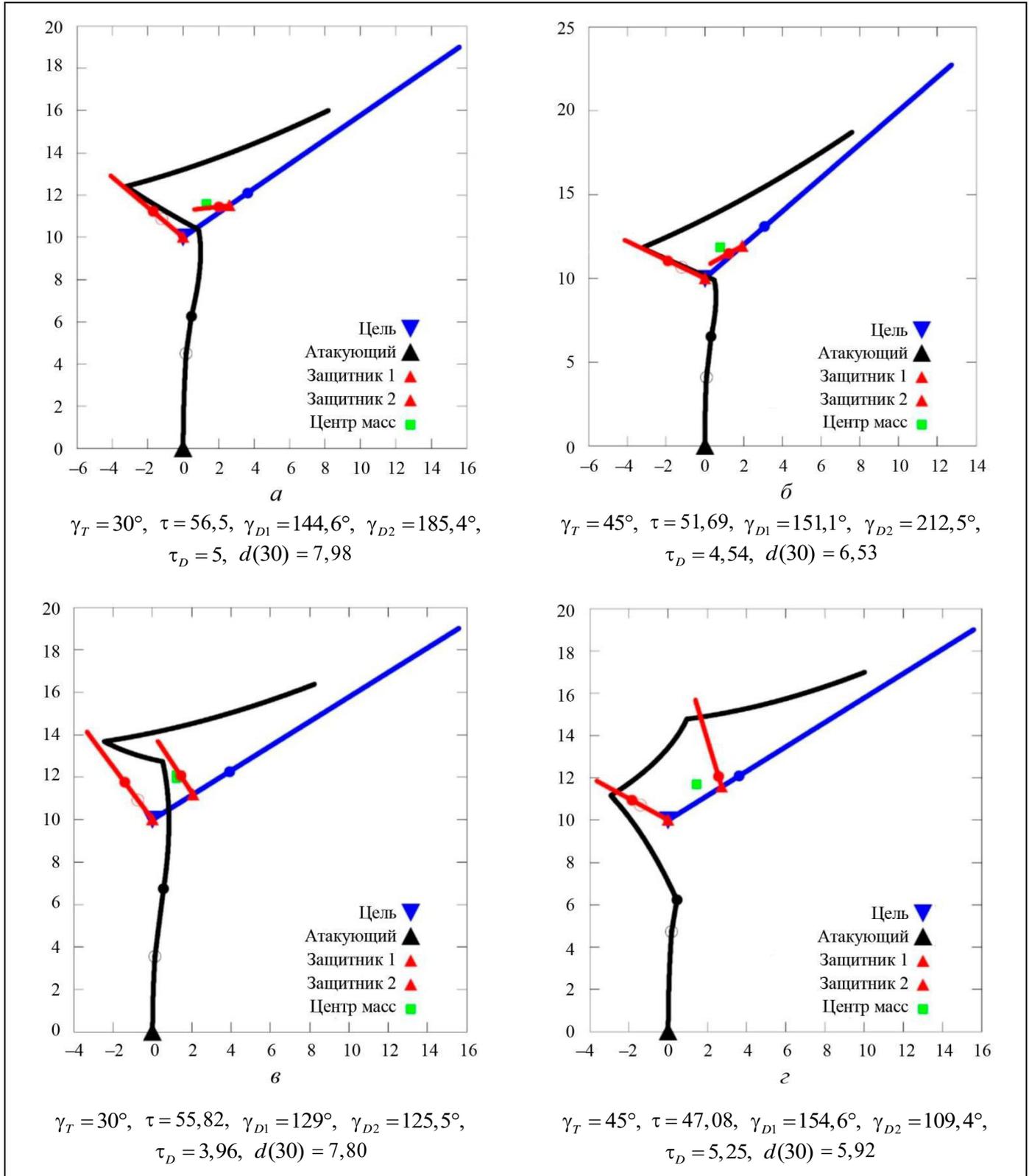


Рис. 7. Траектории движения атакующего, цели, двух защитников, соответствующие выпуску обоих защитников с одной стороны от цели

атакующего: движения к ближайшей цели, ближайшей в зоне видимости цели, ближайшей в зоне видимости цели с дополнительными условиями на переключение с основной цели на защитника.

Показано, что во всех случаях наличие второго защитника целесообразно, так как при этом значительно увеличивается время перехвата по сравнению со случаем лишь одного защитника. Также



дополнительный защитник увеличивает вероятность выбора для промежуточного преследования именно одного из защитников вместо основной цели.

При заданных в рассмотренных моделях условиях по стартовым позициям, скоростям и запасу хода в случае отвлечения атакующего на защитников в работе удалось построить схемы выпуска защитников, при следовании которым атакующему не хватит запаса энергоресурса на поражение основной цели.

В качестве перспективных направлений дальнейших исследований отметим рассмотрение большего числа защитников, а также более сложной динамики основной цели и защитников.

ЛИТЕРАТУРА

1. *García, E., Casbeer, D., Pachter, M.* The Complete Differential Game of Active Target Defense // *Journal of Optimization Theory and Applications*. – 2021. – Vol. 191. – P. 1–25. – DOI: 10.1007/s10957-021-01816-z.
2. *Zhan, K., Yu, B., Wang, J.* Simulations of the Anti-Torpedo Tactic of the Conventional Submarine Using Decoys and Jammers // *Applied Mechanics and Materials*. – 2011. – Vol. 65. – P. 165–168. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.65.165.
3. *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. – DOI: 10.3390/aerospace10020133.
4. *Jacob, T.E., Jay, P.W.* Defender-Aware Attacking Guidance Policy for the Target–Attacker–Defender Differential Game // *Journal of Aerospace Information Systems*. – 2021. – Vol. 18, no. 6. – P. 366–376. – DOI: 10.2514/1.1010877.
5. *Rubinovich, E.Ya.* Missile-Target-Defender Problem with Incomplete a priori Information // *Dynamic Games and Applications (Special Issue)*. – 2021. – Vol. 9, no. 17. – P. 851–857. – DOI: 10.1007/s13235-019-00297-0.
6. *García, E., Casbeer, D. W., Pachter, M.* Active Target Defense Differential Game with a Fast Defender // *IET Control Theory and Applications*. – 2017. – Vol. 17, no. 11. – P. 2985–2993. – DOI: 10.1049/iet-cta.2017.0302.
7. *Alkather, D., Moshaiov, A.* Game-Based Safe Aircraft Navigation in the Presence of Energy-Bleeding Coasting Missile // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. – 2016. – Vol. 39. – P. 1539–1550. – DOI: 10.2514/1.G001676.
8. *Liu, F., Dong, X., Li, Q., Ren, Z.* Cooperative differential games guidance laws for multiple attackers against an active defense target // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2022. – Vol. 35. – P. 374–389. – DOI: 10.1016/j.cja.2021.07.033.
9. *Liang, H., Wang, J., Liu, J., Liu, P.* Guidance strategies for interceptor against active defense spacecraft in two-on-two engagement // *Aerospace Science and Technology*. – 2020. – Vol. 96. – Art. no. 105529. – DOI: 10.1016/j.ast.2019.105529.
10. *Zhou, Z., Zhang, W., Ding, J., et al.* Cooperative pursuit with Voronoi partitions // *Automatica*. – 2016. – Vol. 72. – P. 64–72. – DOI: 10.1016/j.automatica.2016.05.007.
11. *Chen, M., Zhou, Z., Tomlin, C.J.* Multiplayer reach-avoid games via pairwise outcomes // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 2017. – Vol. 62, no. 3. – P. 1451–1457. – DOI: 10.1109/TAC.2016.2577619.
12. *García, E., Casbeer, D., Pham, Kh., Pachter, M.* Cooperative Aircraft Defense from an Attacking Missile using Proportional Navigation // *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*. – Kissimmee, Florida, 2015. – P. 2926–2931. – DOI: 10.2514/6.2015-0337.
13. *Girard, A., Kabamba P.* Proportional Navigation: Optimal Homing and Optimal Evasion // *SIAM Review*. – 2015. – Vol. 57 – P. 611–624. – DOI: 10.1137/130947301.
14. *Palumbo, N., Blauwkamp, R., Lloyd, J.* Modern Homing Missile Guidance Theory and Techniques // *Johns Hopkins APL Technical Digest*. – 2010. – Vol. 29, no. 1. – P. 42–59.
15. *Хайпер Э., Нёрсетт С.П., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1989. – 512 С. [Hairer, E., Norsett, S.P., Wanner, G. Solving Ordinary Differential Equations. – Berlin: Springer-Verlag, 1987. – 480 p.]
16. *Самохин А.С., Самохина М.А.* Решение задачи Коши многомерным методом Рунге-Кутты, основанным на расчётных формулах Дормана-Принса 8(7), с автоматическим выбором шага. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020611811 : заявл. 30.01.2020 : зарег. 11.02.2020. [Samokhin, A.S., Samokhina, M.A. Reshenie zadachi Koshi mnogomernym metodom Runge-Kutty, osnovannym na raschetnykh formulakh Dormana-Prinsa 8(7), s avtomaticheskim vyborom shaga. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM no. 2020611811 : appl. 30.01.2020 : reg. 11.02.2020. (In Russian)]

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

Поступила в редакцию 24.10.2023,
после доработки 04.12.2023.
Принята к публикации 04.12.2023.

Галяев Андрей Алексеевич – чл.-корр. РАН, д-р техн. наук,
✉ galaev@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6494-6880>

Самохин Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук,
✉ samokhin@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-0821-050X>

Самохина Марина Александровна – науч. сотрудник,
✉ ph@ipu.ru
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7043-706X>

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

© 2024 г. Галяев А. А., Самохин А. С., Самохина М. А.



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

MODELING OF THE TARGET'S INTERCEPTION DELAY IN AN ADT GAME WITH ONE OR TWO DEFENDERS

A. A. Galyaev*, A. S. Samokhin**, and M. A. Samokhina***

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

*✉ galaev@ipu.ru, **✉ samokhin@ipu.ru, ***✉ ph@ipu.ru

Abstract. This paper considers the Attacker–Defender–Target (ADT) problem with one or two defenders in a 2D statement. By assumption, the target and defenders move in a straight line with a constant velocity whereas the attacker moves along a catch-up trajectory with an unbounded radius of curvature. Compared to the target's velocity, the defenders move slower whereas the attacker faster. The essence of using defenders is that the attacker first intercepts them and only then switches to pursuing the primary target. As a result, the time of intercepting the primary target increases, and the target may become unattainable for the attacker due to a limited fuel capacity. The angles and times of launching the defenders are optimized, including the case where both defenders are launched on the same side of the target. Different models of the homing system of an autonomous attacking vehicle are studied: moving to the center of mass of all pursued objects and moving to the nearest target by distance or by angular range. Numerical simulations are carried out, showing the importance of choosing the angle of launch of the defenders and the reasonability of using the second defender. Also, scenarios are obtained in which using defenders makes the primary target unattainable for the attacker.

Keywords: pursuit, homing system, defenders, autonomous vehicle, optimization, numerical simulation, interception, ADT.

Acknowledgments. This work was supported in part by the Russian Science Foundation (project no. 23-19-00134).