

# ВЕСТНИК



**ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА**

**2021  
Т. 21, № 2**

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

СЕРИЯ

## «КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Решением ВАК России включен в Перечень рецензируемых научных изданий

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Журнал освещает новые научные достижения и практические разработки ученых по актуальным проблемам компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники.

Основной целью издания является пропаганда научных исследований в следующих областях:

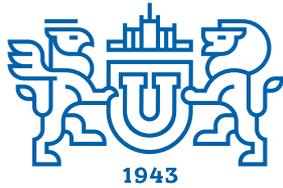
- Автоматизированные системы управления в энергосбережении
- Автоматизированные системы управления технологическими процессами
- Антенная техника
- Инфокоммуникационные технологии
- Информационно-измерительная техника
- Навигационные приборы и системы
- Радиотехнические комплексы
- Системы автоматизированного управления предприятиями в промышленности
- Системы управления летательными аппаратами

### **Редакционная коллегия:**

**Шестаков А.Л.**, д.т.н., проф. (гл. редактор) (г. Челябинск);  
**Бурков В.Н.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (зам. гл. редактора) (г. Москва);  
**Логиновский О.В.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (зам. гл. редактора) (г. Челябинск);  
**Голлай А.В.**, д.т.н., доц. (отв. секретарь) (г. Челябинск);  
**Баркалов С.А.**, д.т.н., проф. (г. Воронеж);  
**Березанский Л.**, PhD, проф. (г. Беэр-Шева, Израиль);  
**Джапаров Б.А.**, д.т.н., проф. (г. Астана, Казахстан);  
**Затонский А.В.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Куликов Г.Г.**, д.т.н., проф., засл. деятель науки РФ (г. Уфа);  
**Мазуров В.Д.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Екатеринбург);  
**Максимов А.А.**, д.т.н. (г. Новокузнецк);  
**Мельников А.В.**, д.т.н., проф. (г. Ханты-Мансийск);  
**Прангишвили А.И.**, д.т.н., проф. (г. Тбилиси, Грузия);  
**Щепкин А.В.**, д.т.н., проф. (г. Москва);  
**Ячиков И.М.**, д.т.н., проф. (г. Магнитогорск)

### **Редакционный совет:**

**Авербах И.**, PhD, проф. (г. Торонто, Канада);  
**Браверман Е.**, PhD, проф. (г. Калгари, Канада);  
**Дегтярь В.Г.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Миасс, Челябинская обл.);  
**Казаринов Л.С.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Кибалов Е.Б.**, д.э.н., проф. (г. Новосибирск);  
**Новиков Д.А.**, д.т.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Москва);  
**Панферов В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Слинько А.**, PhD, проф. (г. Окленд, Новая Зеландия);  
**Столбов В.Ю.**, д.т.н., проф. (г. Пермь);  
**Танана В.П.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);  
**Ухоботов В.И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Челябинск);  
**Ушаков В.Н.**, д.ф.-м.н., проф., чл.-корр. РАН (г. Екатеринбург);  
**Шестаков И.**, д.ф.-м.н., проф. (г. Сан-Паулу, Бразилия);  
**Ширяев В.И.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Шнайдер Д.А.**, д.т.н., проф. (г. Челябинск);  
**Штессель Ю.**, PhD, проф. (г. Хантсвилл, Алабама, США)



# BULLETIN

OF THE SOUTH URAL  
STATE UNIVERSITY

2021

Vol. 21, no. 2

SERIES

“COMPUTER TECHNOLOGIES,  
AUTOMATIC CONTROL,  
RADIO ELECTRONICS”

ISSN 1991-976X (Print)  
ISSN 2409-6571 (Online)

---

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.  
Seriya “Komp'yuternye Tekhnologii, Upravlenie, Radioelektronika”

---

## South Ural State University

The journal covers new scientific achievements and practical developments of scientists on actual problems of computer technologies, control and radio electronics.

The main purpose of the series is information of scientific researches in the following areas:

- Automated control systems in energy saving
- Automated process control
- Antenna technique
- Communication technologies
- Information and measuring equipment
- Navigation devices and systems
- Radio engineering complexes
- Computer-aided management of enterprises in industry
- Control systems of aircrafts

### Editorial Board:

**Shestakov A.L.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof. (*editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Burkov V.N.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;  
**Loginoskiy O.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation (*deputy editor-in-chief*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Gollai A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Ass. Prof. (*executive secretary*), South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Barkalov S.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Voronezh State Technical University Voronezh, Russian Federation;  
**Berezansky L.**, PhD, Prof., Ben Gurion University of the Negev, Israel;  
**Dzhaparov B.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Archive of the President of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan.  
**Zatonskiy A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science and Education of the Russian Federation, Berezniki Branch of the Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia;  
**Kulikov G.G.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Honored Worker of Science of the Russian Federation, Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;  
**Mazurov V.D.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation;  
**Maksimov A.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Open Joint Stock Company ‘Kuznetsk Ferroalloys’, Novokuznetsk, Russian Federation;  
**Melnikov A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Ugra Research Institute of Information Technologies, Khanty-Mansiysk, Russian Federation;  
**Prangishvili A.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of National Academy of Sciences of Georgia, Georgian Technical University, Tbilisi, Georgia;  
**Shchepkin A.V.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;  
**Yachikov I.M.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Magnitogorsk State Technical University of G.I. Nosov, Magnitogorsk, Russian Federation.

### Editorial Council:

**Averbakh I.**, PhD, Prof., University of Toronto, Canada;  
**Braverman E.**, PhD, Prof., St. Mary's University, Calgary, and Athabasca University, Department of Science, Athabasca, Canada;  
**Degtyar' V.G.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Academician V.P. Makeyev State Rocket Centre, Miass, Chelyabinsk region, Russian Federation;  
**Kazarinov L.S.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Kibalov E.B.**, Dr. of Sci. (Econ.), Prof., Siberian Transport University, Novosibirsk, Russian Federation;  
**Novikov D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, Institute of Control Sciences named by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation;  
**Panferov V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Slinko A.**, PhD, Prof., University of Auckland, New Zealand;  
**Stolbov V.Yu.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation;  
**Tanana V.P.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Ukhotov V.I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Ushakov V.N.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., Member Correspondent of the Russian Academy of Sciences, N.N. Krasovskiy Institute of Mathematics and Mechanics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russian Federation;  
**Shestakov I.**, Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Prof., São Paulo University, Brazil;  
**Shiryayev V.I.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Schneider D.A.**, Dr. of Sci. (Eng.), Prof., South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation;  
**Shtessel Yu.**, PhD, Prof., Huntsville, Alabama, USA.

# СОДЕРЖАНИЕ

## **Информатика и вычислительная техника**

- САПОЖНИКОВ А.Ю., КУЗНЕЦОВ А.А., МАВРИНА А.С., КУЛИКОВ Г.Г. Подход к формированию виртуальной метаструктуры цифрового проектного двойника корпоративной информационной системы машиностроительного предприятия ..... 5
- ШИНКАРЕВ А.А. Роль программного обеспечения с открытым исходным кодом в современной разработке корпоративных информационных систем ..... 16

## **Инфокоммуникационные технологии и системы**

- ХАЛИЛ З.Х., АБДУЛЛАЕВ С.М. Регрессионные прогнозы урожайности орошаемых озимых культур с использованием спутниковых вегетационных индексов: модели, предикторы и эксперименты ..... 23
- PETRENKO A.A., KUBLANOV V.S. Information Measuring System for Correction of Working Memory Parameters in the Learning Processes ..... 36

## **Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы**

- PANFEROV V.I., PANFEROV S.V., HAYUTIN A.M., TRENIN N.A. On One Solution of the Numerical Problem Differentiation in Calculation Vertical Speed of Aircraft ..... 47

## **Управление в социально-экономических системах**

- ГЕЛЬРУД Я.Д., КИБАЛОВ Е.Б., МАЛОВ В.Ю. Программный и проектный подходы при решении крупномасштабных экологических проблем ..... 58
- OZEROVA M.I., ZHIGALOV I.E. Application of Fuzzy Logic to Assess Banks' Credit Risk ..... 70
- АВЕРИНА Т.А., БАРКАЛОВ С.А., КРЮЧКОВА М.А. Совершенствование бизнес-модели строительной компании в условиях пандемии и постпандемийный период ..... 79
- ПЕРЕВАЛОВА О.С., БАРКАЛОВ С.А., КАЛИНИНА Н.Ю., БАТРАКОВА Д.Н. Модель закрепления ученика за наставником в системе обучения персонала организации ..... 92
- КУТЫШКИН А.В. Моделирование динамики валового регионального продукта ..... 104
- KORENNAYA K.A., LOGINOVSKIY O.V., ZAKHAROV V.V. Management of the State and Development of Human Resources of Industrial Enterprise in Accordance with the Dynamics of the Influence External and Internal Factors ..... 114

## **Автоматизированные системы управления технологическими процессами**

- ШЕВЕЛЕВ И.М., ЗАТОНСКИЙ А.В. Решение задачи одометрического позиционирования горно-выемочной машины под землей посредством применения фильтра Калмана ..... 123

## **Краткие сообщения**

- БЕЛОУСОВ В.Е., ДОРОФЕЕВ Д.В., ЗЕНКОВА Е.Н. Применение методов информационной инженерии для изменения структуры многоуровневых систем организационного управления ..... 136
- МУСТАЕВ И.З., ИВАНОВ В.Ю., КУЛИКОВ Г.Г., МУСТАЕВ Т.И. Проект создания авиационного изделия как особый класс инноваций ..... 145
- СИРОТИНА Н.А., КОПОТЕВА А.В., ЗАТОНСКИЙ А.В. Применение конечно-разностных моделей для краткосрочного прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края ..... 154
- КОРЕННАЯ К.А. Концептуальный базис стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями в условиях нестабильности ..... 167

# CONTENTS

## Informatics and Computer Engineering

SAPOZHNIKOV A.Yu., KUZNETSOV A.A., MAVRINA A.S., KULIKOV G.G. An Approach to the Transformation of a Virtual Metastructure of a Digital Design Twin of a Machine-building Enterprise Corporate Information System .....	5
SHINKAREV A.A. Role of Open Source Software in Modern Development of Enterprise Information Systems .....	16

## Infocommunication Technologies and Systems

KHALIL Z.H., ABDULLAEV S.M. Regression Forecasts of Irrigated Winter Crop Yields Using Satellite Vegetation Indexes: Models, Predictors and Experiments .....	23
PETRENKO A.A., KUBLANOV V.S. Information Measuring System for Correction of Working Memory Parameters in the Learning Processes .....	36

## Instrument Engineering, Metrology and Information and Measuring Devices and Systems

PANFEROV V.I., PANFEROV S.V., HAYUTIN A.M., TRENIN N.A. On One Solution of the Numerical Problem Differentiation in Calculation Vertical Speed of Aircraft .....	47
--	----

## Control in Social and Economic Systems

GELRUD Ya.D., KIBALOV E.B., MALOV V.Yu. Program and Project Approaches to Solving Large-Scale Environmental Problems .....	58
OZEROVA M.I., ZHIGALOV I.E. Application of Fuzzy Logic to Assess Banks' Credit Risk .....	70
AVERINA T.A., BARKALOV S.A., KRYUCHKOVA M.A. Improving the Business Model of a Construction Company in a Pandemic and Post-Pandemic Period .....	79
PEREVALOVA O.S., BARKALOV S.A., KALININA N.Yu., BATRAKOVA D.N. Model for Assigning a Pupil to a Mentor in the Staff Training System of the Organization .....	92
KUTYSHKIN A.V. Modeling the Dynamics of Gross Regional Product .....	104
KORENNAYA K.A., LOGINOVSKIY O.V., ZAKHAROV V.V. Management of the State and Development of Human Resources of Industrial Enterprise in Accordance with the Dynamics of the Influence External and Internal Factors .....	114

## Automated Process Control Systems

SHEVELEV I.M., ZATONSKIY A.V. Solution of the Problem of Odometric Positioning of a Mining Machine under the Ground by Using a Kalman Filter .....	123
--	-----

## Brief Reports

BELOUSOV V.E., DOROFEEV D.V., ZENKOVA E.N. Application of Methods of Information Engineering for Change of Structure of Multilayer Systems of Organizational Management .....	136
MUSTAEV I.Z., IVANOV V.Yu., KULIKOV G.G., MUSTAEV T.I. The Project of Creation of an Aviation Product as a Special Class of Innovation .....	145
SIROTINA N.A., KOPOTEVA A.V., ZATONSKIY A.V. Finite-Difference Models Application for Short-Term Forecasting of the Natural Resource Potential of the Perm Region .....	154
KORENNAYA K.A. The conceptual basis of strategic and operational management of industrial enterprises in conditions of instability .....	167

## ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ВИРТУАЛЬНОЙ МЕТАСТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТНОГО ДВОЙНИКА КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Ю. Сапожников<sup>1</sup>, А.А. Кузнецов<sup>1</sup>, А.С. Маврина<sup>1</sup>, Г.Г. Куликов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

<sup>2</sup> АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Россия

В настоящее время формируется методология системной инженерии, продуктом которой является, как правило, создание информационных моделей реальных объектов, дополненных виртуальными составляющими, и наоборот, виртуальных объектов, дополненных реальными составляющими. Например, информационная модель технологического объекта – спецификация реального оборудования, дополненная спецификацией приобретаемого оборудования какого-либо технологического процесса и наоборот. По аналогии с общей инженерией в области технической деятельности метаструктуры таких информационных моделей должны удовлетворять V-образной структуре процессов валидации и верификации. То есть модели в течение их жизненного цикла должны регулярно проверяться путем оценки степени соответствия её структуры и параметров реальным и виртуальным объектам. Сегодня существуют условия совместного решения задачи системного информационного моделирования технологических объектов с учетом их внутренней (физической) структуры и внешней структуры цифровой среды. В общетеоретическом плане в основе построения системных моделей лежит проблема формального непротиворечивого описания (грамматического исчисления) структуры и функциональных закономерностей множества объектов и их связей в исследуемой предметной области. В основу излагаемого подхода системного моделирования рассматриваемой предметной области положена классическая модель учебно-производственной деятельности машиностроительного предприятия (МП) и вуза. **Цель исследования.** Применить принципы проектного подхода для формирования метаструктуры цифрового двойника корпоративной информационной системы (КИС) машиностроительного предприятия, исследовать перспективы его применения, определить ключевые информационные компоненты в управлении предметно-ориентированными знаниями и данными, а также возможность масштабирования технологий при формировании цифровой среды для архитектуры современного МП, повышения эффективности взаимодействия участников бизнес-процессов. **Методы исследования, использованные в работе:** принципы методологии системной инженерии (процессного подхода, жизненного цикла и др.); комплексный подход и структурный анализ процесса проектирования по методологии SADT (Structured Analyze and Design Technology); методология TOGAF (The Open Group Architecture Framework). **Результаты.** Предложенный подход системного моделирования рассматриваемой предметной области является развитием работ коллектива авторов; демонстрируется возможность его масштабирования на примере взаимодействия участников НОЦ с использованием в составе вуза цифрового двойника КИС предприятия реального сектора экономики. Показана необходимость разработки модели управления знаниями, возрастающая роль информационно-поисковых систем. **Заключение.** Предложенный подход расширяет применение метаструктуры цифрового двойника, позволяет скорректировать архитектуру предприятия для повышения эффективности бизнес-процессов.

*Ключевые слова:* архитектура предприятия, TOGAF, системное моделирование бизнес-процессов, информационная платформа, PLM-система, базовая кафедра, информационно-поисковая система.

### Введение

В настоящее время в литературе информационные модели, создаваемые методами системной инженерии, принято называть цифровыми двойниками (ЦД), которые реализованы с применением CALS технологий [1]. Очевидно, составляющими архитектуры информационной системы для

## Информатика и вычислительная техника

их реализации является прежде всего реестр, определяющий множество предметно-ориентированных организационно-функциональных объектов, например, в соответствии с методологией ISO 15288 систем множество бизнес-процессов, а на следующем уровне специализированных инженерных систем типа ERP/PLM/CAD/CAM/CAE/MES/SCADA и др. [2–8].

Построенная при таком подходе комплексная системная атрибутивная модель платформы КИС (СМ<sub>кис(a)</sub>) как композиция системной модели ЦД исследуемого объекта (СМ<sub>цд,ио(b)</sub>) и информационной инженерной среды (СМ<sub>ис(c)</sub>) как расширение свойств их декартового произведения функционально связаны через 4-е измерение этапов жизненного цикла Т. То есть комплексная системная модель КИС обратима до её цифрового двойника. На теоретико-множественном языке это соответствует структуре формальной функциональной модели вида:

$$\text{КИС (СМ}_{\text{кис(a)}\text{)}(T)) = \text{СМ}_{\text{цд,ио(b)}\text{)}(T) \circ \text{СМ}_{\text{ис(c)}\text{)}(T). \quad (1)$$

Следующим шагом метаструктурной композиции системных моделей типа (1) является интеграция их в бизнес-архитектуру предприятия (АП).

В настоящее время для формального описания АП находит широкое применение формализм, предложенный Дж. Захманом [9, 10]. Формализм представляет собой обобщённый словарь и структуры для описания современных сложных корпоративных систем в декартовом пространстве общепринятых классификаторов (спецификаций) в форме OLAP-кубов. Логическая концепция этой формализации преследует цель представить системное внутреннее описание объектов и их внешнее взаимодействие с выделенных точек зрения и соответствующих уровней аспектов (абстракции).

Классическая модель представляется в виде матрицы (рис. 1).

		Объекты ЧТО	Функции КАК	Дислокация, сеть ГДЕ	Люди КТО	Время КОГДА	Мотивация ПОЧЕМУ	
Бизнес-руководители	Планировщик	Список важных понятий и объектов	Список основных бизнес-процессов	Территориальное расположение	Ключевые организации	Важнейшие события	Бизнес-цели и стратегии	Сфера действия (контекст)
	Владелец, менеджер	Концептуальная модель данных	Модель бизнес-процессов	Схема логистики	Модель потока работ (workflow)	Мастер-план реализации	Бизнес-план	Модель предприятия
	Конструктор, архитектор	Логические модели данных	Архитектура приложений	Модель распределенной архитектуры	Архитектура интерфейса пользователя	Структура процессов	Роли и модели бизнес-правил	Модель системы
IT-менеджеры и разработчики	Проектировщик	Физическая модель данных	Системный проект	Технологическая архитектура	Архитектура презентации	Структуры управления	Описания бизнес-правил	Технологическая (физическая) модель
	Разработчик	Описание структуры данных	Программный код	Сетевая архитектура	Архитектура безопасности	Определение временных привязок	Реализация бизнес-логики	Детали реализации
		Данные	Работающие программы	Сеть	Реальные люди, организации	Бизнес-события	Работающие бизнес-стратегии	Работающее предприятие
		Данные	Функции, процессы	Сеть, расположение систем	Люди, организации	Время, расписания	Мотивация	

Рис. 1. Модель Захмана  
Fig. 1. The Zachman's model

Существуют специализированные продукты, такие как Popkin Software Architect [11], основанные на модели Захмана и позволяющие достаточно эффективно управлять созданием моделей и артефактов описания АП.

Соответствующее обобщение подхода Захмана было предложено в работах Е.Б. Зиндера [12]. Основная идея заключается в обеспечении возможностей отражения постоянного развития предприятия и его информационных систем как непрерывной последовательности трансформаций в жизненном цикле.

Вместо традиционной двумерной таблицы было предложено ввести трехмерную схему, добавив к плоским схемам ось стратегического времени. На этой оси располагаются отрезки времени осуществления различных проектов и стадий развития информационных систем и всего предприятия. На рис. 2 приведен пример трехмерной схемы.

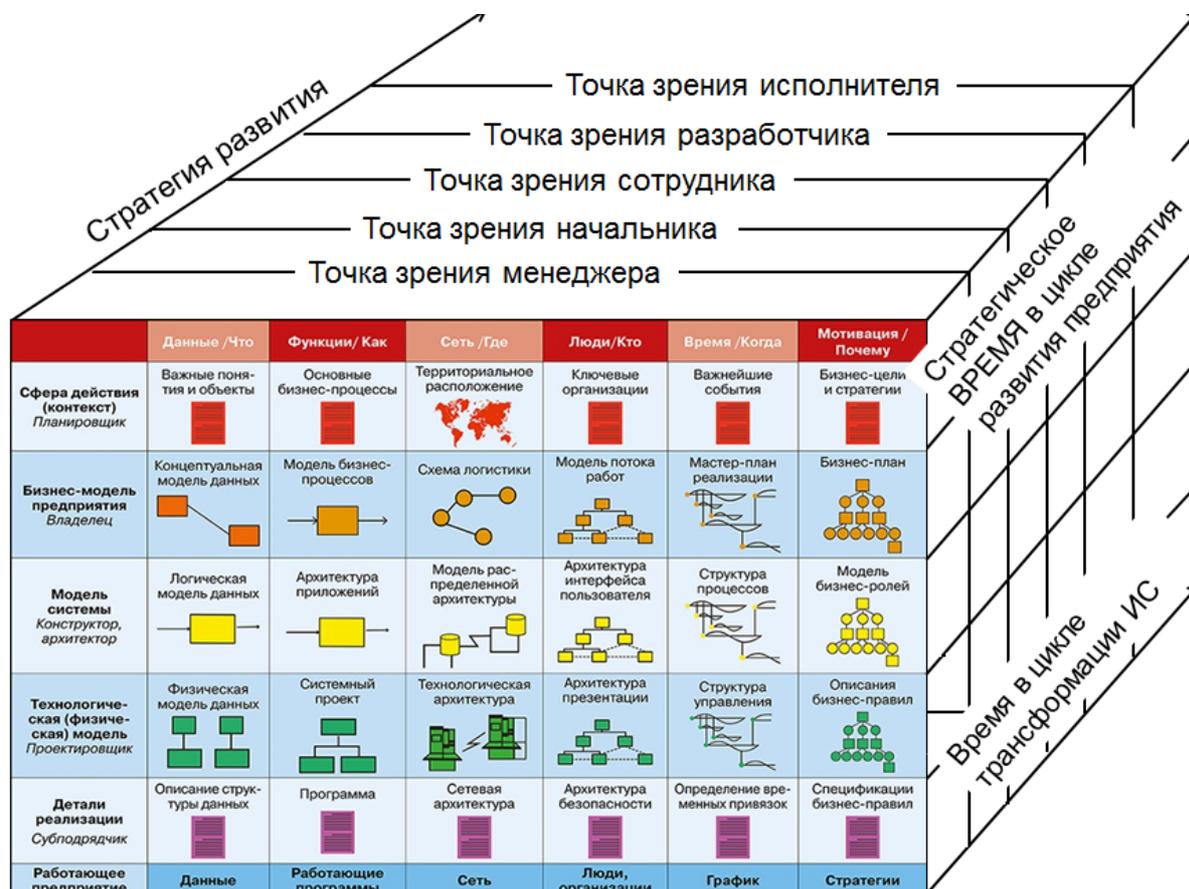


Рис. 2. Трехмерная схема архитектуры предприятия  
Fig. 2. Three-dimensional diagram of the enterprise architecture

Таким образом, «объемная» схема АП или модель «4D-предприятие» строится в трёх измерениях с учётом временного пространства.

### Пример формирования виртуальной метаструктуры цифрового проектного двойника КИС МП для образовательного процесса технического вуза

Вопросы взаимодействия вузов и производственных предприятий с использованием механизма базовых кафедр освещены в работах ряда авторов [13–16]. Ориентация программ базовых кафедр на использование передовых технологий конкретного предприятия приводит к актуальной задаче по организации инновационной обучающей площадки в виде цифрового двойника (ЦД) корпоративной информационной системы (КИС) предприятия в университете.

КИС предприятия (со своим внешним и внутренним содержанием) – это множество интегрированных между собой систем различных классов, предназначенных для применения в реализации решений. В этом смысле КИС воспринимается как инфраструктура архитектуры решений. Специалисты по информационным технологиям постоянно имеют дело с ее основными компонентами: приложениями (Application), данными (Data), технологиями (Technology) и другими архитектурными формами (безопасность (Security), тестированием (Testing)) при разработке информационных систем и обслуживания проектов.

В 1990-е годы появилась отдельная предметная область – *архитектура бизнеса*. Принято считать, что ее значимыми аспектами являются процесс (Process) и информация (Information),

организация (Organization) и производительность (Performance). Первые два классифицируют бизнес-процессы и опорные структуры, которые составляют бизнес-модель организации. Появление этой предметной области связано с желанием предприятий оптимизировать свои бизнес-процессы.

Институт разработки архитектуры предприятий (Institute for Enterprise Architecture Development, IFEAD) обобщает основные руководящие принципы дисциплины архитектуры предприятия [17]: «Нет стратегических прогнозов – нет архитектуры предприятия». Важный аспект этого утверждения заключается в том, что архитектура предприятия – это целостная дисциплина, которая объединяет элементы бизнеса и технологии, исходя из общего стратегического прогноза предприятия.

Если есть архитектура, то развитие ИТ на предприятии происходит не спонтанно (по мнению руководителей или по рекомендациям вендоров), а вся деятельность подчинена бизнесу и его стратегическим интересам. Драйвером проработки архитектуры могут служить такие решения, как радикальная модернизация, например, её перевод в «облако».

Когда приходит время выбрать методологию/инфраструктуру АП, большинство из доступных параметров принимают форму частично построенных «решений», которые могут быть адаптированы к потребностям конкретной организации.

В действительности большинство из них либо невозможно повторно использовать на практике, либо они требуют существенной адаптации. Кроме серьезной проблемы адаптации сложным является то, что мало количество имеющихся руководств, несмотря на высокий уровень понимания деталей, который требуется для их воплощения.

Большинство существующих инфраструктур либо расширяют другие архитектуры, либо повторяют их для конкретных задач. Например, инфраструктура EUP является расширением RUP, она имитирует его подход к описанию рабочих потоков процесса и деятельности, тогда как FEAF и Спивак (Spewak EA Planning Methodology) наследуют инфраструктуру Захмана.

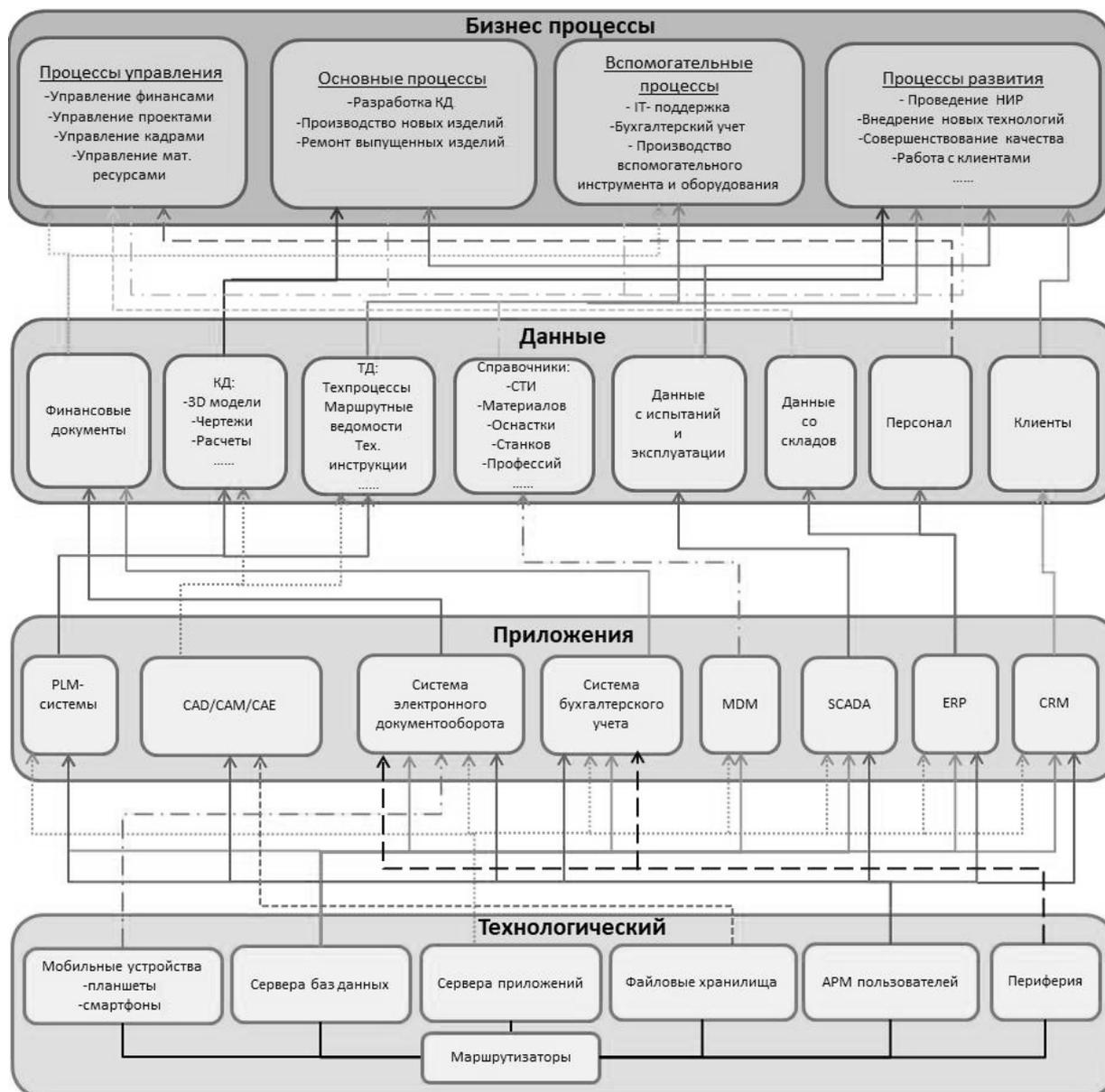
TOGAF – это инфраструктура АП, которая появилась в последние два десятилетия, происходит от ранних, специализированных технических инфраструктур архитектуры предприятия, таких как Technical Architecture Framework for Information Management (TAFIM), и создана в соответствии с рекомендациями ANSI для архитектуры предприятий (IEEE 1471-2000). Главной целью TOGAF было создать стандарт разработки архитектуры предприятия. Сформулированная членами консорциума Open Group TOGAF не всегда воплощает целостную концепцию архитектуры предприятия. Сначала TOGAF включала только технические аспекты архитектуры (версии с 1-й по 7-ю), однако недавно в эту инфраструктуру была добавлена предметная область архитектуры бизнеса (версия 8, Enterprise Edition), в результате TOGAF быстро переместилась на передний план современных вариантов инфраструктур архитектуры предприятий.

Сегодня TOGAF – это высокоуровневый подход к проектированию, методологии описания архитектуры предприятия, предполагающий разработку, планирование, внедрение ИТ-архитектуры.

Основные термины в стандарте TOGAF приведены в стандарте ISO 42010 «Программная инженерия – Описание архитектуры». TOGAF рассматривает организацию как систему, является руководящей основой (Framework) для разработки и поддержания архитектуры. Согласно TOGAF архитектуру предприятия можно представить в виде 4 основных доменов:

- 1) бизнес-архитектура – определяет стратегию предприятия, структуру управления и ключевые бизнес-процессы;
- 2) архитектура данных – описывает логическую и физическую структуру данных организации, а также структуру корпоративных ресурсов для управления данными;
- 3) архитектура приложений – служит своеобразной картой всех корпоративных приложений и определяет, во-первых, участие каждого из приложений в бизнес-процессах компании и, во-вторых, взаимодействие приложений друг с другом и внешними сервисами;
- 4) технологическая архитектура (инфраструктура) – определяет структуру и логику программного обеспечения и аппаратной среды, необходимых для работы бизнес-приложений и доступа к нужным данным. Этот уровень включает всю ИТ-инфраструктуру (сети, сервера и т. д.).

На рис. 3 представлена архитектура компании на примере предприятия машиностроительной отрасли.



**Рис. 3. Архитектура компании (на примере предприятия машиностроительной отрасли)**  
**Fig. 3. The company architecture (on the example of an enterprise in the machine-building industry)**

Цифровой (информационный) двойник КИС как адекватное отображение объектов и их связей в исследуемой предметно-ориентированной области в соответствии с принципом двойственности параллельно отображается структурой внешней среды и структурой внутреннего содержания.

С точки зрения внутреннего содержания с использованием цифровых двойников КИС в университете могут отрабатываться новые подходы к архитектуре предприятий и организации бизнес-процессов, которые затем будут внедрены. Цифровой двойник КИС становится «песочницей», содержащей конкретные технологии, в которой с привлечением научного потенциала появляются новые решения.

Создание архитектуры предприятия характеризуется цикличностью, итерации следует планировать в соответствии с крупными фазами в разработке бизнеса. Как известно [18], выделяют 4 категории процессов: основные, вспомогательные, управления, совершенствования. В этом смысле проявляется влияние внешней среды, формирующей требования к цифровому двойнику, порядок его создания и развития. Изначально построение ЦД КИС базируется на одном из основных бизнес-процессов.

Продemonстрируем влияние внешней среды на примере создания цифрового двойника КИС конструкторского бюро машиностроительной отрасли, где одним из основных процессов является разработка конструкторской документации. В этом случае на первой итерации при реализации цифрового двойника КИС должны быть реализованы приложения, технологические ресурсы, обеспечивающие данный бизнес-процесс (на рис. 4 область, выделенная пунктиром).

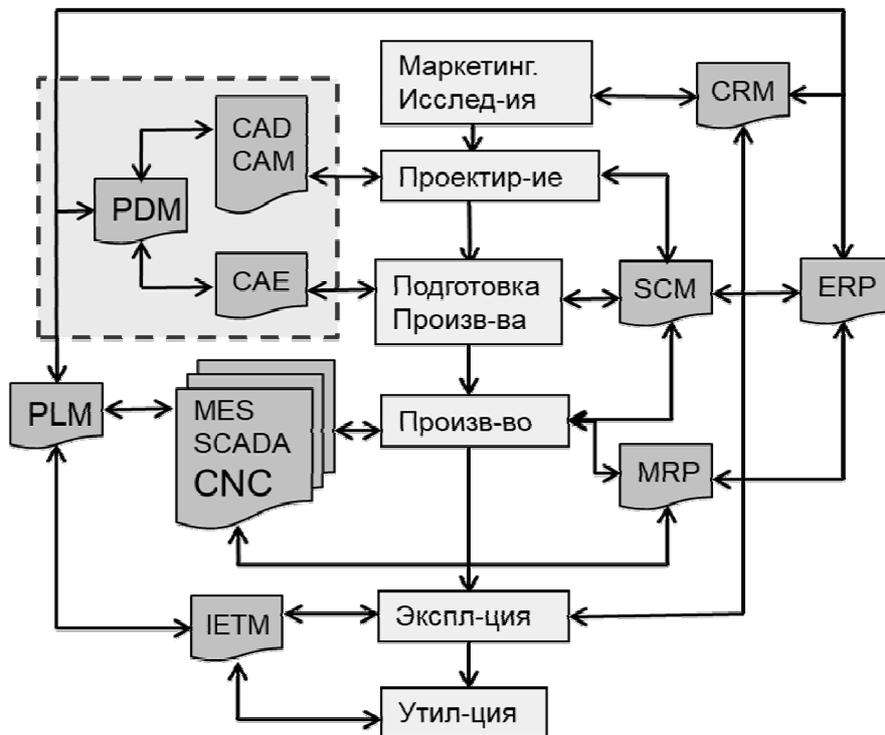


Рис. 4. Двойник отраслевой цифровой платформы  
Fig. 4. The twin of an industry-specific digital platform

Дальнейшее масштабирование происходит в порядке проработки бизнес-процессов, указанном в [18]. Как видно из рис. 4, все стадии ЖЦ связаны PLM-системой. Расширение ее функциональных возможностей для процесса разработки конструкторской документации подробно рассмотрено в [19, 20].

В рамках национального проекта «Наука» в России появилось 10 научно-образовательных центров (НОЦ) мирового уровня. Их целью является рост науки, образования, технологий в социально-экономическое развитие региона и страны, выраженное в увеличении вклада участников Центра в достижение национальных целей развития РФ, определенных Указом Президента РФ № 474 от 21 июля 2020 г. В составе НОЦ объединяются усилия ведущих университетов, научных организаций, компаний реального сектора экономики для решения актуальных научно-технических задач.

Цифровая поддержка НОЦ может обеспечиваться взаимодействием информационных платформ, являющихся цифровыми двойниками КИС в IT-инфраструктуре университетов, информационных систем малых инновационных предприятий (ИС МИП), а также КИС научных организаций и организаций реального сектора экономики. Поскольку НОЦ организуются по региональному принципу, поддерживая, в первую очередь, «сильные предприятия» различных направлений и отраслей, то в опорных вузах может существовать ряд базовых кафедр одного индустриального партнера или нескольких (рис. 5), связанных со своим ЦД КИС каждая.

Организация работы над проектами в кооперации нескольких участников означает появление и накопление новых видов структурированной или неструктурированной информации, распределенной по многочисленным узлам вычислительной сети, что приводит к появлению задачи большой размерности. Наличие баз данных и баз знаний, а также инициация запросов к ним с использованием интерфейса указывает на необходимость разработки модели управления знаниями.

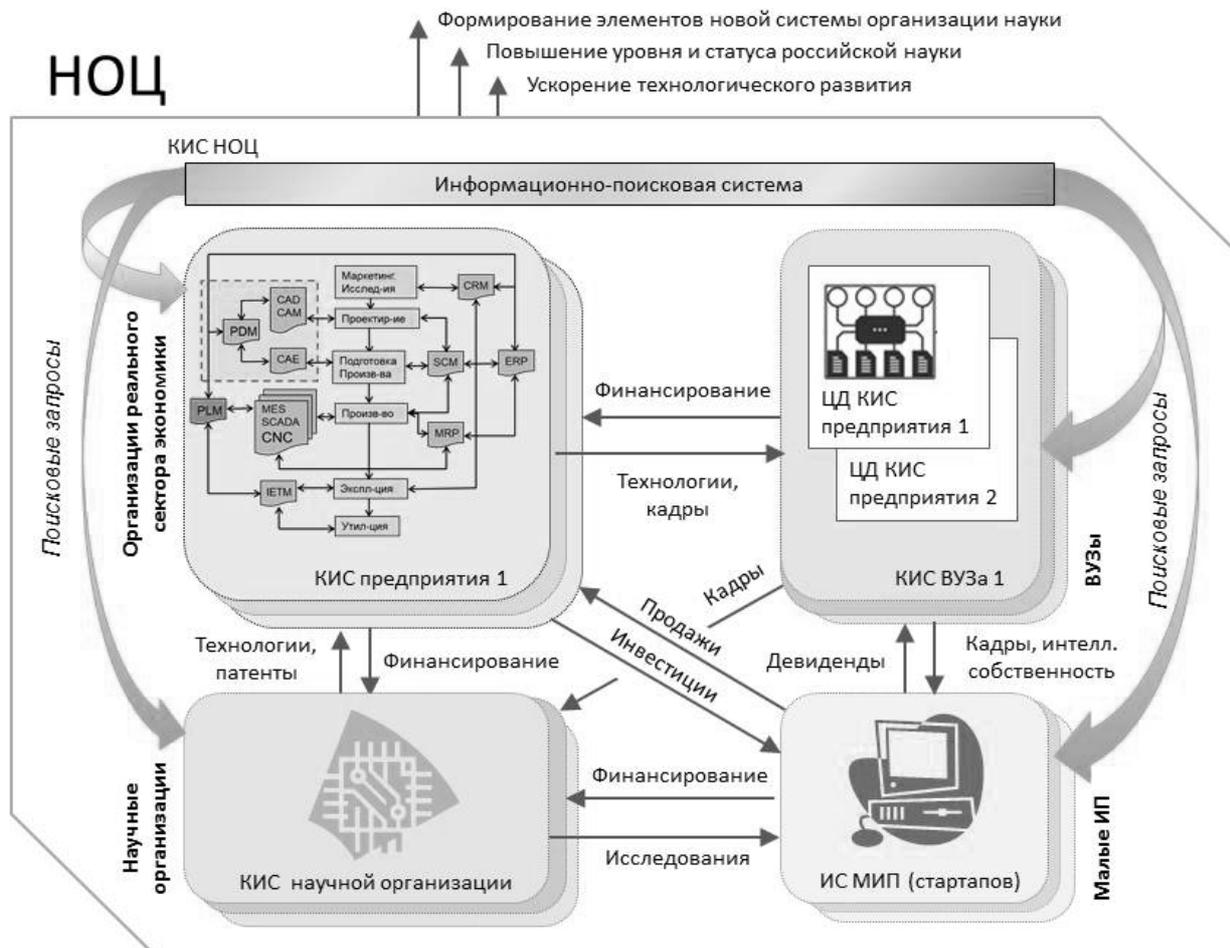


Рис. 5. Схема взаимодействия участников НОЦ  
Fig. 5. The scheme of REC participants interaction

В качестве подхода в области управления и интеграции данных предлагается платформа поддержки пространств данных – DSSP (dataspace support platform) [21].

Использование систем поддержки информационных пространств позволяет обеспечить оперативный доступ к информации, находящейся в различных источниках с различными моделями данных и способами хранения.

Предложенная в работе [22, 23] модель аннотирования и идентификации может быть реализована с использованием информационно-поисковых систем. Поиск документов из коллекции, которые являются наиболее релевантными по отношению к произвольным информационным потребностям, сообщаемым системе при помощи однократных, инициированных пользователем запросов, продемонстрирован на примере кафедры университета.

Актуальность информационно-поисковой системы возрастает при коллективной работе в сложных структурах, одной из которых является НОЦ.

## Выводы

1. Рассмотрен прикладной аспект создания и развития цифровых двойников КИС предприятий с учетом требований к архитектуре решений, архитектуре бизнеса и архитектуре предприятий (TOGAF).

2. Рассмотрены перспективы использования цифровых двойников КИС предприятий в составе университета для их эффективной интеграции в состав внешних структур.

3. Использование информационно-поисковых систем позволяет в автоматизированном режиме производить идентификацию объектов информационного пространства, выполнять их поиск и навигацию.

4. Предложена концептуальная модель для организации взаимодействия участников НОЦ, обеспечивающая формирование элементов новой системы организации науки, повышение уровня и статуса российской науки, ускорение технологического развития.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90061.

### Литература

1. Международная энциклопедия CALS. *Авиационно-космическое машиностроение* / под ред. А.Г. Братухина. – М.: ОАО «НИЦ АСК», 2015. – 608 с.
2. Фролов, Д. Обзор возможностей ANSYS Mechanical для решения инженерных задач // САПР и графика. – 2010. – № 11. – С. 46–49.
3. Решения Siemens PLM Software модернизируют производство российских авиадвигателей // САПР и графика. – 2010. – № 3. – С. 54–57.
4. Григорьев, А.А. Характеристика, структура, организация систем управления ERP, ERP II и ERP III / А.А. Григорьев, В.А. Титов // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 2. – С. 48–51.
5. Кизина, И.Д. Математическое моделирование и прикладные информационные технологии для MES-уровня управления / И.Д. Кизина // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2008. – № 4. – С. 37–44.
6. Киселев, А.Г. Концепция структуры КИС промышленного предприятия (ERP&MES&SCADA+PDM) и проблема подготовки специалистов / А.Г. Киселев // *Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий*. – 2008. – № 1. – С. 220–223.
7. Хисамутдинов, М.Р. Аспекты интеграции ERP с информационными системами PLM и MES при импортозамещении ИТ продуктов / М.Р. Хисамутдинов // *Научно-технический вестник Поволжья*, 2015. – № 6. – С. 208–212.
8. *Cimatronit – компьютерное проектирование и производство* / Л.И. Зильбербург, С.М. Марьяновский, В.И. Молочник, Е.И. Яблочников. – СПб.: КИЦ «Мир», 1998. – 166 с.
9. Ризванов, К.А. Информационная система поддержки процессов испытаний ГТД на основе организационно-функциональной модели: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.А. Ризванов. – Уфа, 2008. – 16 с.
10. Sowa, J.F. *Extending and Formalizing the Framework for Information System Architecture* / J.F. Sowa, J.A. Zachman // *IBM Systems Journal*. – 1992. – Vol. 31, no. 3. – P. 17–25.
11. Harmon, P. *Software: System Architect 9.0* / P. Harmon // *Business Process Trends*. – 2002. – P. 1–8.
12. Зиндер, Е.З. «Информационно-технологическая модель прикладной» – модель трансформирующейся системы / Е.З. Зиндер // *Директор ИС*. – 2000. – № 4. – С. 12–15.
13. Куликов, Г.Г. Информационно-технологическая модель прикладной цифровой платформы базовой кафедры в наукоемких отраслях промышленности / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов // *Управление экономикой: методы, модели, технологии: материалы XIX Междунар. науч. конф.* – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 282–285.
14. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства «вуз – предприятие») / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов и др. // *Вестник УГАТУ*. – 2019. – Т. 23, № 4 (86). – С. 154–160.
15. Радионов, А.А. Условия эффективности деятельности базовых кафедр вузов / А.А. Радионов, А.Д. Рулевский // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки»*. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 87–93. DOI: 10.14529/ped160112
16. Фахруллина, А.Р. Модели и методы проектирования программных систем для обработки разнородных данных (на примере программного обеспечения образовательно-производственной среды): автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Р. Фахруллина. – Уфа, 2016 – 16 с.
17. Темненко, В. Быть или не быть TOGAF: распространение архитектуры предприятия за границы RUP / В. Темненко. – <http://ibm.com/developerworks/ru/library/r-temnenko> (дата обращения: 20.01.2021).

18. Рыбаков, М.Ю. *Бизнес-процессы: как их описать, отладить и внедрить. Практикум* / М.Ю. Рыбаков. – М.: Изд-во Михаила Рыбакова, 2016. – 392 с.

19. Разработка алгоритма экспертной системы для контроля КД в ЕИП предприятий машиностроения / А.Г. Лютов, В.А. Огородов, А.Ю. Сапожников, А.С. Маврина // *Всероссийская научно-практическая конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста»: материалы.* – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 152–159.

20. Разработка технологии автоматизированного контроля КД с использованием PLM-системы / А.С. Маврина, Д.И. Загидуллин, В.А. Огородов, А.Ю. Сапожников // *XIII Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения».* – Уфа, 2019. – Т. 4, ч. 1. – С. 29–35.

21. Franclin, M. *From databases to datespaces: a new abstraction or information monedement* / M. Franclin, A. Halevy, D. Maier. – [http://www.citforum.ru//databe/articles/from\\_ab\\_to\\_ds/](http://www.citforum.ru//databe/articles/from_ab_to_ds/) (дата обращения: 20.01.2021).

22. Бармин, А.А. Структурирование контента информационного пространства под решаемые в предметной области задачи / А.А. Бармин // *Труды второй международной конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений», 18–21 мая 2014, Уфа, Россия.* – Уфа, 2014. – С. 148–154.

23. Структурирование контента информационного пространства технического университета с использованием процессного подхода и семантической идентификации / С.Ф. Бабак, Г.Г. Куликов, А.А. Бармин, Г.В. Старцев // *Вестник УГАТУ.* – 2014. – Т. 18, № 4 (65). – С. 105–114.

**Сапожников Алексей Юрьевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры ИТ в машиностроении, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; axl\_mail\_box@mail.ru.

**Кузнецов Александр Андреевич**, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; kuznecovopkr@gmail.com.

**Маврина Анна Сергеевна**, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; nytk\_008@mail.ru.

**Куликов Григорий Геннадьевич**, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа; grisha@molniya-ufa.ru.

*Поступила в редакцию 1 февраля 2021 г.*

DOI: 10.14529/ctcr210201

## AN APPROACH TO THE TRANSFORMATION OF A VIRTUAL METASTRUCTURE OF A DIGITAL DESIGN TWIN OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE CORPORATE INFORMATION SYSTEM

**A.Yu. Sapozhnikov<sup>1</sup>**, axl\_mail\_box@mail.ru,

**A.A. Kuznetsov<sup>1</sup>**, kuznecovopkr@gmail.com,

**A.S. Mavrina<sup>1</sup>**, nytk\_008@mail.ru,

**G.G. Kulikov<sup>2</sup>**, grisha@molniya-ufa.ru

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

<sup>2</sup> JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russian Federation

Currently, the methodology of system engineering is being formed, the product of which is, as usual, the creation of real objects information models, supplemented by virtual components, and on the contrary, virtual objects, supplemented by real components. For example, an information model of a technological object is a specification of real equipment, supplemented by a specification of

the purchased equipment of a technological process and on the contrary. By analogy with general engineering in the field of technical activity, the metastructures of such information models must meet the V-shaped structure of the validation and verification processes. Therefore, models should be regularly checked during their life cycle to ensure that their structure and parameters correspond to real and virtual objects. At the present, there are conditions for a coordinated decision of technological objects system information modeling, taking into account their internal (physical) structure and of the digital environment the external structure. In general theoretical terms, the construction of system models is based on the problem of formal consistent description (grammatical calculus) of the structure and functional regularities of a set of objects and their connections in the subject area under study. The presented approach of the subject area system modeling under consideration is based on the classical model of a machine-building enterprise (MP) educational and production activities and a university. **Aim.** To apply the principles of the design approach for the formation of a corporate information system (CIS) engineering company metastructure digital twin, to explore the prospects of its application, to show the key information components in the management of subject-oriented knowledge and data, as well as the ability to scale technology in the formation of a digital environment for architecture and modern MP, improving the efficiency of business processes participants interaction. **Materials and methods.** The principles of the system engineering methodology (process approach, life cycle, etc.), an integrated approach and structural analysis of the design process according to the SADT (Structured Analysis and Design Technology) methodology, and the TOGAF (The Open Group Architecture Framework) methodology are used. **Results.** The proposed approach for system modeling the subject area is the development of works of the authors, demonstrates the possibility of scaling on the example of interaction of participants of the REC using part of the University's digital twin KIS enterprises of the real sector of the economy. The requisite of developing a knowledge management model and the increasing role of information search engines are shown. **Conclusion.** The proposed approach expands the application of the digital twin metastructure, allows correcting the enterprise architecture to improve the efficiency of business processes.

*Keywords:* architecture framework, TOGAF, system modeling of business processes, information platform, PLM-system, basic chair, information and search engine.

**The reported study was funded by RFBR, project No. 20-37-90061.**

### References

1. Bratukhin A.G. (Ed.) *Mezhdunarodnaya entsiklopediya CALS* [International Encyclopedia of CALS. Aviation and space engineering]. Moscow, JSC "SIC ASK", 2015. 608 p.
2. Frolov D. [Review of the capabilities of ANSYS Mechanical for solving engineering problems]. *CAD and Graphics*, 2010, no. 11, pp. 46–49. (in Russ.)
3. [Siemens PLM Software solutions modernize the production of Russian aircraft engines]. *CAD and Graphics*, 2010, no. 3, pp. 54–57. (in Russ.)
4. Grigoriev A.A., Titov V.A. [Characteristic, structure, organization of ERP, ERPII and ERP III management systems]. *Fundamental Research*, 2017, no. 2, pp. 48–51. (in Russ.)
5. Kizina I.D. [Mathematical modeling and applied information technologies for MES-level management]. *Automation, telemechanization and communication in the oil industry*, 2008, no. 4, pp. 37–44. (in Russ.)
6. Kiselev A.G. [The concept of the structure of the CIS of an industrial enterprise (ERP&MES&SCADA+BPM) and the problem of training specialists]. *Innovations in the development of information and communication technologies*, 2008, no. 1, pp. 220–223. (in Russ.)
7. Khisamutdinov M.R. [Aspects of ERP integration with PLM and MES information systems at import substitution of IT products]. *Scientific and Technical Vestnik of the Volga Region*, 2015, no. 6, pp. 208–212. (in Russ.)
8. Zilberburg L.I., Maryanovsky S.M., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. *Cimatronit – komp'yuternoye proyektirovaniye i proizvodstvo* [Cimatronit – computer design and production]. St. Petersburg, KPC "Mir", 1998. 166 p.
9. Rizvanov K.A. *Informatsionnaya sistema podderzhki protsessov ispytaniy GTD na osnove organizatsionno-funktional'noy modeli. Dis. kand. tekhn. nauk* [Information system for supporting the GTD test processes based on the organizational and functional model. Cand. sci. diss.]. Ufa, 2008. 16 p.

10. Sowa J.F., Zachman J.A. Extending and Formalizing the Framework for Information System Architecture. *IBM Systems Journal*, 1992, vol. 31, no. 3, pp. 17–25.
11. Harmon P. Software: System Architect 9.0. *Business Process Trends*, 2002, pp. 1–8.
12. Zinder E.Z. [“3D-enterprise” – a model of a transforming system]. *Director of IS*, 2000, no. 4, pp. 12–15. (in Russ.)
13. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A. [Information technology model of the applied digital platform of the basic Department in science-intensive industries]. *Economic management: methods, models, technologies: materials of the XIX International scientific conference*. Ufa, RIK UGATU, 2019, pp. 282–285. (in Russ.)
14. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A. A., Mavrina A. S., Zagidullin D. I. [Approach to the application of the concept of digital doubles for the transformation of the corporate information system under the requirements of INDUSTRY 4.0 (on the example of creating a single information space “university – enterprise”)]. *Vestnik USATU*, 2019, vol. 23, no. 4 (86), pp. 154–160. (in Russ.)
15. Radionov A.A., Rulevskiy A.D. Conditions of Effectiveness of University Basic Departments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Education. Educational Sciences*. 2016, vol. 8, no. 1, pp. 87–93. (in Russ.) DOI: 10.14529/ped160112
16. Fakhrullina A.R. *Modeli i metody proyektirovaniya programmnykh sistem dlya obrabotki raznorodnykh dannykh (na primere programmnoho obespecheniya obrazovatel'no-proizvodstvennoy sredy)*. Dis. kand. tekhn. nauk [Models and methods of designing software systems for processing heterogeneous data (on the example of software for the educational and production environment). Cand. sci. diss.]. Ufa, 2016. 16 p.
17. Temnenko V. [To be or not to be TOGAF: Extending enterprise architecture beyond the boundaries of RUP]. Available at: <http://ibm.com/developerworks/ru/library/r-temnenko> (accessed 20.01.2021). (in Russ.)
18. Rybakov M.Yu. *Biznes-protsessy: kak ikh opisyat', otladit' i vnedrit'*. *Praktikum* [Business processes: how to describe them set them up and implement them]. Moscow, Mikhail Rybakov Publ., 2016. 392 p.
19. Lyutov A.G., Ogorodov V.A., Sapozhnikov A.Yu., Mavrina A.S. [Development of an algorithm of expert system for control of design documentation in uis of engineering enterprises]. *All-Russian Scientific and practical conference “Machine tool construction and innovative mechanical engineering. Problems and points of growth”*. Ufa, 2019, pp. 152–159. (in Russ.)
20. Mavrina A.S., Zagidullin D.I., Ogorodov V.A., Sapozhnikov A.Yu. [Development of the algorithm of the expert system for the control of the CD in the IIP of machine-building enterprises]. *XIII All-Russian Youth Scientific Conference “Mavlyutov readings”*. Ufa, 2019, vol. 4, part 1, pp. 29–35. (in Russ.)
21. Franclin M., Halevy A., Maier D. From databases to datespaces: a new abstraction for information monedement. Available at: [http://www.citforum.ru/databe/articles/from\\_ab\\_to\\_ds/](http://www.citforum.ru/databe/articles/from_ab_to_ds/) (accessed 20.01.2021).
22. Barmin A.A. [Structuring the content of the information space for the tasks solved in the subject area]. Proceedings of the Second International Conference “Information Technologies of Intellectual Decision Support”, May 18–21, 2014, Ufa, Russia, pp. 148–154. (in Russ.)
23. Babak S.F., Kulikov G.G., Barmin A.A., Startsev G.V. [Structuring the content of the information space of the technical university using the process approach and semantic identification]. *Vestnik USATU*, 2014, vol. 18, no. 4 (65), pp. 105–114. (in Russ.)

Received 1 February 2021

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Подход к формированию виртуальной метаструктуры цифрового проектного двойника корпоративной информационной системы машиностроительного предприятия / А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов, А.С. Маврина, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr210201

#### FOR CITATION

Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Kulikov G.G. An Approach to the Transformation of a Virtual Metastructure of a Digital Design Twin of a Machine-building Enterprise Corporate Information System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 5–15. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210201

## РОЛЬ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ В СОВРЕМЕННОЙ РАЗРАБОТКЕ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**А.А. Шинкарев**

ООО «Софтмаст-ИТ», г. Челябинск, Россия

На текущий момент существует множество программных продуктов или пакетов с открытым исходным кодом, и их количество с каждым днем увеличивается. Из этого можно сделать вывод о том, что публикация исходного кода становится все более и более популярным веянием в мире разработки программного обеспечения. Особое внимание при публикации исходного кода программного решения или пакета для его использования в сообществе разработчиков следует уделить типу лицензии – от этого зависит то, какие сценарии будут доступны для использования с применением опубликованного пакета или программного решения. Также необходимо составить полную и подробную документацию и определиться со способами продвижения публикуемого пакета в среде разработчиков. **Цель исследования.** Обосновать целесообразность и необходимость публикации программных продуктов, пакетов и библиотек для использования их другими разработчиками для построения собственных систем и сервисов. Привести описание основных типов лицензий открытого программного обеспечения, выявить их особенности и отличия, а также описать те ситуации, для которых тот или иной тип лицензии подходит в большей или меньшей степени. Обосновать необходимость написания документации. Описать способы продвижения и популяризации в сообществе разработчиков публикуемых программных продуктов, пакетов и библиотек. **Материалы и методы.** Рассматриваются официальные документы лицензий с описанием условий использования, воспроизведения и распространения. Анализируются основные пути и способы продвижения программных продуктов с открытым исходным кодом. **Результаты.** В статье автором обосновывается актуальность публикации и использования исходного кода разработанного программного продукта, пакета или библиотеки. Описываются основные положения наиболее распространенных типов лицензий. Также приводятся советы по выбору типа лицензии при публикации исходного кода для свободного использования. Обосновывается необходимость написания документации по публикуемому программному продукту. Описываются некоторые способы для продвижения опубликованных пакетов, например, такие как грамотный выбор имени, выступление на конференциях или публикация статей с примерами использования.

*Ключевые слова:* корпоративные информационные системы, программное обеспечение с открытым исходным кодом, MIT, Mozilla Public License 2.0, Apache License 2.0.

### Введение

Сегодня все большее значение приобретает открытость компаний, занимающихся разработкой программного обеспечения. Под открытостью подразумевается не столько финансовая прозрачность или контролируемость внутрикорпоративных процессов извне, сколько их технологическая открытость, их приверженность сообществу свободного программного обеспечения (Free Software Community) [1]. Что же такое технологическая открытость ИТ-компаний здесь и сейчас? Под технологической открытостью с одной стороны можно понимать степень вовлеченности ресурсов компании в разработку программного обеспечения с открытым исходным кодом, а с другой – стремление повторно использовать решения, разработанные другими членами сообщества.

Практически ни один современный проект по разработке программного обеспечения не обходится без использования открытых и в большинстве своем бесплатных программных пакетов, ускоряющих разработку и снижающих ее конечную стоимость. Однако пока не так много компаний рассматривают возможность публикации своих наработок в открытом доступе. Помимо нежелания участвовать в разработке программного обеспечения с открытым исходным кодом многие также не считают целесообразным поддерживать существующие пакеты и вносить в них изменения для своих нужд. Вместо этого начинается разработка своего решения уже в каком-то

виде решенной задачи, что в некотором смысле приводит к освоению бюджета на разработку и созданию интересных задач для программистов вместо решения проблем, стоящих перед бизнес-пользователями приложений.

Критически важным навыком для ИТ-подразделения современных компаний становится умение соблюдать баланс между разработкой закрытой кодовой базы приложений и участием в разработке программного обеспечения с открытым исходным кодом для тех частей приложения, которые не несут бизнес-ценности, а лишь сопровождают выполнение основных целей. Типичным примером внутренней разработки, которую нужно либо выносить в открытое пространство, либо полностью заменять на использование готового, является разработка своих библиотек компонентов пользовательского интерфейса, а также создание своих инструментов поддержки и сопровождения активностей по развертыванию приложений (DevOps) [2], подсистем аутентификации и авторизации, шаблонов веб-приложений и серверных сервисов, то есть любых программных решений, которые не несут уникальной для бизнеса ценности.

## 1. Основные типы лицензий программного обеспечения с открытым исходным кодом

На сегодняшний день существует довольно внушительное количество лицензий для программного обеспечения с открытым исходным кодом. Ознакомиться с достаточно полным списком широко распространенных лицензий для программного обеспечения можно здесь [3].

Предлагается рассмотреть лишь несколько типов лицензий, которые позволяют публиковать исходный код программных решений с наиболее гибкими условиями использования и распространения и в то же время налагают минимальное количество ограничений, что упрощает использование программного кода в коммерческой корпоративной разработке.

Как и в случае с началом работы с новым программным пакетом, когда важна простота и минимальное время до получения первых результатов работы, в случае с лицензированием важно то, насколько просто работать с лицензией и насколько понятны и прозрачны ее условия.

При описании особенностей лицензий использовались следующие ресурсы [4–8].

### 1.1. Лицензия MIT

Представляет собой разрешительную лицензию, разрешает делать с кодом практически все, что угодно, при условии, что сама лицензия и указание авторства останутся без изменений даже в случае значительной реструктуризации первоначального программного обеспечения, поставляемого под этой лицензией.

У этой лицензии есть один существенный минус – она не гарантирует пользователю патентных прав [9].

Данная лицензия может хорошо подойти для ситуаций, когда компания хочет поделиться техническими наработками, не дающими бизнесу конкурентных преимуществ, но позволяющими повторно использовать удачные решения в других проектах.

### 1.2. Лицензия Apache License 2.0

Еще одна разрешительная лицензия, схожая с MIT, но с несколькими важными отличительными чертами. Во-первых, при использовании программного обеспечения, выпущенного под данной лицензией, обязательно указание изменений, внесенных в оригинальное решение. Во-вторых, для производных решений нельзя использовать те же названия, если они являются торговыми.

Важным преимуществом по сравнению с MIT является предоставление патентных прав на производные программные продукты.

Данная лицензия подходит в случае, когда необходимо опубликовать в открытом доступе решение, представляющее собой продукт с определенным названием, которое используется при его распространении. Продукт может быть как полностью бесплатным, так и комбинировать платное и бесплатное распространение в разных сценариях использования. Например, эта лицензия подойдет для публикации исходного кода мобильного приложения, что делает логику его работы прозрачной, но и защищает уже выбранное имя от нежелательного повторного использования. Другим примером может быть исходный код облачного сервиса, который выполняет определенную ценную работу и предоставляется как платно по подписке, так и бесплатно в случае самостоятельного развертывания и поддержки на внутрикорпоративных серверных мощностях.

### 1.3. Mozilla Public License 2.0

Данная лицензия хорошо подходит для разработки библиотек из-за слабых правил копиленфта, когда нет необходимости распространять исходный код библиотеки вместе с программным обеспечением, в котором она используется. Однако эта лицензия предполагает лицензирование производных программных продуктов под той же лицензией, что важно в том случае, когда нежелательно, чтобы доработки библиотеки имели, например, более ограничивающую лицензию, чем задумывалось автором.

Также в производных работах защищены названия, используемые в проекте, если они являются торговыми марками.

## 2. Сценарии создания программного обеспечения с открытым исходным кодом в рамках внутрикорпоративной разработки

В современных условиях создания внутрикорпоративного программного обеспечения можно выделить три основных направления.

1. Разработка клиентских веб-приложений или же фронтенд-разработка (frontend development).
2. Разработка серверной части информационных решений или бекенд-разработка (backend development).
3. Работа в направлении автоматизации развертывания и управления жизненным циклом информационных систем или девопс (DevOps).

В рамках каждого направления разработки сегодня возможно и целесообразно ведение активности по публикации наработок в открытое пространство для повторного использования, в том числе другими компаниями. Использование публичных репозиторий (repository) с исходным кодом библиотек в сочетании с публикацией их сборок в публичные регистры, такие как npm, pypi [10], ведут не только к большей прозрачности и надежности, но и создают положительный образ компании в глазах разработчиков, что, в свою очередь, упрощает процесс поиска кандидатов на открывающиеся вакансии.

Рассматривая фронтенд-разработку и наиболее распространенные сценарии создания разделяемых пакетов, в том числе и не доступных публично, можно выделить задачу создания библиотеки компонентов пользовательского интерфейса для той или иной платформы, таких как React, Angular или Vue [11].

Само по себе создание подобной библиотеки компонентов пользовательского интерфейса позволяет решить задачу создания общего стиля группы приложений, в которых они используются, получить так называемый стайлгайд (style guide). Однако стоит всегда обращать внимание на существующие библиотеки, ведь для бизнеса может быть куда более практичной доработка существующего решения под себя, нежели написание своего решения с нуля, при котором придется столкнуться со всеми подводными камнями, которые уже во многом были кем-то преодолены ранее.

Также распространенной задачей может стать создание шаблонов приложений, которые позволяют осуществить быстрый старт нового проекта, что актуально как для фронтенд-, так и для бекенд-разработки. В данном случае может быть целесообразно поддерживать такие шаблоны в открытом доступе и актуализировать параллельно с текущей работой над проектами, которые были созданы с их помощью.

В бекенд-разработке актуально создание различных пакетов, скрывающих в себе, например, логику работы с JWT-аутентификацией [12] или контракт получения данных для страничного запроса данных с фильтрацией и сортировкой. Подобные пакеты зачастую нацелены не только на язык программирования, используемый конкретной командой, но и на платформу создания сервисов, как например Asp.NET Core, NodeJS, Flask и т. д.

В сфере работ по направлению девопс наиболее распространенной задачей, решаемой всеми компаниями в том или ином виде, является автоматизация процессов сборки и доставки решений на продуктивное окружение (production environment). Такие решения могут хорошо обобщаться и быть применимы и к другим проектам. Зачастую предпосылками для универсализации является использование командами разработки таких практик, как GitFlow [13], Conventional Commit [14], Semantic Versioning [15]. Решения, построенные и автоматизированные с учетом этих подходов,

хорошо обобщаются на другие проекты за счет того, что это уже стало корпоративным стандартом в отрасли разработки программного обеспечения.

### 3. Продвижение программного обеспечения с открытым исходным кодом

Несмотря на всю увлекательность процесса создания и публикации потенциально полезного для других программного кода, существует еще одна важная задача, идущая рука об руку с созданием библиотеки, а именно – продвижение. Важно не только написать полезный программный модуль, но и суметь рассказать о нем, чтобы те, кому он может пригодиться, смогли найти его на просторах Интернета, где скорее всего уже существуют подобные пакеты. Одним из самых важных атрибутов программного продукта с открытым исходным кодом является его имя. Выбору подходящего имени пакета стоит уделить особое внимание. Необходимо решить, будет ли оно содержать в себе имя компании или будет иметь имя, говорящее о функциональности, или наоборот – не иметь ничего общего с назначением.

Помимо имени пакета также особое внимание нужно уделить документации и времени, которые необходимо, чтобы начать работать с библиотекой. Чем проще процесс быстрого старта, тем больше шансов на то, что, попробовав библиотеку, пользователь продолжит с ней работать и изучать документацию для более сложных и реалистичных случаев использования. Чем больше времени нужно, чтобы начать работать с программным пакетом, и чем хуже составлена документация, тем меньше шансов, что пакетом будет пользоваться кто-то, кроме авторов.

Дополнительно к документации пакета полезным является написание статей, которые бы рассказывали о библиотеке, о том, какие задачи она решает, приводили бы примеры использования. При написании статей имеет смысл учитывать ту информацию, которую разработчики ищут в Интернете для решения схожих задач, анализируя поисковые запросы как при SEO-оптимизации содержимого сайтов. Используя данные о поисковых запросах, необходимо в том числе оптимизировать текст статей, чтобы они попадали в поисковую выдачу разработчиков.

Выступления на конференциях, где можно продемонстрировать разработанную библиотеку, также положительно влияют на продвижение разработанного программного обеспечения в обществе разработчиков.

### Заключение

Современный мир разработки программного обеспечения все сильнее ориентируется на модные тенденции. И одной из таких тенденций является разработка программного обеспечения с открытым исходным кодом. Компаниям, которые смогут органично вписаться в этот тренд, будет проще привлекать новых талантливых сотрудников. Ведь то, в каких публичных проектах участвует компания и насколько они полезны и известны, напрямую влияет на имидж компании на рынке труда.

Помимо репутационной составляющей не менее важным фактором, побуждающим участвовать в разработке программного обеспечения с открытым исходным кодом и публиковать уже существующие наработки, является решение задачи поддержки и развития проектов не только своими, зачастую ограниченными силами, но и привлекая разработчиков на просторах Интернета. Поразительно, насколько сильно на качество программного кода влияет осознание того факта, что любой сможет его увидеть и оценить. Эта открытость заставляет большинство участников подобных проектов внимательнее относиться к написанию программного кода, комментарию к нему, документированию функционала, тестированию и даже стилю написания текста коммитов (commits).

Когда компания подходит к этапу своего развития, на котором ей есть чем поделиться с обществом, встает выбор типа лицензии для программного обеспечения с открытым исходным кодом. В зависимости от нужд пакета и наличия или отсутствия в нем торговых марок подойдет одна из рассматриваемых в статье лицензий. Если планируется создание библиотеки общего назначения, то хорошо подойдет лицензия MIT. Если речь идет о выпуске на рынок продукта с открытым исходным кодом, то имеет смысл выбирать между рассматриваемыми Apache License 2.0 и Mozilla Public License 2.0. Безусловно, существует намного больше типов лицензий, но на начальных этапах может быть достаточно тех, что рассматриваются в статье. Также не стоит публиковать программный код без указания лицензии, так как это может привести к неожиданным

последствиям из-за нюансов в законодательстве, касающемся авторских и патентных прав в разных странах.

В рамках создания по-настоящему успешного программного обеспечения с открытым исходным кодом необходимо уделять достойное внимание продвижению создаваемого решения среди разработчиков. Зачастую можно наблюдать плачевную ситуацию, когда хорошо проработанный и потенциально полезный для многих пакет так и не находит свою аудиторию по той причине, что о нем практически невозможно узнать и очень сложно различить его достоинства по сравнению с уже существующими решениями в этой нише. Можно даже сформулировать задачу популяризации решения с тем же приоритетом, что имеет разработка самого программного обеспечения вместе с написанием исчерпывающей и хорошо структурированной документации, ведь это напрямую влияет в том числе на мотивацию осуществлять дальнейшую поддержку и развитие разработанного программного обеспечения.

Несмотря на все нюансы и неоднозначное первое впечатление, которое может возникнуть у бизнеса в ответ на идею выносить части программных продуктов в открытый доступ, разработка программного обеспечения с открытым исходным кодом становится все более популярной. Компании, которые смогут встроить участие в разработке такого программного обеспечения в свои бизнес-процессы, будут выделяться среди полностью закрытых конкурентов и смогут не выпасть из обоймы в будущем, когда ведение разработки программного обеспечения частично в открытом пространстве будет стандартной практикой в ИТ-индустрии.

### Литература

1. *The Free Software Community After 20 Years: With great but incomplete success, what now?* – <https://www.gnu.org/philosophy/use-free-software.en.html> (дата обращения: 01.04.2021).
2. *Site Reliability Engineering. Надежность и безотказность как в Google* / Б. Бейер, К. Джонс, Д. Петофф, Н. Мерфи. – СПб.: Питер, 2019. – 592 с.
3. Категория: Некоммерческие лицензии. – [http://licenseit.ru/wiki/index.php/Категория:Некоммерческие\\_лицензии](http://licenseit.ru/wiki/index.php/Категория:Некоммерческие_лицензии) (дата обращения: 01.04.2021).
4. Лицензия для вашего open-source проекта. – <https://habr.com/ru/post/243091/> (дата обращения: 01.04.2021).
5. Сравнение open-source лицензий. – <https://wiki.merionet.ru/servernye-resheniya/54/sravnienie-open-source-licenzij/> (дата обращения: 01.04.2021).
6. Сравнительный анализ основных лицензий open-source: GPL, LGPL, BSD, MIT, Mozilla public license, Apache software license. – <http://libertarium.ru/18586.html> (дата обращения: 01.04.2021).
7. В чем разница между популярными open-source лицензиями? Объясняет Github. – <https://tproger.ru/articles/whats-difference-between-licenses/> (дата обращения: 01.04.2021).
8. Licenses. – <https://choosealicense.com/licenses/> (дата обращения: 01.04.2021).
9. Открытый код и интеллектуальная собственность. – <https://habr.com/ru/company/mirantis/openstack/blog/272405/> (дата обращения: 01.04.2021).
10. List of software package management systems. – [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_software\\_package\\_management\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software_package_management_systems) (дата обращения: 01.04.2021).
11. Angular vs React vs Vue: Which Framework to Choose in 2021. – <https://www.codeinwp.com/blog/angular-vs-vue-vs-react/> (дата обращения: 01.04.2021).
12. Introduction to JSON Web Tokens. – <https://jwt.io/introduction> (дата обращения: 01.04.2021).
13. A successful Git branching model. – <https://nvie.com/posts/a-successful-git-branching-model/> (дата обращения: 01.04.2021).
14. Conventional Commits. – <https://www.conventionalcommits.org/en/v1.0.0/> (дата обращения: 01.04.2021).
15. Semantic Versioning. – <https://semver.org/> (дата обращения: 01.04.2021).

**Шинкарев Александр Андреевич**, канд. техн. наук, инженер-программист, ООО «Софт-маст-ИТ»; [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru).

Поступила в редакцию 13 апреля 2021 г.

## ROLE OF OPEN SOURCE SOFTWARE IN MODERN DEVELOPMENT OF ENTERPRISE INFORMATION SYSTEMS

A.A. Shinkarev, [sania.kill@mail.ru](mailto:sania.kill@mail.ru)

LLC "Softmast-IT", Chelyabinsk, Russian Federation

At the moment there are many open source software products and packages, and their number is increasing every day. So it can be concluded that publishing source code is becoming more and more popular in the world of software development. When publishing the source code of a software solution or software package for use in the developer community, special attention should be given to the license type – this affects which scenarios will be available for use of the published package or software solution. It is also necessary to draw up full and detailed documentation and decide on the ways to promote the published package among developers. **The purpose of the study** was to justify the feasibility and necessity of publishing software products, packages and libraries for their use by other developers to build their own systems and services. The author meant to describe the major open source licenses, identify their features and differences, and those situations for which this or that type of license is suitable, as well as to demonstrate the need of writing documentation and describe ways to promote and popularize published software products, packages, and libraries in the developer community. **Materials and methods.** The paper considers official license documents describing conditions of use, reproduction, and distribution. The author analyzes the main ways and means to promote open source software products. **Results.** The article substantiates the relevance of publishing and using the source code of a software product, package or library. The author describes the main provisions of the most common licenses and gives advice on choosing the type of license when publishing source code for free use. The necessity of writing documentation for the published software product is substantiated. The article also describes some of the ways to promote published packages, such as the choice of name, speaking at conferences, and publishing articles with case studies.

*Keywords:* enterprise information systems, open source software, MIT, Mozilla Public License 2.0, Apache License 2.0.

### References

1. *The Free Software Community After 20 Years: with Great but Incomplete Success, What Now?* Available at: <https://www.gnu.org/philosophy/use-free-software.en.html> (accessed 01.04.2021).
2. Bejer B., Dzhouns K., Petoff D., Merfi N. *Site Reliability Engineering. Nadezhnost' i bezotkaznost' kak v Google* [Site Reliability Engineering. Reliability and Reliability like in Google]. St. Petersburg, Piter Publ., 2019. 592 p.
3. *Kategoriya: Nekommercheskie licenzii* [Category: Uncommercial licenses]. Available at: [http://licenseit.ru/wiki/index.php/Категория:Некоммерческие\\_лицензии](http://licenseit.ru/wiki/index.php/Категория:Некоммерческие_лицензии) (accessed 01.04.2021).
4. *Licenziya dlya vashego open-source proekta* [License for You Open-source Project]. Available at: <https://habr.com/ru/post/243091/> (accessed 01.04.2021).
5. *Sravnienie open-source licenzij* [Comparison of Open-source Licenses]. Available at: <https://wiki.merionet.ru/servernye-resheniya/54/sravnienie-open-source-licenzij/> (accessed 01.04.2021).
6. *Sravnitel'nyj analiz osnovnyh licenzij open-source: GPL, LGPL, BSD, MIT, Mozilla public license, Apache software license* [Comparison Analysis of the Main Open-source Licenses: GPL, LGPL, BSD, MIT, Mozilla Public License, Apache Software License]. Available at: <http://libertarium.ru/18586.html> (accessed 01.04.2021).
7. *V chem raznica mezhdu populyarnymi open-source licenziyami? Ob"yasnyaet Github* [What is the Difference Between the Popular Open-source Licenses? Github Explains]. Available at: <https://tproger.ru/articles/whats-difference-between-licenses/> (accessed 01.04.2021).
8. *Licenses*. Available at: <https://choosealicense.com/licenses/> (accessed 01.04.2021).
9. *Otkrytyj kod i intellektual'naya sobstvennost'* [Open-source and Intellectual Property]. Available at: [https://habr.com/ru/company/mirantis/\\_openstack/blog/272405/](https://habr.com/ru/company/mirantis/_openstack/blog/272405/) (accessed 01.04.2021).

10. *List of Software Package Management System*. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_software\\_package\\_management\\_systems/](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_software_package_management_systems/) (accessed 01.04.2021).

11. *Angular vs React vs Vue: Which Framework to Choose in 2021*. Available at: <https://www.codeinwp.com/blog/angular-vs-vue-vs-react/> (accessed 01.04.2021).

12. *Introduction to JSON Web Tokens*. Available at: <https://jwt.io/introduction> (accessed 01.04.2021).

13. *A Successful Git Branching Model*. Available at: <https://nvie.com/posts/a-successful-git-branching-model/> (accessed 01.04.2021).

14. *Conventional Commits*. Available at: <https://www.conventionalcommits.org/en/v1.0.0/> (accessed 01.04.2021).

15. *Semantic Versioning*. Available at: <https://semver.org/> (accessed 01.04.2021).

*Received 13 April 2021*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шинкарев, А.А. Роль программного обеспечения с открытым исходным кодом в современной разработке корпоративных информационных систем / А.А. Шинкарев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 16–22. DOI: 10.14529/ctcr210202

### FOR CITATION

Shinkarev A.A. Role of Open Source Software in Modern Development of Enterprise Information Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 16–22. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210202

# Инфокоммуникационные технологии и системы

УДК 004.94, 004.85, 630:551.5, 528.88

DOI: 10.14529/ctcr210203

## РЕГРЕССИОННЫЕ ПРОГНОЗЫ УРОЖАЙНОСТИ ОРОШАЕМЫХ ОЗИМЫХ КУЛЬТУР С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ: МОДЕЛИ, ПРЕДИКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ

**З.Х. Халил, С.М. Абдуллаев**

*Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия*

Технологии агрометеорологических прогнозов урожайности (АПУ) зерновых культур, включая регрессионные АПУ, основанные на данных о нормализованном вегетационном индексе (NDVI), являются важным элементом современной аграрной индустрии. **Цель исследования:** обосновать эвристическую модель урожайности и подходы к разработке моделей регрессионных методов АПУ, включая процедуру выбора предикторов АПУ по данным NDVI спутниковой системы наблюдений Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) и провести экспериментальное прогнозирование. **Материалы и методы.** Используются данные официальной статистики урожайности орошаемых озимых пшеницы и ячменя иракской провинции Дивания и наблюдения NDVI MODIS за 2001–2019 годы. За основу принята двухкомпонентная эвристическая модель урожайности, содержащая тренд урожайности, обусловленный сравнительно медленным изменением технологии возделывания культур, и климатическую компоненту, связанную с колебаниями биологической продуктивности из-за погодных условий вегетации. **Результаты.** С помощью эвристической модели развит объектно-ориентированный подход к выбору предикторов регрессионной модели АПУ. Используя зависимость NDVI от проективного покрытия и листового индекса посевов, качественно и количественно определили эволюцию NDVI в отдельных стадиях развития пшеницы и ячменя. Показано, что в АПУ на уровне провинции в качестве исходных предикторов следует выбрать временные ряды NDVI-MODIS за первую и вторую половину февраля в трех зерносеющих районах провинции. Эксперименты показали, что удовлетворительное качество регрессионных АПУ ячменя и пшеницы достигается при различных наборах 2–3 исходных неколлинеарных предикторов и их комбинацией с величиной урожайности прошлого года либо включением линейных или квадратичных зависимостей. **Выводы.** АПУ пшеницы с относительной ошибкой около 10 % получаются только при подборе интервала обучения моделей и контроле параметров авторегрессионного предиктора. Высокое качество прогнозов регрессионных моделей АПУ ячменя обусловлено тем, что в изменчивости его урожайности преобладает климатическая компонента. Разработанный объектно-ориентированный подход может быть адаптирован к условиям богарного земледелия и прогнозу урожайности других культур.

*Ключевые слова:* прогнозы урожайности озимых пшеницы и ячменя, поливное земледелие в Ираке, NDVI MODIS, климатические аномалии урожайности, регрессионные модели.

### Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса широко применяются во всех сферах современного сельского хозяйства [1], включая агрометеорологические прогнозы урожайности (АПУ) озимых и яровых культур с заблаговременностью от 1 до 3 месяцев. Помимо разработки АПУ орошаемых озимых зерновых культур [2] в этой работе кратко рассмотрены методы прогноза урожайности на основе спутниковых индексов вегетации (раздел 1) и предложена двухкомпонентная эвристическая модель урожайности (раздел 2); на её основе в разделе 3.1 обоснован объектно-ориентированный подход к разработке регрессионных моделей и в разделе 3.2 обсуждаются результаты прогнозирования урожайности озимых пшеницы (*Triticum aestivum* L.)

и ячменя (*Hordéum vulgáre*) в иракской провинции Дивания. Делается вывод о возможной адаптации разработанного метода к прогнозу урожайности зерновых в других регионах.

## 1. Методы прогнозирования урожайности по данным ДЗЗ

В зависимости от используемой эвристической и математической модели [3–5], выделяются статистические, динамико-статистические и синоптико-статистические АПУ. При использовании спутниковых ДЗЗ среднего разрешения [6] эта общая классификация подходов к АПУ сужается:

1) до методов года-аналога, основанных на предположении, что если по данным ДЗЗ посевы текущего сезона развивались подобно одному из прошлых сезонов, то и урожайность будет близка к этому году-аналогу;

2) методов построения различных типов регрессий с использованием метеоданных и мультиспектральных спутниковых индексов вегетации, качественно отражающих биологическую продуктивность аграрных ландшафтов;

3) методов имитационного моделирования, где рассчитывается реакция продуктивности ландшафта на изменение световых и гидротермических условий вегетации, включая физико-химическое состояние почв, распространение болезней и вредителей растений и многие другие факторы.

Табл. 1 обобщает опыт [3, 6, 7] применения методов АПУ с использованием пространственно-временных распределений индекса вегетации Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) и других продуктов генерируемых ДДЗ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).

Преимущество метода аналогов – простота алгоритмов классификации, оценивающих степень близости конкретного распределения NDVI к средним распределениям NDVI урожайных и неурожайных лет. Не соглашаясь с [6], мы относим метод аналогов к количественным методам, поскольку вместо бинарной классификации можно использовать несколько градаций урожайности.

Преимущества и недостатки АПУ по спутниковым данным MODIS  
(по [6] с дополнениями)

Таблица 1

The advantages/disadvantages of forecast types using MODIS satellite data  
(according to [6] with additions)

Table 1

Подходы	Преимущества	Недостатки
Методы прогноза по году-аналогу (статистические методы)	Простота использования в автоматическом режиме, без предварительной калибровки	Отсутствие больших выборок для классификации; необходимость учета изменений площадей сева и зависимость от специфики конкретного региона
Регрессионные методы (статистические методы)	Количественный прогноз; нет необходимости в полевых данных	Отсутствие больших выборок для построения регрессии; неизвестное качество официальной статистики (ОС) и позднее появление ОС за прошлый сезон
Продукционное моделирование (динамико-статистические методы)	Независимость от ОС; возможность учета вида и сорта растительной культуры	Сложность алгоритма усвоения данных и необходимость калибровки по полевым данным и маскам полей с конкретной культурой

Регрессионные методы АПУ дают количественные оценки урожайности. Согласно [3] ошибка прогноза урожайности озимых крупных сельскохозяйственных регионов России регрессионными методами не превышает 15 %. В то же время результаты [7] говорят о значительном отличии качества прогнозирования урожайности овощей, зерновых и картофеля, в том числе сложности настройки локальных моделей регрессии из-за недостаточной информации о статистике урожайности на уровне административных районов.

Динамические модели продуктивности сельскохозяйственных культур, опирающиеся на ежелекадную агрометеорологическую информацию, внедрены в отечественную оперативную практику в 80-х годах [8]. В эти модели входят параметры, характеризующие интенсивность процессов фотосинтеза и дыхания, распределения продуктов ассимиляции и параметры, описываю-

щие изменения требований сельскохозяйственных культур к теплу и влаге в различных фазах вегетации. Еженедельные данные MODIS могут значительно улучшить пространственное разрешение наблюдений, например, усвоенной фракции фотосинтетически активной радиации (ФАР), зависящей в свою очередь от индекса листового покрытия в различные фазы жизненного цикла растений [9, 10]. Так, в [6], интегрируя фракцию ФАР в продукционную модель урожайности риса, к моменту максимума NDVI получили величину биомассы, близкую к измеренной урожайности. В настоящее время оперативные продукционные модели прогнозируют урожайность кукурузы и яровых пшеницы и ячменя с ошибкой 10–12 % [3].

Заметим, что в условиях Украины [11] регрессионные и динамические АПУ озимой пшеницы с использованием данных NDVI показали схожие результаты прогноза. Обнадеживающие предпосылки [3, 6, 11], как и отсутствие данных для динамических прогнозов (ежедекадная метеорологическая информация, полевые наблюдения развития растений и др. данные), определили, что в следующих разделах мы исследовали регрессионные АПУ.

## 2. Эвристическая модель урожайности

Временные ряды урожайности пшеницы и ячменя в провинции Дивания были получены по данным официальной статистики путем деления валового сбора зерна на площадь посевов. Поскольку пространственно-временные серии вегетационных индексов MODIS доступны с конца 2000 года [12], то для построения регрессий мы используем ряды урожайности с 2001 по 2019 год (рис. 1).

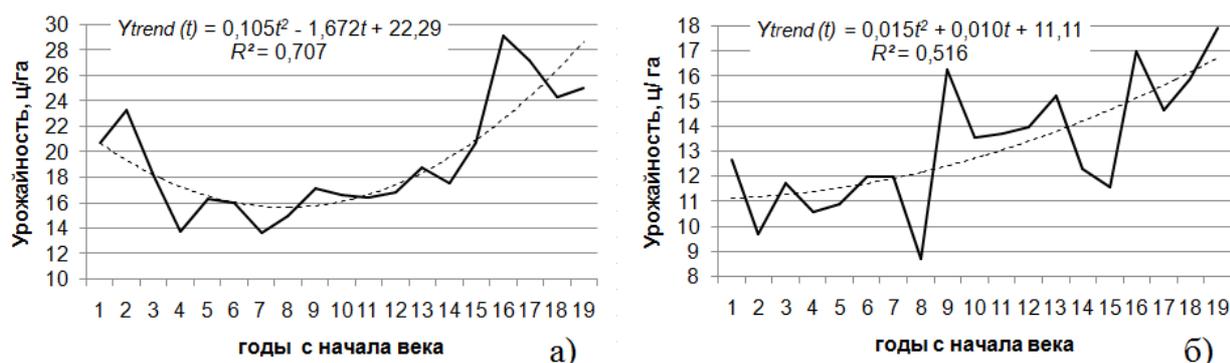


Рис. 1. Динамика урожайности пшеницы (а) и ячменя (б) в провинции Дивания. Пунктир – тренды 2-го порядка  $Y_{trend}(t)$  – аппроксимирующие ряды урожайности. Приведены формулы и коэффициент детерминации  $R^2$

Fig. 1. Dynamics of wheat (a) and barley (b) yields in Diwaniya province. Dotted lines represent second order approximations of yield series  $Y_{trend}(t)$ . The formulas of  $Y_{trend}(t)$  and determination coefficients  $R^2$  are also presented

В качестве основы для разработки эвристической модели АПУ мы использовали идеализированную [4] двухкомпонентную модель измеренной урожайности данного года  $Y(t)$ :

$$Y(t) = Y_{trend}(t) + Y_{weather}(t). \quad (1)$$

В формуле (1) первая компонента  $Y_{trend}(t)$  – это линейный или параболический тренд, обусловленный многолетними изменениями технологии выращивания культур. Как видим из рис. 1, полиномиальный тренд второго порядка по времени объясняет более 50 (70) % вариации рядов урожайности ячменя (пшеницы).

Вторая компонента формулы  $Y_{weather}(t)$  – это так называемая климатически обусловленная аномалия урожайности [4]. Это понятие обусловлено тем, что в идеальном случае отклонение урожайности от урожайности на тренде обусловлено погодными условиями сева, вегетации и уборки культуры. Гидротермический и световой режим, растительные ландшафты в зонах зимних поливных пшеницы и ячменя существенно отличаются от условий средних широт, для которых формула 1 применялась. В том числе не очевидно, что отклонения от трендов урожайности на рис. 1 вызваны межгодовой изменчивостью регионального климата. Поэтому, используя ранговые корреляции Спирмена, мы доказали чувствительность  $Y_{weather}(t)$  орошаемых пшеницы и ячменя к изменчивости метеорологических характеристик в течение периода вегетации [13]. В том числе по данным за 30-летний период построена регрессионная модель урожайности. Позже

нами показано, что в любой месяц вегетации с ноября по март можно найти пару предикторов, совместно описывающих от 25 до 50 % вариаций рядов урожайности.

Отметим, что прогнозирование положительных и отрицательных климатических аномалий на уровне провинций экономически обосновано. Например, средняя за пять малоурожайных лет потеря урожайности пшеницы и ячменя относительно тренда составляет 2,5 и 2,2 центнера с гектара; средняя прибавка за пять самых урожайных лет составляет 3,1 (2,0) ц/га. Такие колебания урожайности на площадях посевов около 150 тысяч гектар при ценах на зерно порядка 200 долларов за тонну эквивалентны колебаниям доходов от 4 до 6 млн долларов.

### 3. Региональный прогноз урожайности

В метеорологических прогнозах обычно используется один из двух подходов к выбору предикторов [14]: 1) использовать весь возможный набор предикторов, постепенно исключать менее значимые предикторы; 2) начиная со значимых признаков постепенно добавлять новые предикторы. Очевидно, что исследования компонент эвристическая модель урожайности и эмпирические связи между вегетационным индексом NDVI и биологической продуктивностью посевов позволяют обосновать широкую гамму АПУ отличающихся набором предикторов. Ниже после обзора результатов первого подхода выбора предикторов мы обоснуем объектно-ориентированный АПУ (раздел 3.1) и обсудим результаты регрессионных моделей.

#### 3.1. Предпосылки объектно-ориентированного прогноза

В работе [2] реализован первый подход к АПУ, где кроме агрегированных характеристик NDVI в начальный набор предикторов были включены линейные и квадратичные зависимости, необходимые для конструкции трендов урожайности, и значения урожайности за прошлый год. Процесс исключения предикторов осложнялся тем, что при размере обучающей выборки в 14 лет для предотвращения переобучения регрессии число одновременно оцениваемых предикторов ограничивалось 5–7. В результате тестирования на выборке из 5 лет мы получили квазилинейные (линейные) регрессионные модели урожайности пшеницы (ячменя) с 3–4 предикторами.

Поскольку при подгонке моделей [2] использовался численный и визуальный контроль итераций, осталось сомнение, что эти модели, выбранные без прямого учета эволюции объекта, смогут в дальнейшем поддерживать достигнутое качество прогноза.

Поэтому ниже, основываясь на эвристической модели урожайности, мы будем последовательно осуществлять поиск предикторов эволюции региональных ландшафтов, сопоставляя фазы развития зерновых культур с динамикой NDVI. В этом объектно-ориентированном поиске предикторов мы также будем опираться на одно из положений концепции жизненного цикла [15], что на стадии максимума интенсивности природно-антропогенной системы можно определить основные свойства её доминирующих элементов (пространственно-временных компонент). Так, используя снимки Landsat-8, в [16] показано, что в феврале – марте трех различных по урожайности лет (2014, 2015 и 2016) отражательные свойства орошаемых посевов значительно отличались от окружающих природных ландшафтов провинции. При этом порог NDVI, отделяющий площади здоровых развитых зерновых, составлял всего 0,3. Согласно исследованию [17], вплоть до порога насыщения  $\approx 0,7 \dots 0,8$  значение вегетационного индекса NDVI пропорционально проективному покрытию зеленой фитомассой. Поэтому критическое значение индекса, равное 0,3 на фазе максимального развития посевов, предполагает, что проективное покрытие в среднем составляет менее 20 % (табл. 2). Поскольку в высокоурожайном 2016 году с положительной климатической аномалией урожайности ячменя и пшеницы (рис. 1а) большинство площадей посевов имело NDVI в диапазоне 0,35–0,5 [16], то это означает, что современное проективное покрытие площадей посевов не превышает 50 % (см. табл. 2).

Таблица 2

Соответствие NDVI классам проективного покрытия [17]

Table 2

Matching NDVI and crop coverage classes [17]

Проективное покрытие, %	0–20	20–40	40–60	60–80	80–100
Среднее	0,387	0,512	0,578	0,660	0,768
Стандартное отклонение	0,069	0,054	0,041	0,048	0,045
Вариация, %	17,8	10,5	7,1	7,3	5,9

Описанные выше свойства объекта можно использовать для установления годового хода NDVI и его ориентировочного соответствия фазам развития растений. Момент наступления максимума NDVI по данным MODIS определяется с точностью в 8–16 дней и для разреженных посевов приблизительно совпадает с моментом максимума листового индекса. В свою очередь, изменения листового индекса соответствует определенным стадиям и фазам развития культур [8, 9], обычно выражаемых в десятичной шкале Задокса [18, 19]. Поздние стадии развития культур (колошение, цветение, молочной и восковой спелости) обычно длятся 10–15 дней, поэтому, сопоставляя типичный ход листового индекса по данным полевых измерений и ход NDVI вблизи их максимума, можно ориентировочно определить стадии развития злаков. Например, в жизненном цикле пшеницы [9] максимальный листовый индекс (а значит, и NDVI!) наблюдается в стадии выхода в трубку, примерно на фазах 45–49 развития по шкале Задокса. Затем в стадию колошения в течение фаз 50–59 листовый индекс начинает медленно снижаться. Стадия цветения пшеницы с фазами 60–69 короткая и длится в масштабах одного крупного поля всего одну неделю [20], в эту стадию листовый индекс быстро падает из-за гибели не опыленных побегов [9]. Напротив, в жизненном цикле ячменя согласно [10] максимум листового индекса достигается в конце стадии цветения на фазе 69 и заметно начинает снижаться на стадии молочной спелости, начиная с фазы 71.

Очевидно, что урожайность и проективное покрытие посевов определяется численностью продуктивных побегов на единицу площади. Очевидно также, что увеличение численности побегов разреженных посевов сопровождается увеличением максимального проективного покрытия, листового индекса и ростом NDVI. Это означает, что тенденции урожайности и её аномалии (см. рис. 1) должны отражаться в значении годового максимума NDVI и его межгодовых вариациях.

В свою очередь, опираясь на концепцию жизненного цикла [15], мы использовали ход NDVI (рис. 2) для выделения в провинции юго-западной R1, северной R2 и восточной R3 территориальных подсистем природопользования. Опуская экономико-географические аргументы в пользу этой классификации, отметим, что существенное превышение максимумов NDVI региона R1 в сравнении с R2 и R3 (рис. 2а) свидетельствуют о значительной густоте посевов в этом регионе с проективным покрытием до 40 % (см. табл. 2) и многолетнем доминировании этого региона в производстве зерна.

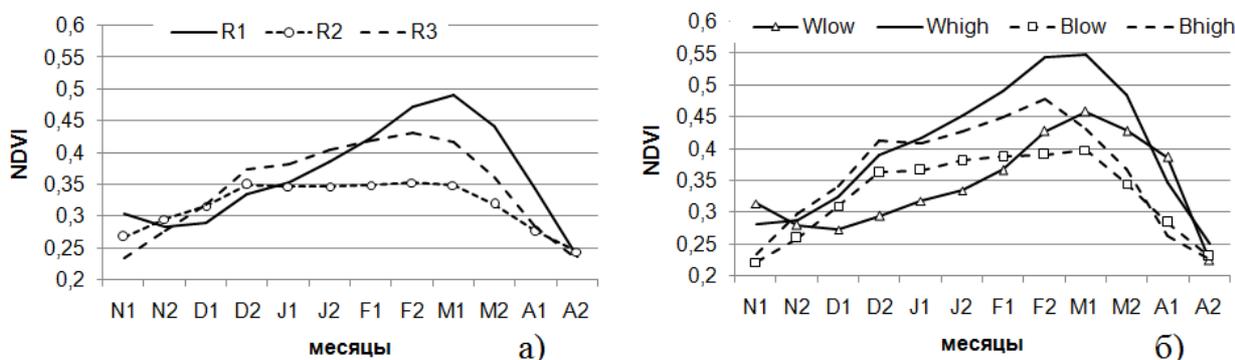


Рис. 2. Динамика NDVI трех зерносеющих регионов R1, R2 и R3: а – осредненный ход NDVI с первой половины ноября (N1) по вторую половину апреля (A2); б – ход NDVI в регионе R1 (R3) в малоурожайное и высокоурожайное пятилетие пшеницы (ячменя)

Fig. 2. Dynamics of NDVI in cropping regions R1, R2 and R3: а – multi-year bi-weekly mean NDVI, First and second half of November...April months are indicated by N1 and A2; б – bi-weekly NDVI in region R1 (R3) averaging for five low and high yields of wheat (barley)

Добавим еще один аргумент в пользу высказанных рассуждений. Поскольку скачкообразный рост листового индекса при переходе от стадии кущения посевов в стадию удлинения стебля [9, 10] должен сопровождаться «скачком NDVI», то, определяя по рис. 2а скачок NDVI, можно видеть, что переход между этими ранними стадиями развития во всех регионах происходит одновременно в конце декабря (D2) или начале января (J1). Учитывая, что стадия максимума NDVI в регионе R1 наступает в марте (M1), т. е. в среднем позже, чем в других регионах (F1, F2), то в регионе R1 скорее всего возделываются поздние сорта пшеницы, более продуктивные, чем раннеспелые сорта.

## Инфокоммуникационные технологии и системы

Различия трех зерносеющих регионов провинции особенно заметны при сравнении годовой динамики вегетационного индекса в малоурожайные и высокоурожайные годы (рис. 2б). При этом кривые индекса NDVI, характерные для пятилетий различной урожайности, демонстрируют, что наибольшая разность индекса достигается в феврале, т. е. за 1–2 месяца до уборки урожая. При прочих равных условиях разность хода индекса в малоурожайные Wlow и высокоурожайные Whigh для пшеницы наиболее заметна для первого региона, где значительные отклонения в 0,1, наблюдаются уже в январе (J1, J2).

Проведенное выше сопоставление динамики NDVI и фаз развития растений показывает перспективность региональных прогнозов урожайности по данным вегетационного индекса с заблаговременностью 1 месяц и более.

### 3.2. Экспериментальные прогнозы

Количественные оценки качества обучения и прогноза регрессионных моделей урожайности пшеницы и ячменя, отличающихся набором предикторов (способом обучения), приведены в табл. 3, 4. Табл. 3 и 4 дополняют рис. 3 и 4, иллюстрирующие качество прогноза тенденций и климатических аномалий урожайности.

В табл. 3 приведены уравнения регрессии урожайности пшеницы (1w, 2w) и ячменя (1b, 2b), рассчитанные по рядам средних значений NDVI за первую и вторую половину февраля в первом (1F1 и 1F2) и третьем регионе (3F1 и 3F2). Данный начальный набор предикторов обоснован исключением из набора коллинеарных рядов. Как показывает наш опыт [2] и опыт других исследований [21], для устранения эффектов мультиколлинеарности достаточно удаления рядов данных с коэффициентами корреляции  $r > 0,5$ . В нашем случае между рядами средних NDVI второго региона (2F1 и 1F2) и двух других регионов наблюдались  $r = 0,73...0,78$ , а ряды NDVI первого и третьего региона имели слабую корреляцию между собой с  $r = 0,43...0,54$ . Длина тестируемой выборки с 2011 по 2019 год выбрана примерно равной длине обучающей за период с 2001 по 2010 год с целью сравнимости результатов качества прогноза и обучения. Качество прогноза оценивалось по значениям: коэффициента корреляции между фактической и прогнозируемой урожайностью  $r$ ; средней абсолютной ошибки AE и относительной ошибки RE.

Прогноз урожайности пшеницы и ячменя по NDVI регионов

Таблица 3

Table 3

Wheat and barley yield forecast by the regional NDVI index

Уравнение регрессии	Качество обучения		Качество прогноза		
	R <sup>2</sup>	SD, ц/га	r	AE, ц/га	RE, %
Урожайность пшеницы, YW					
1w = 47,53 × 1F1 – 6,13 × 3F1	0,85	2,82	0,60	4,05	17,7
2w = 46,84 × 1F2 – 10,62 × 3F2	0,85	2,80	0,68	3,88	16,5
3w = 29,79 × 1F1 – 10,20 × 3F1 + 0,51 × YW(t – 1)	0,83	2,70	0,83	2,80	12,3
4w = 30,24 × 1F2 – 14,98 × 3F2 + 0,54 × YW(t – 1)	0,84	2,49	0,83	2,86	12,4
5w = 20,10 × 1F2 + 0,46 × YW(t – 1)	0,85	2,65	0,87	2,43	10,0
6w = 18,13 × 1J1 + 0,62 × YW(t – 1)	0,85	2,75	0,82	2,21	9,3
7w = 8,76 × 2F1 + 0,815 × YW(t – 1)	0,85	2,96	0,77	2,05	8,6
8w = 14,78 × 2F2 + 0,70 × YW(t – 1)	0,85	2,88	0,79	2,13	8,9
Урожайность ячменя, YB					
1b = 4,81 × 1F1 + 24,80 × 3F1	0,84	2,27	0,35	2,33	15,9
2b = 11,91 × 1F2 + 15,85 × 3F2	0,84	2,40	0,76	1,80	12,1
3b = 5,22 × 1F1 + 25,13 × 3F1 – 0,03 × YB(t – 1)	0,82	2,42	0,35	2,36	16,2
4b = 19,99 × 1F2 + 16,20 × 3F2 – 0,34 × YB(t – 1)	0,82	2,46	0,72	2,28	15,5
5b = 27,17 × 3F2 + 0,07 × YB(t – 1)	0,83	2,59	0,58	1,90	13,2
6b = 33,64 × 1F2 – 0,32 × YB(t – 1)	0,83	2,59	0,73	2,59	17,7
7b = 37,91 × 2F1 – 0,03 × YB(t – 1)	0,84	2,23	0,82	3,62	25,1
8b = 44,72 × 2F2 – 0,24 × YB(t – 1)	0,84	2,37	0,69	1,80	12,4
9b = 23,45 × 1J1 + 0,31 × YB(t – 1)	0,81	3,30	0,70	1,79	11,8
10b = 9,34 × 1F1 + 14,92 × 3F1 + 0,385 × t	0,83	2,05	0,58	2,06	15,1
11b = 10,50 × 1F2 + 13,31 × 3F2 + 0,30 × t	0,82	2,34	0,75	1,49	10,9

Как видим, регрессии пшеницы 1w, 2w и ячменя 1b, 2b получены с нормированным коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,84...0,85$  и примерно равными стандартными отклонениями  $STD = 2...3$  ц/га, однако качество прогнозов урожайности значительно отличается. Как видим из табл. 3, при использовании только характеристик NDVI качество прогнозов в целом слабее результатов прогнозов [3, 6, 21], где характерная средняя  $RE \approx 10\%$ . Лишь прогноз урожайности ячменя по регрессии 2b с коэффициентом корреляции  $r = 0,76$  и относительной оценкой  $RE = 12\%$  в какой-то мере можно считать удовлетворительным.

Визуальное сопоставление фактической YW и YB и прогнозной урожайности (см. рис. 3) показывает, что регрессии 1w, 2w и 1b, 2b реагируют на «климатические колебания урожайности» пшеницы и ячменя, но явно занижают значения YW и YB. С позиции эвристической модели (раздел 2) это интерпретируется тем, что в десятилетие обучающей выборки наблюдались нисходящие тенденции урожайности (см. рис. 1), а в период тестовой выборки фиксировался рост урожайности. Для компенсации этих эффектов в набор предикторов остальных регрессий мы вводили либо значения урожайности прошлого года  $YW(t-1)$  и  $YB(t-1)$ , либо линейный ряд времени (регрессии 10b и 11b для ячменя).

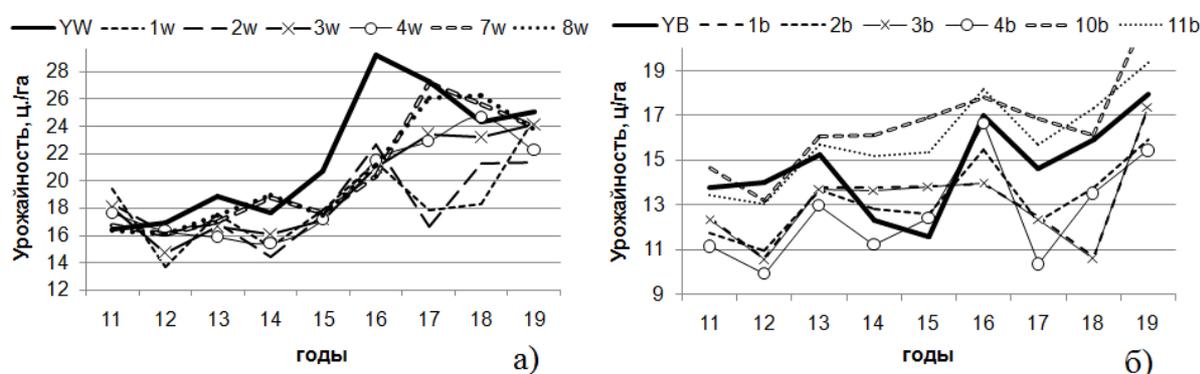


Рис. 3. Примеры регрессионных прогнозов урожайности пшеницы (а) и ячменя (б) на 2011–2019 гг. Регрессии построены по данным NDVI регионов R1 и R3 за 2001–2010 гг.

Fig. 3. Examples of regression forecasts of wheat (a) and barley (b) yields for 2011–2019. The regressions are based on the NDVI data of the regions R1 and R3 for 2001–2010

Рассмотрим модели 3w, 4w...8w урожайности пшеницы. Как указано в табл. 3 (рис. 3а), все количественные (качественные) показатели прогноза новых моделей урожайности пшеницы улучшились. При этом относительная и абсолютная ошибки регрессий с двумя предикторами 5w, 6w, 7w и 8w не превышают 10% и 2,4 ц/га, т. е. достигли уровня оперативных прогнозов [3]. Отметим две основные особенности прогнозов урожайности пшеницы. Во-первых, в регрессии 6w было использовано значение NDVI за январь первого региона 1J1, т. е. заблаговременность прогноза может быть увеличена до 2 месяцев. Во-вторых, в «успешных» регрессиях 7w, 8w, использующих значения NDVI второго региона 2F1 и 2F2, вклад прошлогодней урожайности составил 70–80%, т. е. мы де-факто пришли к моделям, близким к авторегрессии. Поведение этих моделей, отображенное на рис. 3а, явно отличается от предыдущих регрессий 5w и 6w, где сравнительно низкий вклад прошлогодней урожайности – 60% и ниже – позволяет удерживать высокие коэффициенты корреляции с фактическими климатическими колебаниями урожайности. Согласованность моделей 5w и 6w с эвристической моделью урожайности позволяет считать эти регрессии оптимальными для АПУ пшеницы.

Модели АПУ ячменя 3b, 4b...11b демонстрируют зависимость качества прогноза от типа прогнозируемой культуры и выбора предикторов. Так, в отличие от АПУ пшеницы введение авторегрессионной компоненты  $YB(t-1)$  не улучшило показатели прогноза ячменя в сравнении с регрессией 2b. Лишь в регрессии 9b с предикторами, подобными модели 6w, повышенная заблаговременность прогноза сочетается с небольшой средней абсолютной и относительной ошибкой. Замена авторегрессионного предиктора  $YB(t-1)$ , текущим временем в регрессии 11b позволила достичь относительной ошибки в 11%, подтверждая пользу развиваемого нами объектно-ориентированного прогноза. При этом, как видим из рис. 3б, графики регрессий 10b и 11b находятся выше графика фактической урожайности, что позволяет рассматривать эти модели как верхнюю оценку урожайности совместно с нижней оценкой по моделям 1b и 2b.

Зависимость качества АПУ от интервала обучения

Table 4

The dependence of yield forecasts quality on the training interval

Уравнение регрессии	Обучение			Прогноз			
	Годы	R <sup>2</sup>	SD	Годы	r	AE	RE
$X1 = (1F1 + 2F1 + 3F1)/3, X2 = YW(t - 1)$							
$9w = 1,20X2t - 14,92X1$	01; 10	0,85	3,10	11; 19	0,74	3,13	13,3
$10w = 14,59X1 + 0,71X2$	01; 16	0,90	3,20	17; 19	0,99	0,50	2,0
$11w = 1,45X2t - 114,97X1$	10; 16	0,77	3,88	17; 19	0,51	6,88	26,9
$12w = 18,23X1 + 0,62X2$	09; 15	0,79	1,66	17; 19	0,88	0,71	2,7
$X1 = (2F1 + 2F2)/2, X2 = YB(t - 1)$							
$12b = 41,95X1t - 10,15X2$	01; 10	0,84	2,20	11; 19	0,67	1,55	11,0
$13b = 38,87X1t - 10,05X2$	01; 16	0,90	2,10	17; 19	0,95	0,61	3,8
$14b = 33,96X1 + 0,11X2$	10; 16	0,99	3,88	17; 19	0,97	0,31	1,8
$15b = 32,95X1 + 0,14X2$	11; 18	0,78	1,93	19		0,70	3,9

Проведенный анализ зависимости результатов моделирования от набора предикторов (см. табл. 3 и рис. 3) был бы неполным без обсуждения того, что параметры и качество регрессионных моделей АПУ при одних и тех же предикторах сильно зависят от интервала обучения. Так, в табл. 4 приведены формулы регрессий, построенных с использованием авторегрессионных компонент X2 и достаточно консервативных предикторов X1 с осреднением значений NDVI по пространству для пшеницы (9w...12w) и по времени для ячменя (12b...15b). Регрессии 9w и 10b обучались на интервале с 2001 по 2010 год (как и регрессии в табл. 3) и имели сравнительно хорошие показатели прогноза. Когда интервал обучения был увеличен до 2016 года, качество прогноза 10w (13b) существенно улучшилось, достигнув  $r = 0,99$  (0,95) и  $RE = 2(4) \%$  на трехлетней тестовой выборке. Однако при сокращенном интервале обучения с 2010 по 2016 год показатели АПУ пшеницы регрессией 11w резко упали, тогда как показатели модели 14b для ячменя приблизились к «идеальным».

Очевидно, что модель 11w в сравнении с моделью 10w имеет в два раза больший коэффициент авторегрессионного предиктора X2, что как и в регрессии 9w приводит к большим ошибкам вслед за сильной аномалией урожайности 2016 года (рис. 4а). Изменив интервалы обучения сдвигом всего на год, можно улучшить показатели АПУ пшеницы (регрессия 12w). Поскольку изменения интервала обучения путем добавления новых временных данных и исключения предыдущих является популярной процедурой в прогнозах урожайности [22], очевидно следует с предельной осторожностью относиться к подобным процедурам. Аналогично следует отказаться от популярной в машинном обучении рандомизации обучающей и тестируемой выборки урожайности, используемой например в [23].

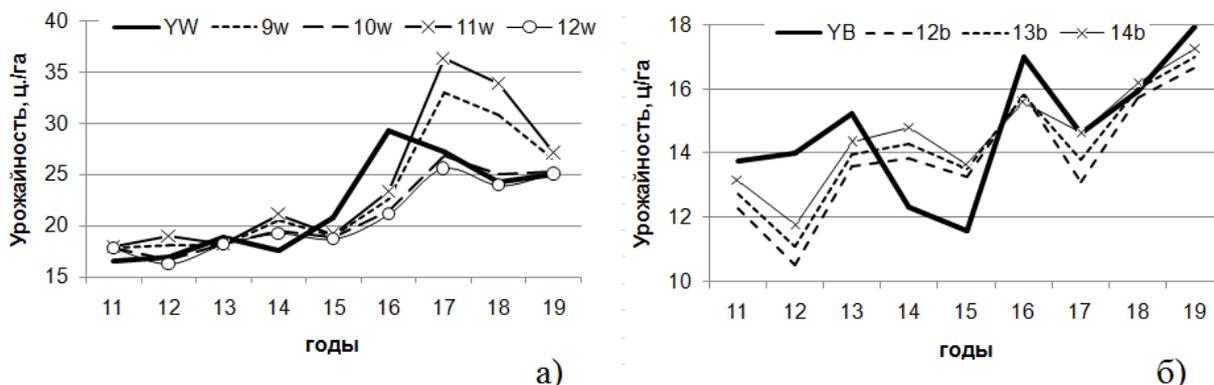


Рис. 4. Регрессионные прогнозы урожайности пшеницы (а) и ячменя (б) с различными периодами обучения и прогноза. Предикторы для прогнозов были одни и те же

Fig. 4. Regression forecasts of wheat (a) and barley (b) yields with different training and forecast periods. Same predictors were used for the predictions

В то же время из рис. 4б мы видим, что графики модели регрессий ячменя с изменением интервала обучения постепенно приближаются к фактической урожайности, но в целом ведут себя подобно модели 12b, для которой весь этот период лет был периодом прогнозирования! Замечая, что вклад авторегрессионного предиктора X2 урожайности ячменя сравнительно мал (см. табл. 4), это означает, что межгодовые изменения урожайности ячменя главным образом определяются климатическими аномалиями, индикатором которых являются NDVI.

Следует сказать, что обсуждаемые нами особенности регрессионных прогнозов пшеницы и ячменя с отдельными нюансами проявились и в других экспериментах, проведенных с различными наборами предикторов и интервалами обучения. Таким образом, поведение урожайности двух близких родов злаковых культур, выращиваемых в сходных условиях может существенно отличаться. Поэтому не удивительно столь большое количество и география работ по разработке статистических методов прогнозов, применения различных алгоритмов машинного обучения, использование новых вегетационных индексов [24].

### Выводы

Основные задачи проведенного выше исследования – это разработка модели и алгоритмов агрометеорологических прогнозов урожайности (АПУ) орошаемых пшеницы и ячменя в климатических условиях, характерных для субтропиков южного и центрального Ирака. Нами показано, что в условиях недостаточного информационного обеспечения для продукционных моделей необходимо развивать регрессионные АПУ, используя в качестве предиктора индексы вегетации NDVI системы спутниковых наблюдений MODIS. Для усвоения этих данных и создания математической модели прогноза нами предложено использовать двухкомпонентную эвристическую модель урожайности, предполагающую, что текущая урожайность содержит многолетний технологический тренд урожайности и межгодовые климатически обусловленные аномалии урожайности. Продуктивность этого подхода уже была формально доказана в [2], когда эта модель использовалась для определения набора предикторов регрессионных моделей. В этой работе, используя концепцию жизненного цикла и реально наблюдаемые фазы развития растений, мы показали перспективы объектно-ориентированного подхода к разработке математической модели АПУ и её предикторов. В том числе обосновано, что в условиях разреженных посевов максимум NDVI, наблюдаемый в феврале–марте, далек от насыщения и может использоваться как гроху биологической продуктивности на стадии цветения растений. В свою очередь изучение хода NDVI за вегетационный период с ноября по апрель позволяет выделить отдельные территориальные подсистемы и увеличить разнообразие предикторов прогноза, в том числе решить проблему выбора предикторов для отдельных культур. Экспериментальные прогнозы показали, что в качестве неколлинеарных предикторов, отражающих климатические аномалии урожайности, можно выбрать средние NDVI за февраль или январь отдельных регионов либо произвести их пространственное или временное осреднение NDVI. Оценка качества прогнозов показала необходимость учета в АПУ тренда урожайности пшеницы и в меньшей степени тренда урожайности ячменя. В качестве предиктора отражающей тренд урожайности введена урожайность прошлого года, что привело к смешанной модели прогноза, содержащей сильную (слабую) авторегрессионную компоненту для АПУ пшеницы (ячменя). Эта компонента может быть заменена на линейный или квадратичный тренд времени. Исследование зависимости качества прогнозов от выбранного интервала обучения показало, что урожайность ячменя хорошо прогнозируется из-за явной связи между межгодовыми колебаниями максимума NDVI и климатическими аномалиями его урожайности. Прогнозы урожайности пшеницы также отражают климатические аномалии, но изменчивость тренда урожайности обуславливает сильную зависимость качества прогноза от выбранного интервала обучения регрессии и требует контроля коэффициентов регрессии.

В целом достигнутое нами качество прогнозов урожаев орошаемых озимых превосходит показатели АПУ озимых культур средних широт, где важным условием урожая является оптимальное увлажнение почв. В ближайшее время мы дадим ответ на вопрос: «Может ли предложенный нами объектно-ориентированный подход быть распространен на АПУ озимой пшеницы в регионах богарного земледелия?».

### Литература

1. Якушев, В.П. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства / В.П. Якушев, Н.Н. Дубенок, Е.А. Лупян // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23
2. Халил, З.Х. Прогноз урожайности озимых пшеницы и ячменя в орошаемых субтропиках с использованием множественной регрессии и искусственных нейронных сетей / З.Х. Халил, С.М. Абдуллаев // *Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 23–29 ноября 2020 года. Нано-, био-, информационные, когнитивные и социогуманитарные науки и технологии*. – М.: МФТИ, 2020. – С. 12–14.
3. Использование спутниковой информации MODIS в оперативной агрометеорологии / А.Д. Клещенко, В.М. Лебедева, Т.А. Найдина, О.В. Савицкая // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2015. – Т. 12, № 2. – С. 143–154.
4. Лебедева, В.М. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. II: Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Кн. 2: Оперативное агрометеорологическое прогнозирование / В.М. Лебедева, А.И. Страшная. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. – 216 с.
5. Сиротенко, О.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. II: Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Кн. 1: Математические модели в агрометеорологии / О.Д. Сиротенко. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2012. – 136 с.
6. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы / И.Ю. Савин, С.А. Барталев, Е.А. Лупян и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2010. – Т. 7, № 3. – С. 275–285.
7. Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации / В.Г. Бондур, К.Ю. Гороховский, В.Ю. Игнатьев и др. // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2013. – № 6. – С. 61–68.
8. Методические указания по составлению прогнозов урожайности и валового сбора всех зерновых и зернобобовых культур, а также основных сельскохозяйственных культур в Прибалтике, Белоруссии и европейской части РСФСР / под ред. докт. геогр. наук А.Н. Полевого. – Обнинск: Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, 1987. – 109 с.
9. *Wheat growth guide* // Agriculture and Horticulture Development Board. Cereals & Oilseeds. – 2018. – 44 p. – <https://ahdb.org.uk/wheatgg>.
10. *Barley growth guide* // Agriculture and Horticulture Development Board. Cereals & Oilseeds. – 2018. – 40 p. – <https://ahdb.org.uk/barleygg>.
11. *Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models* / F. Kogan, N. Kussul, T. Adamenko et al. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2013. – Vol. 23. – P. 192–203. DOI: 10.1016/j.jag.2013.01.002
12. Didan, K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006/ K. Didan // *NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC*, 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006
13. Khalil, Z.H. Sensitivity of Winter Crops to climate variability in the irrigated subtropics of Iraq (Al-Diwaniyah) / Z.H. Khalil, S.M. Abdullaev // *Procedia Computer Science*. – 2020 – Vol. 167. – P. 1066–1079. DOI: 10.1016/j.procs.2020.03.405
14. Дегтярев, А.С. Статистические методы обработки метеорологической информации: учеб. / А.С. Дегтярев, В.А. Драбенко, В.А. Драбенко. – СПб.: ООО «Андреевский издательский дом», 2015. – 225 с.
15. Абдуллаев, С.М. Жизненный цикл природно-антропогенных систем: концепция и методы исследования / С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская, Ю.А. Сапельцева // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология*. – 2013. – № 2. – С. 99–106.
16. Халил, З.Х. Диагностика ландшафтов провинции Эль-Дивания (Ирак) по мультиспектральным снимкам Landsat-8 / З.Х. Халил, С.М. Абдуллаев // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика»*. – 2018. – Т. 7, № 3. – С. 5–18. DOI: 10.14529/cmse180301

17. Терехин, Э.А. Влияние проективного покрытия растительности посевных площадей на ее отражательные свойства / Э.А. Терехин // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2016. – Т. 13, № 3. – С. 61–71. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-61-71
18. Zadoks, J.C. A decimal code for the growth stages of cereals / J.C. Zadoks, T.T. Chang, C.F. Konzak // *Weed Research*. – 1974. – Vol. 14, no. 6. – P. 415–421. DOI: 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x
19. *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants. BBCH Monograph* / U. Meier (Ed.). – 2nd edition. – 2001. – 158 p. DOI: 10.5073/bbch0515
20. Пшеница: история, морфология, биология, селекция: моногр. / В.В. Шелепов, Н.Н. Чебаков, В.А. Вергунов, В.С. Кочмарский. – Мироновка, 2009. – 575 с.
21. *Potato Yield Prediction Using Machine Learning Techniques and Sentinel 2 Data* / D. Gómez, P. Salvador, J. Sanz, J.L. Casanova // *Remote Sens*. – 2019. – Vol. 11. – 1745. – P. 1–17. DOI: 10.3390/rs11151745
22. *Assessing the Performance of MODIS NDVI and EVI for Seasonal Crop Yield Forecasting at the Ecodistrict Scale* / L. Kouadio, N.K. Newlands, A. Davidson et al. // *Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 6. – P. 10193–10214. DOI: 10.3390/rs61010193
23. *Agricultural Recommendation System for Crops Using Different Machine Learning Regression Methods* / M. Garanayak, G.S. Sachi, N. Mohanty, A.K. Jagadev // *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*. – January–March 2021. – Vol. 12, no. 1. – P. 1–20. DOI: 10.4018/IJAEIS.20210101.oa1
24. *Bassoa, B. Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies* / B. Bassoa, L. Liua // *Chapter 4 in Advances in Agronomy*. – January 2018. – P. 201–255. DOI: 10.1016/bs.agron.2018.11.002

**Халил Зена Хуссейн**, аспирант, кафедра системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; zenahussaink@gmail.com.

**Абдуллаев Санжар Муталович**, д-р геогр. наук, профессор, кафедра системного программирования, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; abdullaevsm@susu.ru.

Поступила в редакцию 29 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210203

## REGRESSION FORECASTS OF IRRIGATED WINTER CROP YIELDS USING SATELLITE VEGETATION INDEXES: MODELS, PREDICTORS AND EXPERIMENTS

**Z.H. Khalil**, zenahussaink@gmail.com,  
**S.M. Abdullaev**, abdullaevsm@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The technologies of agrometeorological crop forecasts (ACF), based on data on the normalized vegetation index (NDVI) are an important element of the modern agricultural industry. **Aim.** To establish the heuristic yield model and approaches to the development of models of regression forecasts, including the ACF predictors selection procedure by exploring satellite Moderate Imaging Spectroradiometer (MODIS) NDVI data and conduct experimental forecasting. **Materials and methods.** The official yield statistics of irrigated winter wheat and barley in Diwanayah province of Iraq and the NDVI MODIS observation for 2001–2019 are used. It is proposed to choose a two-component heuristic yield model containing a yield trend, due to a relatively slow change in crop cultivation technology and a climatic component associated with fluctuations in biological produc-

tivity due to the effects of weather conditions. **Results.** Using of heuristic model as background, an object-oriented approach to the choice of ACF regression model and predictor selection is developed. Firstly, we use NDVI semi-quantitative connection with crop coverage and crop leaf indexes to determine NDVI evolution according with the wheat and barley growing stages. Then, it is shown that in the province level ACF, as the original predictors should choose the NDVI time-series derived on the first and second half of February for three distinct grain-producing regions of the province. Experiments have shown that the satisfactory quality of the regressive ACF of both cultures can be achieved with 2–3 different original non-collinear predictors by their combination with the last year's yield or by inclusion of linear or quadratic dependencies. **Conclusion.** Wheat forecast with a relative error of 10% is obtained only by special selecting of time interval to train model and by control the parameters of the auto-regressive predictor. The high quality of the barley forecasting models is due to the fact that the variability of barley yields is dominated by the climatic component. The developed object-oriented approach can be adapted to the conditions of rainfed agriculture and to forecast of yield of other crops.

*Keywords:* winter wheat and barley yield forecasts, irrigation farming in Iraq, NDVI MODIS, climatic crop anomalies, regression models.

### References

1. Yakushev V.P., Dubenok N.N., Loupian E.A. [Earth remote sensing technologies for agriculture: application experience and development prospects]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 11–23. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23
2. Khalil Z.H., Abdullaev S.M. [Forecast of winter wheat and barley yields in irrigated subtropics using multiple regression and artificial neural network]. *Proc. of 63 MFTI All-Russian conference, November 23–29, 2020. Nano-, bio-, information, cognitive and social science and technology*. Moscow, MFTI, 2020, pp. 12–14. (in Russ.)
3. Kleshchenko A.D., Lebedeva V.M., Naidina T.A., Savitskaya O.V. [MODIS satellite data usage in operational agrometeorology]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 143–154. (in Russ.)
4. Lebedeva V.M., Strashnaya A.I. *Osnovy sel'skokhozyaystvennoy meteorologii. T. II: Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kn. 2: Operativnoye agrometeorologicheskoye prognozirovaniye* [The basics of agricultural meteorology. Volume II. Methods of calculations and forecasts in agrometeorology. Book 2. Operational agro-meteorological forecasting]. Obninsk, FGBU "VNIIGMI-MCD", 2012. 216 p.
5. Sirotenko O.D. *Osnovy sel'skokhozyaystvennoy meteorologii. T. II: Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kn. 1: Matematicheskiye modeli v agrometeorologii* [The basics of agricultural meteorology. Volume II. Methods of calculations and forecasts in agrometeorology. Book 1. Mathematical models in agrometeorology]. Obninsk, FGBU "VNIIGMI-MCD", 2012. 136 p.
6. Savin I., Bartalev S., Loupian E., Tolpin V., Khvostikov S. [Crop yield forecasting based on satellite data: opportunities and perspectives]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 275–285. (in Russ.)
7. Bondur V.G., Gorohovskij K.Yu., Ignat'ev V.Yu., Murynin A.B., Gaponova E.V. The method of predicting yields by satellite observations of the vegetation dynamics). *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos"emka*, 2013, no. 6, pp. 61–68. (in Russ.)
8. Polevoi A.N. (Ed.). *Metodicheskiye ukazaniya po sostavleniyu prognozov urozhaynosti i valovogo sbora vseh zernovykh i zernobobovykh kul'tur, a takzhe osnovnykh sel'skokhozyaystvennykh kul'tur v Pribaltike, Belorussii i evropeyskoy chasti RSFSR* [Guidelines for forecasting the yield and gross harvest of all grains and legumes, as well as major crops in the Baltics, Belarus and the European part of the Russia]. Obninsk, All-Union Research Institute of agro meteorology, 1987. 109 p.
9. Wheat growth guide. *Agriculture and Horticulture Development Board. Cereals & Oilseeds*, 2018, 44 p. Available at: <https://ahdb.org.uk/wheatgg>.
10. Barley growth guide. *Agriculture and Horticulture Development Board. Cereals & Oilseeds*, 2018, 40 p. Available at: <https://ahdb.org.uk/barleygg>.
11. Kogan F., Kussul N., Adamenko T., Skakun S., Kravchenko O., Kryvobok O., Shelestov A., Kolotii A., Kussul O., Lavrenyuk A. Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observa-

tion, meteorological data and biophysical models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, vol. 23, pp. 192–203. DOI: 10.1016/j.jag.2013.01.002

12. Didan K. MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. Distributed by NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD13Q1.006

13. Khalil Z.H., Abdullaev S.M. Sensitivity of Winter Crops to climate variability in the irrigated subtropics of Iraq (Al-Diwaniyah). *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 167, pp. 1066–1079. DOI: 10.1016/j.procs.2020.03.405

14. Degtyarev A.S., Drabenko V.A., Drabenko V.A. *Statisticheskiye metody obrabotki meteorologicheskoy informatsii: ucheb.* [Statistical methods of meteorological information processing. Textbook]. St. Petersburg, OOO “Andreevskij izdatel'skij dom”, 2015. 225 p. (in Russ.)

15. Abdullaev S.M., Lenskaya O.Y., Sapeltseva Y.A. The Life Cycle of Natural and Anthropogenic Systems: the Concept and Methods. *Bulletin of Voronezh State University. Series: Geography*, 2013, no. 2, pp. 99–106. (in Russ.)

16. Khalil Z.H., Abdullaev S.M. Diagnosis of Landscapes of the Province of Al-Diwaniyah (Iraq) by Using of Landsat-8 Multispectral Images. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computational Mathematics and Software Engineering*, 2018, vol. 7, no. 3, pp. 5–18. (in Russ.) DOI: 10.14529/cmse180301

17. Terekhin E.A. [Influence of crop areas vegetation cover fraction on their spectral reflectivity properties]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*, 2016, vol. 13, no. 3, pp. 61–71. (in Russ.) DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-61-71

18. Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 1974, vol. 14, no. 6, pp. 415–421. DOI: 10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x

19. Meier U. (Ed.). *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants*. BBCH Monograph, 2nd edition, 2001. 158 p. DOI: 10.5073/bbch0515

20. Shelepov V.V., Chebakov N.N., Vergunov V.A., Kochmarskiy B.C. *Pshenitsa: istoriya, morfologiya, biologiya, selektsiya: monogr.* [Wheat: history, morphology, biology, selection]. Mironovka, 2009, 575 p.

21. Gómez D., Salvador P., Sanz J., Casanova J.L. Potato Yield Prediction Using Machine Learning Techniques and Sentinel 2 Data. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, 1745, pp. 1–17. DOI: 10.3390/rs11151745

22. Kouadio L., Newlands N.K., Davidson A., Zhang Y., Chipanshi A. Assessing the Performance of MODIS NDVI and EVI for Seasonal Crop Yield Forecasting at the Ecodistrict Scale. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, pp. 10193–10214. DOI: 10.3390/rs61010193

23. Garanayak M., Sachi G.S., Mohanty N., Jagadev A.K. Agricultural Recommendation System for Crops Using Different Machine Learning Regression Methods. *International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems*, January-March 2021, vol. 12, no. 1, pp. 1–20. DOI: 10.4018/IJAEIS.20210101.oa1

24. Basso B., Liua L. Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies. *Chapter 4 in Advances in Agronomy*, January 2018, pp. 201–255. DOI: 10.1016/bs.agron.2018.11.002

Received 29 March 2021

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Халил, З.Х. Регрессионные прогнозы урожайности орошаемых озимых культур с использованием спутниковых вегетационных индексов: модели, предикторы и эксперименты / З.Х. Халил, С.М. Абдуллаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 23–35. DOI: 10.14529/ctcr210203

#### FOR CITATION

Khalil Z.H., Abdullaev S.M. Regression Forecasts of Irrigated Winter Crop Yields Using Satellite Vegetation Indexes: Models, Predictors and Experiments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 23–35. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210203

# INFORMATION MEASURING SYSTEM FOR CORRECTION OF WORKING MEMORY PARAMETERS IN THE LEARNING PROCESSES

**A.A. Petrenko**, *a.a.petrenko@urfu.ru*,  
**V.S. Kublanov**, *kublanov@mail.ru*

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russian Federation*

This paper presents the results of a system analysis of the information-measuring system (IMS) for correction of the working memory parameters of subjects during the learning process, in which the neuroplasticity of the brain is triggered by stimulating the nerve formations of the neck of a spatially distributed field of voltage impulses, the target of stimulation is the cervical ganglia of the sympathetic nervous system, control of functional changes in the body is carried out according to changes in the parameters of the blood supply system, and psychometric tests are used to assess working memory parameters. **Aim.** Development of IMS, using neuroelectrostimulation of peripheral nerve formations of the neck for correction of working memory parameters in the learning process. **Materials and methods.** The study involved 65 subjects, divided by randomization into experimental, control and placebo groups. Working memory parameters were assessed using the dual 2-back test, and the functional state was assessed using heart rate variability (HRV) analysis. **Results.** The results of the study showed that the proposed structure of the IMS and the method of correction working memory allow to improve the working memory parameters and normalize state of the autonomic nervous system after three correction procedures. The obtained test results practically do not change and are saved after 2 months. **Conclusion.** IMS, which provides multichannel neuroelectrostimulation of peripheral nerve formations in the neck, is effective for correction of cognitive skills, which is important for solving problems in the field of education.

*Keywords: information measuring system, neuroelectrostimulation, system analysis, information, methods and algorithms, cognitive characteristics, working memory.*

## Introduction

At the present stage of science and technology progress, in the context of the integration of the latest technologies, a person must have the ability to materialize his capabilities for active participation in social life. In this process, a special role is assigned to the development of learning technology, and the assessment of individual human learning abilities. In connection with the rapid development of the technical component of complex systems against the background of a decrease in the general educational level of training, ensuring effective training of specialists in complex technical systems is currently becoming an urgent task [1].

Learning disabilities can lead to poor performance in the child (student), which is unexpected when considering their potential, intelligence quotient (IQ), quality of the learning process, intact sensory system, adequate motivation, and appropriate learning conditions.

It is worth noting that learning disabilities are specific in the sense that they affect certain areas of information processing (for example, reading, writing and math), in contrast to the global difficulties seen in children with intellectual disabilities. Although they have medium to high IQ, people with disabilities do not learn as quickly as others. This indicates that their problem cannot be simply explained by an impaired intellectual development, the reasons may be more complex phenomena that should be paid attention to [2].

People with learning disabilities may have deficits in one or more cognitive processes [3], including phonological processing, long-term information retrieval, attention, short-term memory, and working memory. Among several cognitive processes, working memory was found to be closely related to aca-

demic skills. Numerous studies have shown a strong relationship between working memory performance, reading skills and performance in mathematics [4].

Some researchers [5] suggest that working memory is even more important for learning than IQ, as it is the best indicator of learning. It has been shown that IQ is a measure of what a person has already learned, while working memory measures learning ability (actual learning potential).

As an empirical characteristic of a person's ability to learn, learnability includes many indicators and parameters of a person's identity. These include, first of all, human cognitive capabilities (features of sensory and perceptual processes, memory, attention, thinking and speech), personality traits – motivation, character, emotional manifestations [6]. Various parts of the brain are involved in these processes, as well as various regulatory systems of the human body, of which the autonomic nervous system (ANS) is the most significant. To quickly understand and evaluate information at performing complex actions, the brain integrates complex and varied input signals from several sensory systems at the same time. The interconnection of these systems is carried out through the work of neural networks [7].

According to one of the key principles of the neuroscience, our brains are plastic and constantly change as a result of learning. In the process of learning, a person's cognitive reserve and adaptive responses to stress, traumatic events and diseases are formed. Thus, learning problems reflect the inefficient use of the resources that the brain possesses [8]. The idea of activating these resources in order to increase the speed and efficiency of training arises.

There are prerequisites that the combination of neurostimulation of the peripheral nervous system with traditional learning methods will allow the use of an endogenous neural circuit to improve the quality of learning by accelerating the tuning of neural networks responsible for cognitive functions [7]. Therefore, it is of interest to explore the possibilities of such an approach to improve the quality of learning.

This work presents the results of the IMS system analysis for correction of working memory parameters during the learning process, in which the neuroplasticity of the brain is triggered by stimulating the neural formations of the neck with a spatially distributed field of voltage impulses, and the target of stimulation is the cervical ganglia of the sympathetic nervous system [9], the control of human functional changes is carried out according to heart rate variability (HRV) changes, and dual 2-back test are used to assess the working memory parameters.

### **1. The structure of the information measurement system**

To organize information measurement system (IMS), we will use the theory and technology of biotechnical systems, which are a set of biological and technical elements interconnected in a single control loop [10]. To the same extent, biotechnical systems include both systems in which a person plays the role of a control link and technical systems that control the human body to solve specific problems.

IMS for the correction of working memory parameters in the learning process belongs to the second type of systems. Usually a person in this position is defined as a human operator, and the effectiveness of such systems depends on how ready he is to perceive the external world and make the right decisions [11]. When solving these problems, not only technical means are used, but also psychometric techniques, as well as methods of functional studies of the human condition. An indispensable condition for the optimal functioning of biotechnical systems are the principles of the adequacy of the coordination of the “management” characteristics of the technical and biological elements of the system and the principle of identifying the information environment, which requires optimization of the intensity of flows and the form of presentation of information, which are exchanged during the operation of technical and biological elements of the system [12].

Accordingly, the IMS block diagram for correction of working memory parameters can be presented as in Fig. 1.

The features of the organization and the tasks performed by units included in the IMS are considered below.

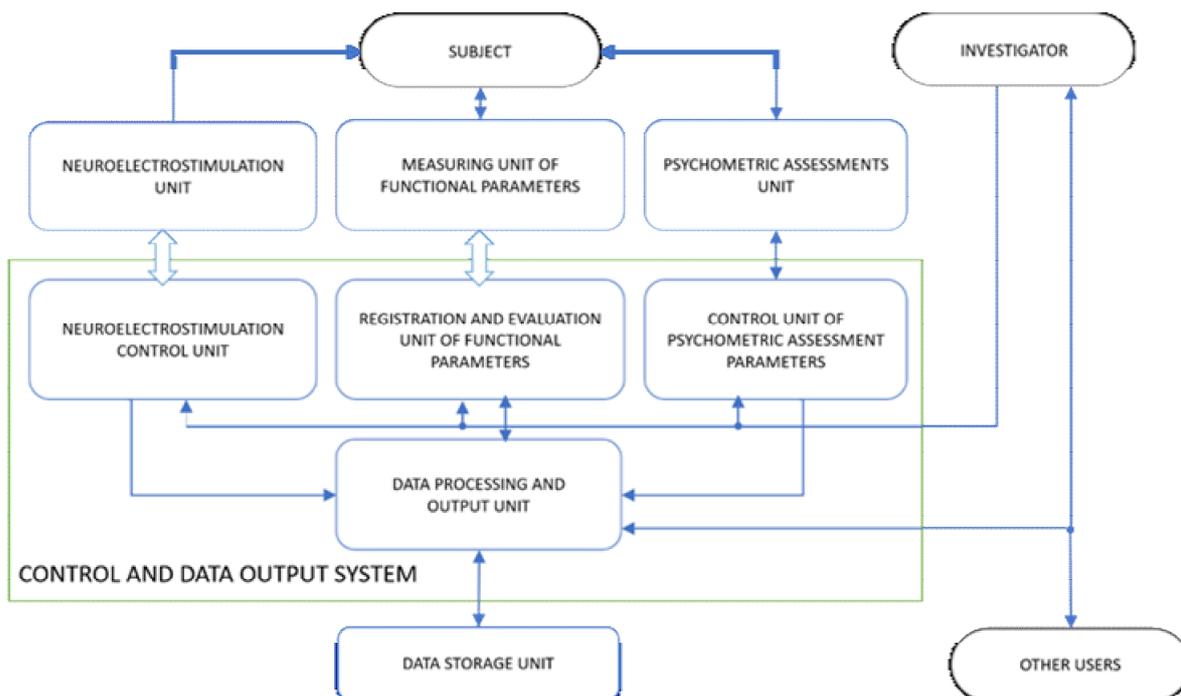


Fig. 1. Block diagram of the information measuring system structure

**1.1. Neuroelectrostimulation unit**

Depending on the tasks of the study, the neuroelectrostimulation unit can have two realizations of the structure of voltage pulse sequences that provide electrical stimulation of the nerve formations of the neck: a multi-channel spatially distributed field of impulses, the target of which is the cervical ganglia of the sympathetic nervous system; a sequence of impulses between two electrodes – in this case, the target of stimulation is one of the areas of the neck in which the presence of fibers of the sympathetic nervous system is minimal.



Fig. 2 The general view of the “SYMPATHOCOR-01” device

For the formation of different structures of impulse sequences in the IMS, a neuroelectrostimulator device “SYMPATHOCOR-01” was used [13]. General view of the “SYMPATHOCOR-01” device is shown in Fig. 2.

The formation of a spatially distributed field of voltage pulses occurs between 13 electrodes of one of the multi-element electrodes (cathodes) and one or more electrodes of the other (anodes). During one switching cycle of the cathodes, a “burst” of such pulses is formed, with a current flowing under each cathode during one partial pulse, and in the region under the anode during the entire “pack” of pulses. Thus, a spatially concentrated current structure is formed in

the neck tissues under the anode for one period of formation of a “pack” of pulses, the duration of which depends on the sum of the durations of 13 partial voltage pulses. And in the cathode zone there is a spatially distributed current structure of 13 areas, each of which corresponds to the location of the partial cathode, and the duration of the partial current pulse depends on the duration of the partial pulse.

The device can form partial current pulses with an amplitude of up to 15 mA, a duration of 15 to 60  $\mu$ s and a “pack” of pulses with a frequency of 5 to 150 Hz.

The structure of impulse sequences, neuroelectrostimulation parameters and the treatment process are controlled through the neuroelectrostimulation control unit via the BlueTooth channel formed by the transmitting and receiving elements located in the “SYMPATHOCOR-01” device and a personal computer.

### 1.2. Measuring unit of functional parameters

Measuring unit of functional parameters provides registration of biomedical signals that reflect the physical manifestations of the physiological processes of a living organism and can be measured and presented in a convenient form for processing using electronic means.

The learning process requires from the body not only high resistance to extreme influences, but also good plasticity, i.e. the ability to adapt (adapt) to new conditions of existence. In the course of such adaptation, a new functional system is formed, which requires a certain tension of regulatory systems, additional energy costs. This process also requires constant expenditure of functional reserves. Thus, the normal level of functioning of the main systems of the body can be maintained only if there is no overstrain of regulatory mechanisms and the functional reserve is not depleted.

It is known that the human nervous system is subdivided into central and peripheral [14]. The central one includes the brain and spinal cord, the peripheral one includes the spinal and cranial nerves. Separately, the ANS is also distinguished, which ensures the continuous functioning of autonomic processes in the body (digestion, heartbeat, respiration, urination, etc.). The ANS is represented by its own nerve plexuses and fibers near the organs. The higher control centers of this system are located in the spinal cord and brain.

It was shown in [15] that HRV analysis has the greatest diagnostic value in neuroelectrostimulation of nerve formations in the neck. At the same time, a significant improvement in the functional connections of the medial prefrontal cortex with the rest of the brain was noted, which indicates an improvement in the connectivity of the brain regions, especially due to the activation of the frontal cortex. To implement the functions of the measuring unit of functional parameters in the IMS, a portable electroencephalograph – analyzer “Encephalan-EEGR-19/26” is used, which allows registering an electrocardiogram (ECG) signal and analyzing of HRV. The measuring unit of functional parameters and the unit for registration and evaluating unit of functional parameters are connected and synchronized with each other into a single wireless network using Bluetooth technology.

### 1.3. Psychometric Assessment Unit

The block of psychometric assessments is presented in the form of an N-back test for assessing working memory. The N-back technique is a modern and highly effective way to train working memory [16–18].

In the study, the difficulty level was dual 2-back: subject works with a sequence of visual and auditory stimuli, presented one at each time interval. Subject must give an answer if the current stimulus coincides with the element presented 2 intervals ago.

According to the test results, total score was determined. The test is implemented as a Brain Workshop software application on a personal computer.

### 1.4. Control and data output system

The control and data output system is presented in the form of a personal computer with a set of software systems and includes 4 elements: a neuroelectrostimulation control unit, a registration and evaluation unit of functional parameters, a control unit of psychometric assessment parameters, a data processing and output unit. The neuroelectrostimulation parameters are controlled using a software application for a personal computer.

An example of a graphical interface for setting parameters is shown in Fig. 3. The application for the control panel allows in real time to change the structure of the pulse sequence, the amplitude, duration of partial current pulses, the frequency of formation of the “pack” of pulses, to change the stimulation target, to change the direction of the field during neuroelectrostimulation [13].

The control of the parameters of registration of functional parameters is implemented using the software application of the “Encephalan-EEGR-19/26” complex, and the block of psychometric assessments is implemented through the Brain Workshop software application.

The data processing and output unit is presented in the form of software tools necessary for the analysis, processing and output of the ob-

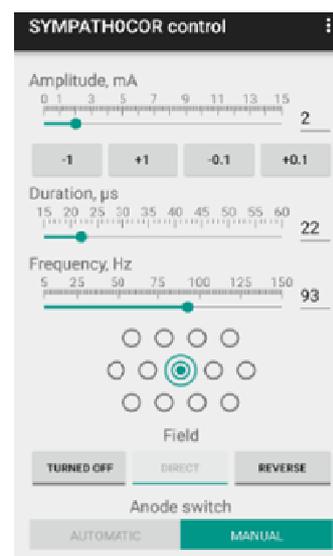


Fig. 3. Graphical interface for setting of neurostimulation parameters

tained data, implemented in the PYTHON programming language, and for statistical analysis, the STATISTICA 12.0 software was used.

The obtained data is sent to the data storage unit.

### 1.5. Data storage unit

A data storage unit is a cloud storage of a database. The database allows: to save the data set necessary for the IMS operation; displays them in an optimized way; provides fast search, reduces the time of access to the necessary information.

In the developed database, information is placed in the form of tables (entities), which store unique data sets of certain types. Instances of these entities act as rows of these tables, and their attributes act as columns. The developed database includes a set of textual, numerical and visual data that allows you to store general information about the research protocol, the name of the subject, the results of his testing, data of functional parameters, as well as the results of statistical data processing.

The database is available to the investigator at any stage of the research.

## 2. Materials and methods

The research was carried out at the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin.

The research involved 65 subjects aged 20 to 25 years, who gave informed consent to participate in the research.

The research consisted of 2 parts:

I part: primary assessment of the basic values of the dual 2-back test and the formation of groups of subjects to study the possibilities of correcting their working memory using IMS. Group formation was carried out by randomizing study participants to include them in one of three groups: experimental, placebo and control. As a result, the experimental group included 33 subjects, the control group – 22, placebo – 10 (Table. 1).

II part: carrying out a correction technique using the developed IMS.

When correcting working memory for the subjects of the experimental group, neuroelectro-stimulation was used with a spatially distributed field of voltage pulses (5 procedures for 5 days).

The placebo subjects were stimulated using a pulsed voltage sequence generated between one anode and one cathode (5 treatments over 5 days).

For subjects of the control group, no stimulation was applied.

With the help of the measuring block of the IMS functional parameters, the ECG signal was recorded for the purpose of further analysis of the HRV parameters.

Table 1

Description of the study groups

Group	Number of Subjects	Impact
Experimental	33	Neuroelectrostimulation
Placebo	22	Placebo-stimulation
Control	10	No stimulation

The sequence diagram of the one day of the study is presented in Table. 2.

Table 2

Sequence diagram of the study

Stage	Groups			Time, min
	Experimental	Placebo	Control	
1	Background			5
2	Neuroelectrostimulation + dual 2 back	Stimulation + dual 2 back	dual 2 back	5
3	Rest			5
4	Neuroelectrostimulation + dual 2 back	Stimulation + dual 2 back	dual 2 back	5
5	Aftereffect			5

### 3. Research results

#### 3.1. Dual 2-back test results

To assess changes in working memory parameters during the use of the developed IMS, an analysis of variance was carried out for the dual 2-back test parameters. The results are shown in Fig. 4.

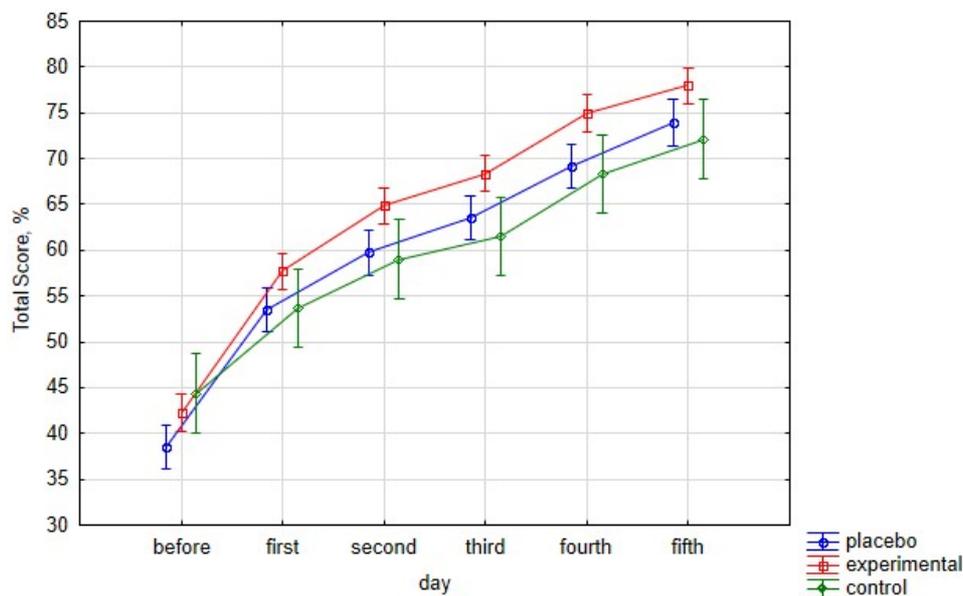


Fig. 4. Total score

According to the primary assessment of the dual 2-back test parameters, the average indicator of the total score in the three groups was  $(41 \pm 1.9)\%$ .

After the first procedure, the greatest increase in the indicator of the total score in all three groups is observed: the average indicator of the total score in the experimental group was  $(58.5 \pm 1.9)\%$ , in the control group –  $(53.3 \pm 3, 1)\%$ , in the placebo group –  $(52.7 \pm 2.1)\%$ .

The greatest significant difference between the three groups is observed after the third procedure. The average indicator of the total score in the experimental group after the third procedure was  $(69.6 \pm 1.8)\%$ , in the control group –  $(63 \pm 5.6)\%$ , in the placebo group –  $(63 \pm 2.3)\%$

#### 3.2. HRV data results

In the experimental and placebo groups, in order to assess functional changes during the implementation of the correction technique of neuroelectrostimulation, the HRV parameters were analyzed on the fifth day of correction. In the course of data processing, the values of the Total Power (TP) of the spectrum, High Frequency – HF, Low Frequency – LF, Very Low Frequency – VLF spectral components, their normalized values  $HF_{nu} = HF \cdot 100 / (TP - VLF)$ ,  $LF_{nu} = LF \cdot 100 / (TP - VLF)$  and  $VLF_{nu} = VLF \cdot 100 / (TP - VLF)$ , as well as the vegetative balance index LF/HF were obtained. Within each group, the mean values of these parameters and the corresponding standard deviations were calculated. The results of analysis of variance of HRV data are presented in Figs. 5–7.

From the obtained data, it follows that in the experimental group during the 2 and 4 stages, which corresponds to the simultaneous action of neurostimulation and the performance of the dual 2 back test, there is a decrease in the  $LF_{nu}$  component, an increase in the  $HF_{nu}$  component and a decrease in the LF/HF. The increase in  $HF_{nu}$  is associated with a decrease in sympathoadrenal activity and more pronounced vagal influences on the heart rate. A decrease in the LF/HF index indicates the normalization of the vegetative balance.

In the placebo group, the opposite tendency is observed: during stages 2 and 4, an increase in the  $LF_{nu}$  component, a decrease in the  $HF_{nu}$  component, and an increase in the LF/HF autonomic balance index are observed. An increase in the  $LF_{nu}$  spectrum component predominantly characterizes the state of strengthening of the sympathetic center of vascular tone regulation. An increase in the LF/HF parameter indicates a vegetative disbalance. The placebo group is characterized by excessive activation of the sympathetic-adrenal system and a decrease in the activity of parasympathetic regulation.

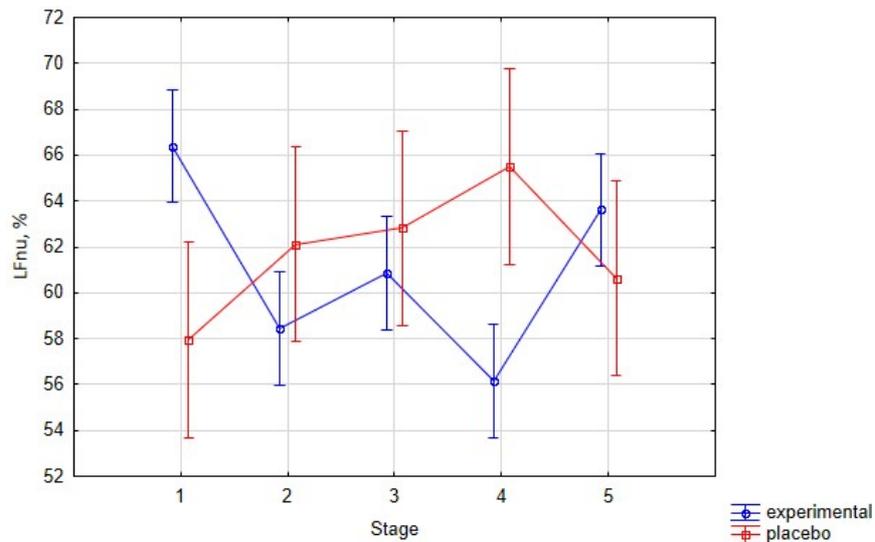


Fig. 5. LFnu component changes on fifth day

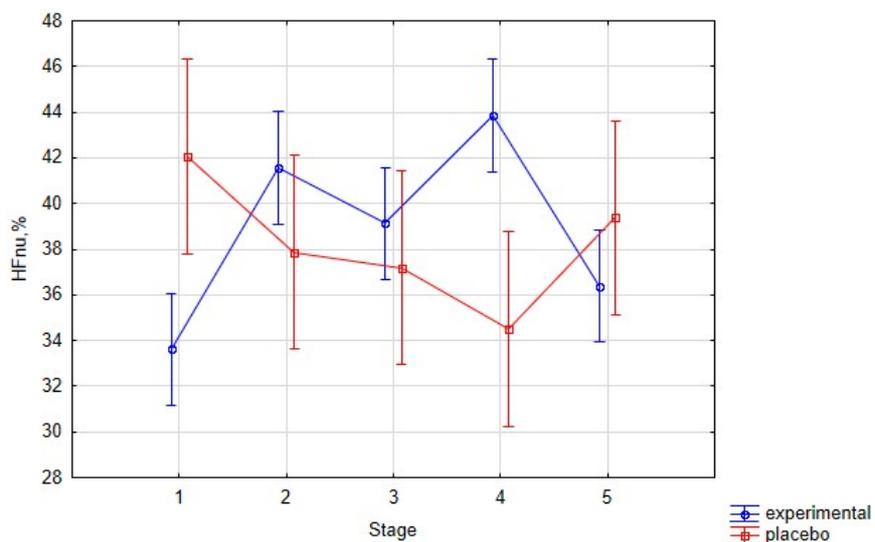


Fig. 6. HFnu component changes on fifth day

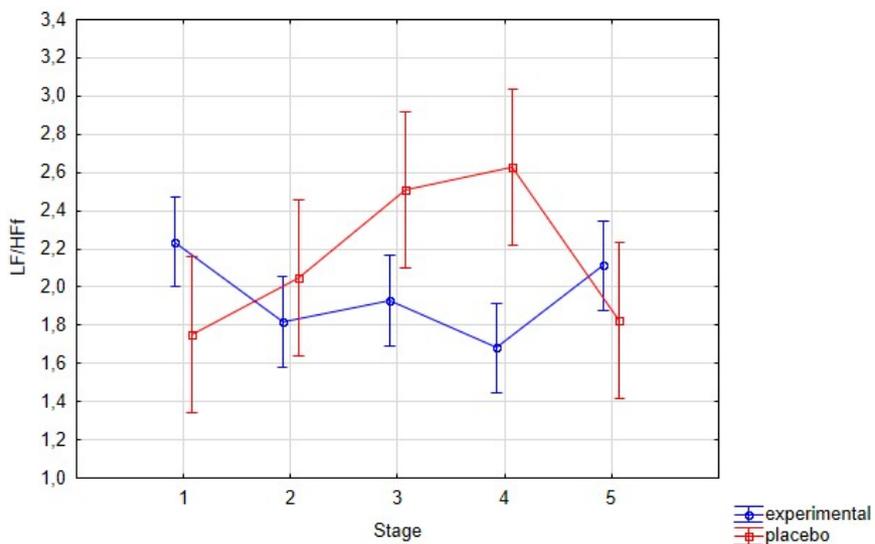


Fig. 7. LF/ HF changes on fifth day

### 3.3. Dual 2-back test results after 2 months

At re-evaluating the test parameters after 2 months in the experimental group, the obtained results are preserved: after the fifth procedure, the values of the total score were  $(78.4 \pm 1.8)\%$ , after 2 months –  $(75.4 \pm 1.9)\%$  (Fig. 8).

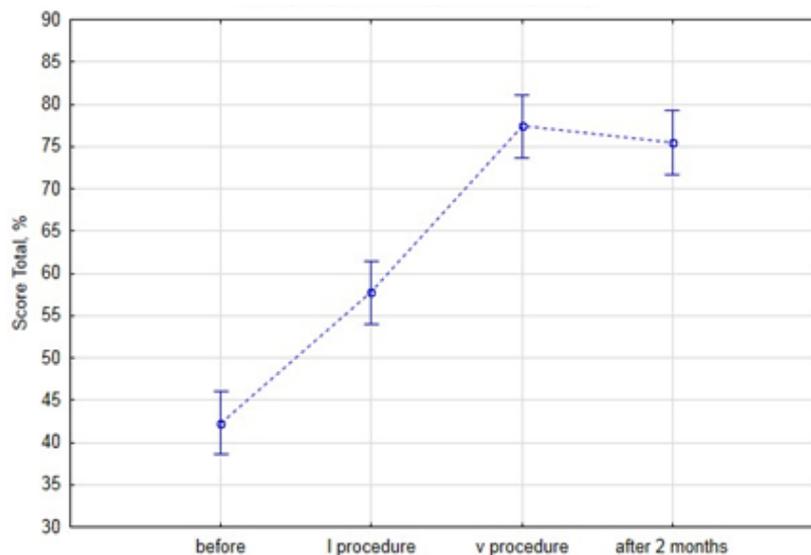


Fig. 8. Total score in experimental group after 2 months

### Conclusion

The paper considers the possibilities of IMS for the correction of working memory parameters using neuroelectrostimulation of the peripheral nerve formations of the neck.

Shown, that:

- the proposed structure of the IMS provides the principles of the adequacy of the coordination of “management” characteristics and information flows of technical and biological elements of the IMS;
- application for stimulation of a spatially distributed field of voltage pulses formed in the “SYMPATHOCOR-01” device provides correction of working memory parameters in subjects whose total score of the dual 2-back test was below 47%;
- significant intergroup differences in the parameters of the dual 2-back test are observed on the third day: the average indicator of the total score in the experimental group was  $(58.5 \pm 1.9)\%$ , in the control group –  $(53.3 \pm 3.1)\%$ , in the placebo group –  $(52.7 \pm 2.1)\%$ ;
- results of the dual 2-back test in the experimental group are saved at a temporary distance: the values of the total score after 2 months changed insignificantly – from  $(78.4 \pm 1.8)\%$  to  $(75.4 \pm 1.9)\%$ ;
- it was found that with neuroelectrostimulation there is an increase in the activity of the parasympathetic nervous system of the body and the normalization of the autonomic balance.

The obtained results of the study can be applied in the development of new programs and methods of the educational process aimed at improving the quality of learning and the speed of mastering new skills.

### References

1. Nalichaeva S.A. *Psichologiya stressa* [Psychology of stress]. Sevastopol, Avangard Publ., 2018. 97 p.
2. Gupta P.K., Sharma V. Working Memory and Learning Disabilities: A Review. *The International Journal of Indian Psychology*, 2017, vol. 4 (4), pp. 111–121. DOI: 10.25215/0404.013
3. Masoura E.V. Establishing the link between working memory function and learning disabilities. *Learning disabilities. A contemporary journal*, 2006, vol. 4 (2), pp. 29–41.
4. Swanson H.L., Howard C.B., Saez L. Do different components of working memory underlie different subgroups of reading disabilities? *Journal of learning disabilities*, 2006, vol. 39 (3), pp. 252–269.

5. Alloway T.P. Working memory, but not IQ, predicts subsequent learning in children with learning difficulties. *European Journal of Psychological Assessment*, 2009, vol. 25 (2), pp. 92–98. DOI: 10.1027/1015-5759.25.2.92
6. Lebedev A.V., Zhigalov Yu.A. *Psihicheskie processy i sostoyaniya* [Mental processes and states]. St. Petersburg, 1999. 124 p.
7. Mandel' B.R. *Sovremennaya pedagogicheskaya psihologiya* [Modern educational psychology]. Moscow, Direkt-Media Publ., 2015. 828 p.
8. Brain Waves Module 2: Neuroscience: implications for education and lifelong learning. *The Royal Society*, 2011.
9. Kublanov V.S. [Electrophysical method for correcting violations of the cerebral blood supply regulation system]. *Biomedical Radioelectronics*, 1999, no. 4, pp. 12–15. (in Russ.)
10. Akulov S.A., Fedotov A.A. *Osnovy teorii biotekhnicheskikh sistem* [Foundations of the theory of biotechnical systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014. 259 p.
11. Popechitelev E.P. *Chelovek v biotekhnicheskoy sisteme* [Human in biotechnical system]. Stary Oskol, TNT Publ., 2016. 584 p.
12. Ershov Yu.A., Shchukin S.I. *Osnovy analiza biotekhnicheskikh sistem* [Fundamentals of the analysis of biotechnical systems]. Moscow, Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2011. 526 p.
13. Kublanov V.S., Babich M.V., Petrenko T.S. New principles for the organization of neurorehabilitation. *Biomedical Engineering*, 2018, no. 52, pp. 9–13.
14. Rizzo D.C. *Fundamentals of anatomy and physiology*. Boston, USA, Cengage Learning, 2015. 562 p.
15. Kublanov V., Aftanas L., Petrenko T., Danilenko K. Investigation of the Neuro-electrostimulation Mechanisms by Means of the Functional MRI: Case Study. *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*, 2018, vol. 4, pp. 319–324. DOI: 10.5220/0006712203190324
16. Pelegrina S., Lechuga M.T., García-Madruga J.A., Rosa Elosúa M. Normative data on the n-back task for children and young adolescents. *Front. Psychol.*, 2015, vol. 6: 1544, pp. 1–11.
17. Jaeggi S., Studer-Luethi B., Buschkuhl M., Su Y. The relationship between n-back performance and matrix reasoning – implications for training and transfer. *Intelligence*, 2010, vol. 38, no. 6, pp. 625–635.
18. Ruf S.P., Fallgatter A.J., Plewnia C. Augmentation of working memory training by transcranial direct current stimulation (tDCS). *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7 (1), no. 876, pp. 1–11.

Received 16 April 2021

---

УДК 303.732.4

DOI: 10.14529/ctcr210204

### ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ПАМЯТИ В ПРОЦЕССЕ ОБУЧЕНИЯ

**А.А. Петренко, В.С. Кубланов**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

В настоящей работе приведены результаты системного анализа информационно-измерительной системы (ИИС) для коррекции параметров рабочей памяти добровольцев-испытуемых в процессе обучения, в которой запуск процесса нейропластичности головного мозга осуществляется с помощью стимуляции нервных образований шеи пространственно распре-

деленным полем импульсов напряжения, мишенью стимуляции являются шейные ганглии симпатической нервной системы, контроль функциональных изменений в организме осуществляется по данным изменений параметров системы кровоснабжения, а для оценки рабочей памяти используются психометрические тесты. **Цель работы:** разработка ИИС с использованием нейроэлектростимуляции периферических нервных образований шеи для коррекции параметров рабочей памяти в процессе обучения. **Материалы и методы.** В исследовании приняли участие 65 добровольцев-испытуемых, разделенных с помощью рандомизации на экспериментальную, контрольную и плацебо группы. Оценка параметров рабочей памяти проводилась с использованием теста dual 2-back, а оценка функционального состояния проводилась с помощью анализа вариабельности сердечного ритма (ВСР). **Результаты.** Результаты исследования показали, что предложенная структура ИИС и методика коррекции рабочей памяти позволяют улучшать показатели рабочей памяти и нормализовать состояние вегетативной нервной системы после трех процедур коррекции. Полученные результаты по тесту практически не изменяются и сохраняются через 2 месяца. **Заключение.** ИИС, обеспечивающая многоканальную нейроэлектростимуляцию периферических нервных образований шеи, является эффективной для коррекции когнитивных навыков, что актуально для решения задач из сферы образования.

*Ключевые слова:* информационно-измерительная система, нейроэлектростимуляция, системный анализ, информация, методы и алгоритмы, когнитивные характеристики, рабочая память.

### Литература

1. Наличаева, С.А. Психология стресса: учеб.-метод. пособие / С.А. Наличаева. – Севастополь: Авангард, 2018. – 97 с.
2. Gupta, P.K. Working Memory and Learning Disabilities: A Review / P.K. Gupta, V. Sharma // *The International Journal of Indian Psychology*. – 2017. – Vol. 4 (4). – P. 111–121. DOI: 10.25215/0404.013
3. Masoura, E.V. Establishing the link between working memory function and learning disabilities. *Learning disabilities* / E.V. Masoura // *A contemporary journal*. – 2006. – Vol. 4 (2). – P. 29–41.
4. Swanson, H.L. Do different components of working memory underlie different subgroups of reading disabilities? / H.L. Swanson, C.B. Howard, L. Saez // *Journal of learning disabilities*. – 2006. – Vol. 39 (3). – P. 252–269.
5. Alloway, T.P. Working memory, but not IQ, predicts subsequent learning in children with learning difficulties / T.P. Alloway // *European Journal of Psychological Assessment*. – 2009. – Vol. 25 (2). – P. 92–98. DOI: 10.1027/1015-5759.25.2.92
6. Лебедев, А.В. Психические процессы и состояния: метод. пособие для студентов всех специальностей / А.В. Лебедев, Ю.А. Жигалов. – СПб.: СПбГАХИПТ, 1999. – 124 с.
7. Мандель, Б.Р. Современная педагогическая психология. Полный курс: иллюстрир. учеб. пособие для студентов всех форм обучения / Б.Р. Мандель. – М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 828 с.
8. *Brain Waves Module 2: Neuroscience: implications for education and lifelong learning*. The Royal Society, 2011.
9. Кубланов, В.С. Электрофизический способ коррекции нарушений системы регуляции кровоснабжения головного мозга / В.С. Кубланов // *Биомедицинская радиоэлектроника*. – 1999. – № 4. – С. 12–15.
10. Акулов, С.А. Основы теории биотехнических систем / С.А. Акулов, А.А. Федотов. – М.: Физматлит, 2014. – 259 с.
11. Попечителей, Е.П. Человек в биотехнической системе / Е.П. Попечителей. – Старый Оскол: ТНТ, 2016. – 584 с.
12. Еришов, Ю.А. Основы анализа биотехнических систем: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / Ю.А. Еришов, С.И. Шукин. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 526 с.
13. Кубланов, В.С. Новые принципы организации нейрореабилитации / В.С. Кубланов, М.В. Бабич, Т.С. Петренко // *Медицинская Техника*. – 2018. – № 1. – С. 6–9.
14. Rizzo, D.C. *Fundamentals of anatomy and physiology* / D.C. Rizzo. – Boston, USA: Cengage Learning, 2015. – 562 p.

15. *Investigation of the Neuro-electrostimulation Mechanisms by Means of the Functional MRI: Case Study* / V. Kublanov, L. Aftanas, T. Petrenko, K. Danilenko // *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*. – 2018. – Vol. 4. – P.319–324. DOI: 10.5220/0006712203190324

16. *Normative data on the n-back task for children and young adolescents* / S. Pelegrina, M.T. Lechuga, J.A. García-Madruga, M. Rosa Elosúa // *Front. Psychol.* – 2015. – Vol. 6: 1544. – P. 1–11.

17. *The relationship between n-back performance and matrix reasoning — implications for training and transfer* / S. Jaeggi, B. Studer-Luethi, M. Buschkuhl, Y. Su // *Intelligence*. – 2010. – Vol. 38, no. 6. – P. 625–635.

18. *Ruf, S.P. Augmentation of working memory training by transcranial direct current stimulation (tDCS)* / S.P. Ruf, A.J. Fallgatter, C. Plewnia // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7 (1), no. 876. – P. 1–11.

**Петренко Анна Александровна**, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; a.a.petrenko@urfu.ru.

**Кубланов Владимир Семенович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; kublanov@mail.ru.

*Поступила в редакцию 16 апреля 2021 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Petrenko, A.A. Information Measuring System for Correction of Working Memory Parameters in the Learning Processes / A.A. Petrenko, V.S. Kublanov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 36–46. DOI: 10.14529/ctcr210204

### FOR CITATION

Petrenko A.A., Kublanov V.S. Information Measuring System for Correction of Working Memory Parameters in the Learning Processes. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 36–46. DOI: 10.14529/ctcr210204

---

# Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы

DOI: 10.14529/ctcr210205

## ON ONE SOLUTION OF THE NUMERICAL PROBLEM DIFFERENTIATION IN CALCULATION VERTICAL SPEED OF AIRCRAFT

V.I. Panferov<sup>1, 2\*</sup>, S.V. Panferov<sup>2</sup>, A.M. Hayutin<sup>1</sup>, N.A. Trenin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Russian Air Force Military Educational and Scientific Center "Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin", Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

\* E-mail: tgsiv@mail.ru

To ensure safety and improve the efficiency of flight missions, reliable information about the altitude and speed parameters of the aircraft (AC) is required. Therefore, improving the algorithm for calculating the vertical speed used as part of the algorithmic support for air signal systems (ASS) is a very urgent task. **Purpose of the study.** The problem of calculating the vertical speed of an aircraft in the ASS is considered. **Materials and methods.** The analysis of literature data on the use of numerical differentiation procedures to solve this problem is carried out, it is noted that the methods used are based on different ideas and approaches. It is indicated that two-point algorithms are significantly worse than multi-point algorithms in terms of the achieved accuracy, however, they are characterized by significant simplicity and speed. Various versions of multipoint algorithms are used, differing in complexity, the amount of information used, and the accuracy achieved. The features of the regularizing algorithms, which are essentially filters of a low-frequency useful signal, suppressing the high-frequency component of the error in measuring the altitude signal or, what is the same, atmospheric pressure, are noted. The data on systems with hardware differentiation of the height signal are given. **Results.** A fairly simple four-point algorithm for numerical differentiation is proposed and substantiated. Due to the averaging of both the measurement results themselves and the estimates of the derivatives, significant filtering of noise is realized, which is an important advantage of the algorithm. For greater accuracy in estimating the vertical speed, it is envisaged to include a preliminary filtering algorithm in the experimental data processing scheme. The filtering algorithm is found from the solution of the optimization problem; it is shown that this algorithm is structurally similar to the filtering algorithms constructed according to the well-known approaches of R. Kalman. The results of computational experiments on the study of the features and characteristics of the proposed algorithms are presented, illustrating their advantages, performance and the possibility of further use in ASS. It is shown that preliminary filtering significantly increases the accuracy of the vertical velocity estimation. **Conclusion.** The developed algorithms can be used to improve the algorithmic support of the ASS.

*Keywords: vertical speed, aircraft, air signal system, numerical differentiation, altitude, atmospheric pressure, multi-point algorithms, preliminary filtering, estimation accuracy.*

### Statement of the problem

One of functions of the system of air signals (ASS) is the problem of calculation of vertical velocity of the aircraft. As a rule, this problem is solved by method of numerical differentiation of signal of the barometric height determined by ASS. The algorithm of calculation of vertical velocity as it is well known [1], can be written down as follows:

$$h = h_0 + \frac{T_0}{\gamma} \left\{ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\uparrow} \left( \frac{\gamma R}{g} \right) \right\} \Rightarrow \frac{dh(\tau)}{d\tau} = - \frac{RT_0}{g p_0} \times \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\uparrow} \left( \frac{\gamma R}{g} - 1 \right) \frac{\partial p}{\partial \tau}, \quad (1)$$

where  $\gamma = 0.0065 \text{ K/m}$  – temperature gradient,  $g$  – acceleration of gravity,  $R$  – gas constant,  $p(\tau)$  – atmospheric pressure on the altitude  $h(\tau)$ ,  $\tau$  – time,  $p_0$  and  $T_0$  – respectively pressure and temperature at some height  $h_0$ , taken for the beginning of its counting,  $\uparrow$  – operation of exponentiation.

It is clear that both atmospheric pressure and relative altitude are determined with errors. Because of this, as is well known, the problem of a sufficiently accurate numerical estimate of the signal derivative with errors is difficult to implement, primarily due to its incorrectness [2–5]. Algorithms known in the literature [2–14] are based on different ideas and approaches, these algorithms have been developed for specific problems and conditions, and are characterized by different advantages and disadvantages. Therefore, directly, without additional tuning and optimization, it is rather difficult to use one or another well-known algorithm; there is an urgent need to develop a specific method for implementing the differentiation procedure for a specific problem to be solved.

So-called dot algorithms are known, for example, the simplest point-to-point algorithm of differentiation used, in particular, and in SVS is represented by means of the following formula [6–8, 15]:

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta\tau}, \quad (2)$$

where  $x(\tau)$  – the measured signal,  $\Delta\tau$  – period between the information retrieval moments  $\Delta\tau = \tau_{i+1} - \tau_i$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$ ,  $\tau_i = i \times \Delta\tau$ .

It is known also that the best accuracy is reached when using point-to-point algorithm of the central approximation [6]. However the big accuracy of calculation of derivative can be reached when using multipoint algorithms, in particular, due to averaging of results of calculations of derivative for two next points on point-to-point algorithm with step  $2\Delta\tau$  [9, 15].

In addition, various regularizing algorithms are also known [2–14]. It often uses algorithms based on the approximation of the measured signal by an algebraic polynomial followed by its analytical differentiation [7, 9–11], for example, in [11], cubic spline approximation of the measured data is used.

It is necessary to notice that regularization as a matter of fact as it is frequent and is specified in literature, represents suppression (filtration) of high-frequency component of measurement error of signal. As it is represented to us, and some multipoint algorithms including procedures of averaging in the structure can also be carried to regularizing algorithms.

In [13], to solve the differentiation problem, a frequency approach is used, an approximating function with a finite frequency spectrum is selected according to the properties of its derivative, here regularization is reduced to minimizing the Euclidean norm of the derivative estimate.

The problem of differentiation can be solved and as follows. It is well known that

$\int_0^{\tau} \frac{dx(\tau)}{d\tau} d\tau = x(\tau) - x(0)$ . If at the same time  $x(0) = 0$  (in this case there is no need to tie the decision to

different entry conditions – values  $x(0)$ ) i. e. if the task is brought to zero entry conditions that it is simple to implement, then the problem of differentiation comes down to the solution of the integrated

equation  $\int_0^{\tau} \frac{dx(\tau)}{d\tau} d\tau = x(\tau)$  relatively  $\frac{dx(\tau)}{d\tau}$ . Such regularizing approach is used in work [12].

According to the data of [9, 15], both point and approximating approaches are used in the ASS, in particular, in the SVS-2Ts-1M, a two-point algorithm (2) [9] is implemented, piecewise-polynomial approximation of all dependences used to calculate the altitude and speed parameters of the aircraft. In this case, naturally, it is not difficult to find an analytical expression for the derivative  $\frac{dh(\tau)}{d\tau}$  and determine its numerical value.

In [8] estimates of derivative are calculated on the simplest point-to-point algorithm (2) with the same period of time between points. At the same time it is considered that on the interval of time used at calculations the true derivative is equal to the same value, i. e. is const. For search of the resulting asses-

sment of derivative the system of the linear algebraic equations (SLAE) is solved. It is established what with increase in quantity of private estimates based on the ratio of (2) accuracy of the resulting assessment of derivative increases, however increases also computing complexity of the procedure that can serve as obstacle for its use in real time.

The algorithm of work [12], based on the solution of an integral equation, is also computationally complex. Similar in complexity to the algorithms of [8] and [12] should be considered the algorithms of [11, 13], which also require the solution of the SLAE.

In [14], it is noted that often when differentiating signals, the speed of the methods and the possibility of their use in real time are in demand, all this, of course, is determined by their computational resource intensity. It is indicated that the regularizing algorithm of A.N. Tikhonov, in which the integral equation is solved, requires large computational resources.

Also the calculators of vertical velocity using methods of hardware differentiation (the differentiating amplifiers are used) are known [16, 17]. However such measuring instruments as it is known, on number of indicators it is much worse than digital differentiators.

Thus, the problem of numerical differentiation is still far from its final solution; it is required to develop sufficiently reliable and computationally simple algorithms that sufficiently meet the requirements imposed on them. Moreover, when applying any approach, preliminary filtering of the differentiated signal can be applied.

#### Algorithm for calculating the derivative

Let's consider the following solution of objective. First, we will evaluate signal mean in  $(i + 1)$ -ty timepoint on four points including the current measurement and three previous i. e.

$$\bar{x} = (x_{i+1} + x_i + x_{i-1} + x_{i-2}) / 4. \quad (3)$$

It is known that the arithmetic average is more exact assessment of true value, than result of one measurement.

Secondly, let us refer the average value found in this way to  $\bar{x}$  the middle of the time interval on which these points are located. The location of the points used is shown in Fig. 1.

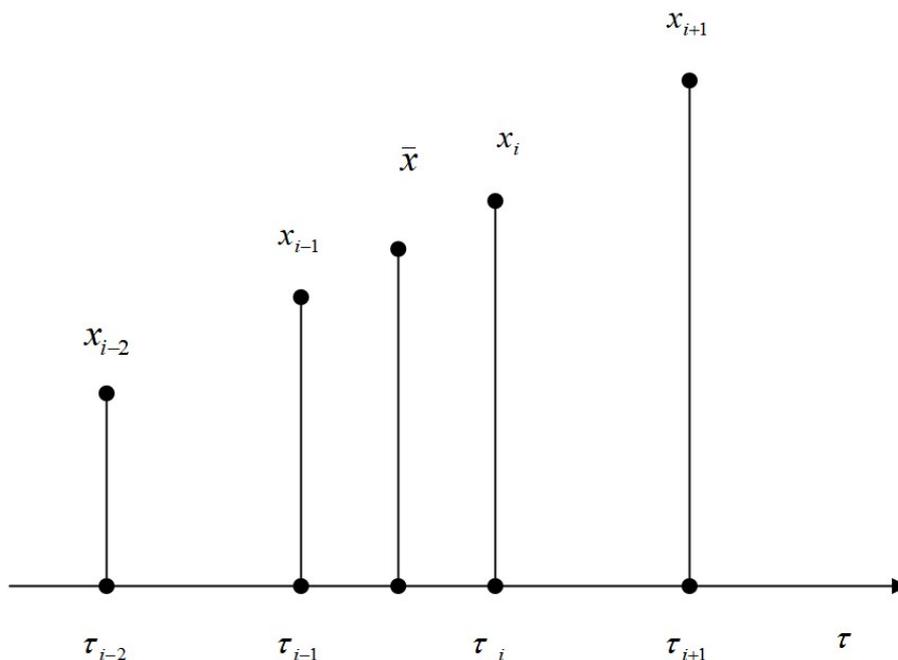


Fig. 1. The layout of the points used for differentiation

It is obvious that in this case it is possible to use the following four estimates of derivative of signal in  $(i + 1)$ -ty timepoint:

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{x_{i+1} - \bar{x}}{1.5\Delta\tau}, \tag{4}$$

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{x_i - \bar{x}}{0.5\Delta\tau}, \tag{5}$$

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{\bar{x} - x_{i-1}}{0.5\Delta\tau}, \tag{6}$$

$$\frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} \approx \frac{\bar{x} - x_{i-2}}{1.5\Delta\tau}. \tag{7}$$

It is well-known that the best assessment of derivative in  $(i + 1)$ -ty timepoint will be arithmetic average of the found private estimates for this purpose  $(i + 1)$ -th timepoint, i. e.

$$\begin{aligned} \frac{dx(\tau_{i+1})}{d\tau} &= \left[ \frac{x_{i+1} - \bar{x}}{1.5\Delta\tau} + \frac{x_i - \bar{x}}{0.5\Delta\tau} + \frac{\bar{x} - x_{i-1}}{0.5\Delta\tau} + \frac{\bar{x} - x_{i-2}}{1.5\Delta\tau} \right] / 4 = \\ &= \frac{1}{\Delta\tau} \left[ \frac{2}{3}(x_{i+1} - \bar{x}) + 2(x_i - \bar{x}) + 2(\bar{x} - x_{i-1}) + \frac{2}{3}(\bar{x} - x_{i-2}) \right] / 4 = \\ &= \frac{1}{\Delta\tau} \left[ \frac{1}{6}(x_{i+1} - \bar{x}) + \frac{1}{2}(x_i - \bar{x}) + \frac{1}{2}(\bar{x} - x_{i-1}) + \frac{1}{6}(\bar{x} - x_{i-2}) \right] = \\ &= \frac{1}{6\Delta\tau} [(x_{i+1} - \bar{x}) + 3(x_i - \bar{x}) + 3(\bar{x} - x_{i-1}) + (\bar{x} - x_{i-2})] = \\ &= \frac{1}{6\Delta\tau} [x_{i+1} + 3x_i - 3x_{i-1} - x_{i-2}]. \end{aligned} \tag{8}$$

As it is visible from formula (8), bigger weight is given to values of signal in  $i$ -ty and  $(i - 1)$ -th timepoints, and three times smaller weight to its values, extreme for the considered period, that is rather expedient.

It should be noted that due to the averaging of both the measurement results themselves (the arithmetic mean of the readings is used) and the estimates of the derivatives, noise filtering will be carried out, this is a well-known and absolutely verified result. In addition, as can be seen from formula (8), the algorithm is quite simple computationally, which, of course, is its undoubted advantage.

### Computing research of algorithm of differentiation

Fig. 2 shows the curve of the change in the height of the aircraft (AC) during the flight, while in the process of modeling for a regular (useful) signal of the form  $h(\tau) = h(0) + 3.5 \times \tau + a \times \sin(\omega\tau)$ , where  $h(0)$  – height of the beginning of maneuver of VS, interference was superimposed – the noise component of the barometric altitude signal. The interference was simulated using a random number generator with a uniform distribution law.

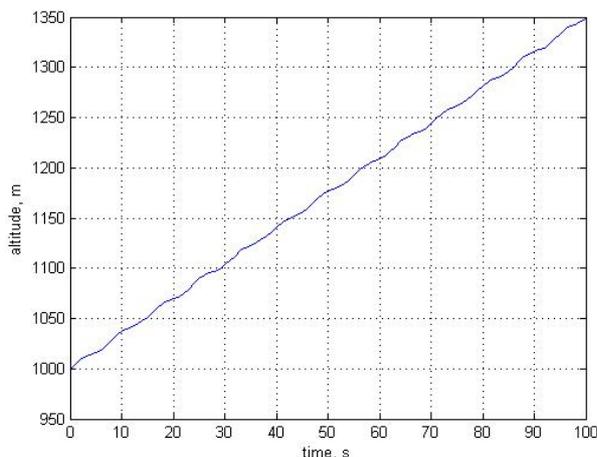


Fig. 2. Aircraft altitude change curve during flight

Fig. 3 shows the graphs of changes in the estimate of the derivative of the height – the vertical speed of the aircraft according to the algorithm (2), and in Fig. 4 according to algorithm (8). In this case, naturally, it was assumed that  $x(\tau)=h(\tau)$ .

Apparently from Figs. 3 and 4 the availability of sinusoidal component in regular part of signal is rather distinctly monitored by both algorithms. It indicates rather high speed of both algorithms. The accidental component as it is visible from Figs. 3 and 4, affects result of assessment on algorithm (8), than on algorithm (2) much less that confirms significant efficiency of algorithm (8). Therefore as a part of algorithmic providing SVS it is more preferable to use algorithm (8), but not algorithm (2).

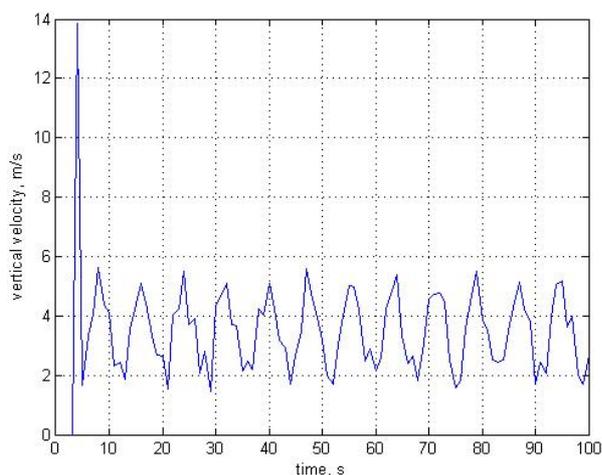


Fig. 3. Results of calculating the vertical speed by the algorithm (2)

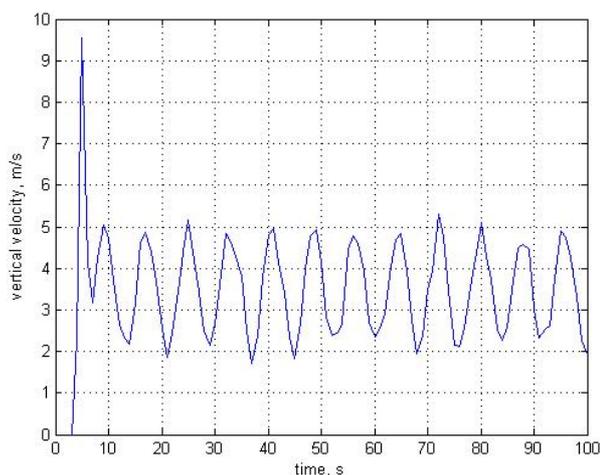


Fig. 4. Results of calculating the vertical speed by the algorithm (8)

Joint schedules of change of estimates of derivative on algorithm (2) – continuous and on algorithm (8) – dash-dotted curves when the sinusoidal component, i. e. for case is excluded from regular part of signal of height are provided on Fig. 5  $h(\tau)=h(0)+3.5\times\tau$  and in this case the noticeable efficiency of algorithm is visible (8).

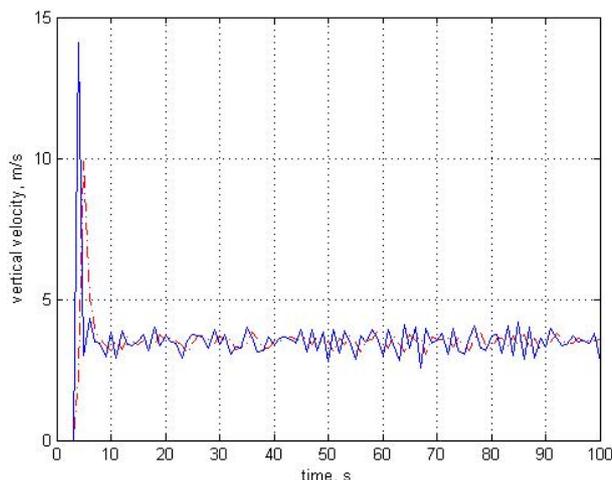


Fig. 5. Changing Derivative Estimates

In all cases the big errors of assessment at the beginning of curves are explained by availability of transitional component in work of algorithms.

#### Preliminary filtration of signal of height

As is well-known [2, 3] error of calculation of derivative has two components: 1) computing error – the error caused by rounding and representation of values of signal in the computer; 2) the error con-

nected with signal measurement errors (errors of basic data). It is known also that if influence of the second component is not too big and if the useful component of signal not too quickly changes (“...behaves ‘rather well’” [8], then dot algorithms of differentiation yield almost acceptable results. Otherwise it is necessary to use special approaches to the solution of problem, in particular, of the procedure of preliminary smoothing [18], recommend to use also algorithms of preliminary filtration of signal of height. In this regard we will consider question of creation of such algorithm.

We will consider problem of preliminary filtration as the following problem of optimization [19]:

$$\psi_1(h_i - h_i^\Phi)^2 + \psi_2(h_i^\Phi - h_{i-1}^\Phi)^2 \rightarrow \min_{h_i^\Phi}, \quad (9)$$

where  $h_i$  – measured signal value in  $i$ -ty moment (counting),  $h_i^\Phi$  – evaluation of the useful signal for  $i$ -th point in time (filter output),  $\psi_1$  and  $\psi_2$  – weight coefficients.

Solving this problem of optimization, have established that optimum assessment of useful signal has to be determined by the following formula:

$$h_i^\Phi = \frac{\psi_1 h_i + \psi_2 h_{i-1}^\Phi}{\psi_1 + \psi_2}. \quad (10)$$

At such value  $h_i^\Phi$  the minimum of criterion (9) as the second derivative calculated in this point is equal is really reached  $2\psi_1 + 2\psi_2 > 0$ .

Sometimes for realization to write down conveniently this ratio in the following look:

$$h_i^\Phi = h_{i-1}^\Phi + \frac{\psi_1}{\psi_1 + \psi_2} (h_i - h_{i-1}^\Phi). \quad (11)$$

Apparently from the last equation if the signal has not changed for period between  $(i-1)$ -th and  $i$ -m the moments, then estimates  $h_i^\Phi$  and  $h_{i-1}^\Phi$  will coincide. Besides, we will note that reduction  $\psi_1$  and increase  $\psi_2$  leads to strengthening of the filtering properties of algorithm. It is explained by the fact that the component  $\psi_2(h_i^\Phi - h_{i-1}^\Phi)^2$  of criterion (9) sets proximity of the next estimates.

It is generally recommended concrete values  $\psi_1$  and  $\psi_2$  to select, proceeding from real statistical situation on subject to control. To the place we will notice that this algorithm of filtration is quite successfully approved in works [20–22].

Let's note also that the algorithm (11) can be presented also in the following form:

$$h_i^\Phi = \frac{\psi_1}{\psi_1 + \psi_2} h_i + \left(1 - \frac{\psi_1}{\psi_1 + \psi_2}\right) h_{i-1}^\Phi = \left| K = \frac{\psi_1}{\psi_1 + \psi_2} \right| = K h_i + (1 - K) h_{i-1}^\Phi. \quad (12)$$

It representations is most characteristic of the algorithms of filtration developed with use of approach of Kallman [18, 23], only in this case the optimum value of coefficient of Kallman  $K$  is found from the solution of the following problem of optimization:

$$M\{e_i^2\} = M\{(h_i^H - h_i^\Phi)^2\} \rightarrow \min_K, \quad (13)$$

i. e. the expected value of square of mistake – the difference between the output of the filter and true value of the measured quantity is minimized  $h_i^H$ . At the same time it should be noted that in task (13) structure of algorithm of filtration – the ratio (12) is set a priori, only the optimum value of coefficient of Kallman is found. Solving problem (9), we, on the contrary, find optimum structure of algorithm of filtration which as it is shown, coincides with that structure which a priori is accepted in Kallman's tasks.

Results of assessment of vertical velocity for conditions of Fig. 1 at additional use of the offered filter (11) are given in Figs. 6 and 7. Setup of the filter coefficient of Kallman in both cases it is equal  $K = 0.2$ .

Apparently from Figs. 6 and 7 the filtration significantly increases the accuracy of assessment both on the simplest point-to-point algorithm (2), and on the offered algorithm (8), oscillation frequency in both cases has considerably decreased. Thus, the algorithm (11) has the noticeable filtering properties, on temporary sign it should be carried to algorithm of the late estimation [20–22] that is quite explainable as the algorithm on characteristics is close to inertial link of the first order (exponential smoothing of the first order) [24].

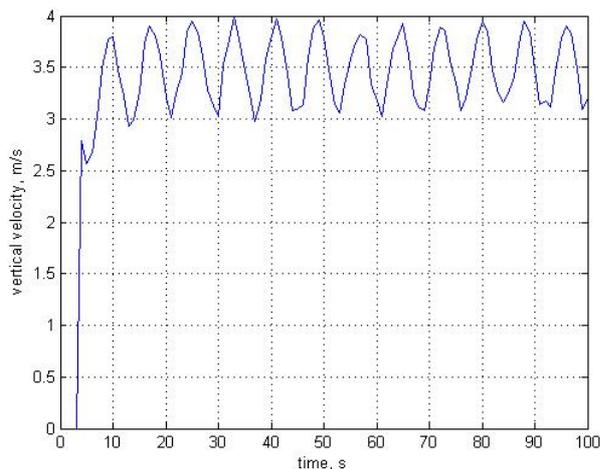


Fig. 6. Estimation of aircraft vertical speed according to algorithm (2) with preliminary filtering of the altitude signal

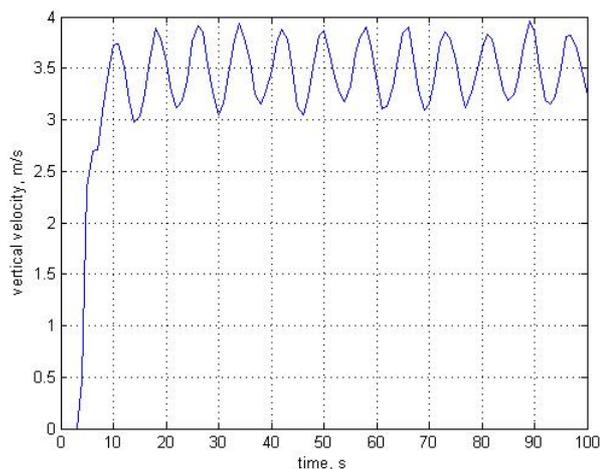


Fig. 7. Estimation of aircraft vertical speed using algorithm (8) with preliminary filtering of the altitude signal

Indeed, the operation of the algorithm can be represented as follows. Let experimental information  $h(\tau)$  is fed to the input of the inertial link of the 1st order, and the output value of such a link is the current estimate of the useful signal – the filter output  $h^\phi(\tau)$  (Fig. 8). Here  $p$  – the operator of differentiation.

Then [24] differential equation connecting entrance and output sizes will have appearance:

$$\begin{array}{c}
 h(\tau) \rightarrow \left[ \frac{1}{Tp + 1} \right] \rightarrow h^\phi(\tau) \\
 \end{array}
 \quad
 T \frac{d h_i^\phi(\tau)}{d\tau} + h_i^\phi(\tau) = h_i(\tau). \quad (14)$$

Fig. 8. The signal processing unit

Here  $T$  – constant of time of inertial link. It is known that finite difference approximation of this equation can be written down as follows:

$$T \frac{h_i^\phi - h_{i-1}^\phi}{\Delta\tau} + h_i^\phi = h_i. \quad (15)$$

Further, it is easy to rewrite the equation (15) in the look similar to the equation (11)

$$h_i^\phi = h_{i-1}^\phi + \frac{\Delta\tau}{T + \Delta\tau} (h_i - h_{i-1}^\phi). \quad (16)$$

Comparing equations (11) and (16), we can conclude that the parameter  $\psi_1$  can be interpreted as a discreteness interval  $\Delta\tau$ , and the parameter  $\psi_2$  as a link time constant  $T$ . Therefore, it becomes extremely clear that decreasing  $\psi_1$  and increasing  $\psi_2$  (time constant) leads to an increase in the filtering properties of the algorithm. The deviation of the estimates obtained from its true values decreases markedly. In our calculations, it was always possible to bring this deviation to an acceptable value due to the filtering algorithm settings (by choosing  $\psi_1$  and  $\psi_2$ ). Thus, the use of algorithms (8) and (11) makes it possible to obtain a completely efficient procedure for estimating the aircraft vertical speed.

### Conclusions

The algorithm of numerical differentiation differing in small computing complexity and essential bigger accuracy than the point-to-point algorithm used in algorithmic providing SVS is offered and approved. The algorithm is complemented with the procedure of preliminary filtration of signal of barometric height of VS, the algorithm of filtration is the solution of problem of optimization on assessment of useful signal by results of measurements. Results of work are recommended for use when developing algorithmic providing SVS of aircraft.

### References

1. Panferov V.I., Trenin N.A., Hayutin A.M. *Aviatsionnyye pribory i pilotazhno-navigatsionnyye kompleksy: uchebnoye posobiye: v 3 ch. Ch. I*. [Aircraft instruments and flight-navigation complexes: A manual in 3 parts. Part I]. Chelyabinsk, Branch of VUZS VVS Air Force Publ., 2018. 145 p.
2. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 284 p.
3. Tikhonov A.N., Goncharsky A.V., Stepanov V.V., Yagola A.G. *Chislennyye metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Numerical methods for solving ill-posed problems]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 227 p.
4. Vasin V.V. [Stable calculation of the derivative in space  $C(-\infty, \infty)$ ]. *Computational mathematics and mathematical physics*, 1973, vol. 13, no. 6, pp. 1383–1389. (in Russ.)
5. Skorik G.G. *Nailuchshiy otsenki v metodakh approksimatsii proizvodnykh funktsii, zadannoy s pogreshnost'yu. Avtoref. kand. diss.* [The best estimates in methods of approximation of the derivatives of a function given with an error. Abstract of cand. diss.]. Ekaterinburg, 2006. 15 p.
6. Glinchenko A.S. *Tsifrovaya obrabotka signalov: uchebnoye posobiye: v 2 ch. Ch. I*. [Digital Signal Processing: Tutorial in 2 parts. Part 1]. Krasnoyarsk, KSTU Publishing House, 2001. 199 p.
7. Maystrenko, A.V. *Sintez, issledovaniye i primeneniye algoritmov tsifrovogo differentsirovaniya signalov v sistemakh avtomaticheskogo regulirovaniya protsessov. Avtoref. kand. diss.* [Synthesis, research and application of algorithms for digital differentiation of signals in systems for automatic control of processes. Abstract of cand. diss.]. Tomsk, 2007. 21 p.
8. Maystrenko A.V., Svetlakov A.A., Starovoitov N.V. [Digital differentiation of signals using multipoint methods in automatic control systems of processes]. *Doklady TUSUR*, 2009, no. 2 (20), pp. 83–88. (in Russ.)
9. Fedotov Z.N., Kuvshinov S.I., Lebedev V.V. et al.; Dorofeyev S.S. (Ed.) *Aviatsionnyye pribory: uchebnyk* [Aviation devices: Textbook]. Moscow, Voenizdat, 1992. 323 p.
10. Cheng J., Jia X.Z., Wang Y.B. Numerical differentiation and applications. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2007, vol. 15, pp. 339–357.
11. Bezuglov D.A., Krutov V.A., Shvachko O. V. [Method of signal differentiation using spline approximation]. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2017, no. 4, pp. 24–28. (in Russ.)
12. Maystrenko A.V., Svetlakov A.A., Garganeyev A.G. [Digital differentiation of signals using Volterra integral equations and its application for modeling control and monitoring systems in power electronics]. *Energoberezheniye, energetika, energoaudit*, 2013, vol. 1, no. 8 (14), pp. 111–116. (in Russ.)
13. Sozonova T.N. *Razrabotka algoritmov chislennogo differentsirovaniya i interpolatsii signalov na osnove chastotnykh predstavleniy. Avtoref. kand. diss.* [Development of algorithms for numerical differentiation and interpolation of signals based on frequency representations. Abstract of cand. diss.]. Belgorod, 2008. 18 p.
14. Garmaev B.Z., Boronoev V.V. [Numerical differentiation of biometric signals using wavelet transform]. *Journal of Radio Electronics: electronic journal*, 2017, no. 2, pp. 1–11. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/9/text.pdf>. (in Russ.)
15. Efremova E.S. *Informatsionno-izmeritel'naya sistema vozdukhnykh signalov dozvukovogo letatel'nogo apparata na osnove vikhrevoogo metoda. Dis. kand. tekhn. nauk.* [Information-measuring system of air signals of a subsonic aircraft based on the vortex method. Cand. sci. diss.]. Kazan, 2020. 207 p.
16. Martynov E.V., Potapov A.A., Kolchin A.V. *Sposob opredeleniya vertikal'noy skorosti ob'yekta i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* [Method for determining the vertical speed of an object and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2059252 C1, 1996.
17. Efimov I.P. *Aviatsionnyye pribory: uchebnoye posobiye* [Aviation devices: textbook]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2018. 255 p.
18. Kalman R.E., Koepcke R.W. Optimal synthesis of linear sampling control systems using generalized performance indexes. *Trans. ASME*, 1958, vol. 80, pp. 1820–1826.
19. Panferov V.I., Trenin N.A., Panferov S.V., Hayutin A.M., Cherepanov S.I. [To the solution of the problem of calculating the vertical speed of an aircraft in the air signal system]. *Voyennyi nauchno-prakticheskiy vestnik*, 2019, no. 1 (10), pp. 64–69. (in Russ.)

20. Panferov S.V., Panferov V.I. Adaptive Identification of Parameters for Heating Systems in Buildings. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 33–38. (in Russ.)

21. Panferov V.I., Nagornaya A.N., Kungurtseva Yu.V. Solution to the Problem of Dynamic Mathematical Model of Heating Appliances and Systems Development. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*, 2012, iss. 15, no. 38 (297), pp. 46–49. (in Russ.)

22. Panferov S.V., Panferov V.I. [Adaptive identification of the mathematical model of the thermal regime of buildings]. *Matematicheskoye i programmnoye obespecheniye sistem v promyshlennoy i sotsial'noy sferakh*, 2013, no. 1, pp. 6–11. (in Russ.)

23. Kalman R.E. *Ocherki po matematicheskoy teorii sistem* [Essays on the mathematical theory of systems]. Moscow, Mir Publ., 1971. 400 p.

24. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T.1. Lineynyye sistemy*. [Automatic control theory. Vol. 1. Linear systems]. Moscow, Fizmatlit, 2003. 288 p.

Received 16 March 2020

УДК 629.7.054.44

DOI: 10.14529/ctcr210205

## ОБ ОДНОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ЧИСЛЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО СУДНА

В.И. Панферов<sup>1, 2</sup>, С.В. Панферов<sup>2</sup>, А.М. Хяютин<sup>1</sup>, Н.А. Тренин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Для обеспечения безопасности и повышения эффективности отработки полетных заданий необходима достоверная информация о высотно-скоростных параметрах воздушного судна (ВС). Поэтому совершенствование алгоритма вычисления вертикальной скорости, используемого в составе алгоритмического обеспечения систем воздушных сигналов (СВС), является вполне актуальной задачей. **Цель исследования.** Рассматривается задача вычисления вертикальной скорости воздушного судна в СВС. **Материалы и методы.** Проведен анализ литературных данных по использованию процедур численного дифференцирования для решения этой проблемы, отмечено, что используемые методы базируются на различных идеях и подходах. Указано, что двухточечные алгоритмы существенно хуже многоточечных по достигаемой точности, однако характеризуются существенной простотой и быстродействием. Используются различные варианты многоточечных алгоритмов, различающихся сложностью, объемом используемой информации, достигаемой точностью. Отмечены особенности регуляризирующих алгоритмов, представляющих, по существу, фильтры низкочастотного полезного сигнала, подавляющие высокочастотную составляющую погрешности измерения сигнала высоты или, что то же самое, атмосферного давления. Приведены данные по системам с аппаратным дифференцированием сигнала высоты. **Результаты.** Предложен и обоснован достаточно простой четырехточечный алгоритм численного дифференцирования. Из-за усреднения как самих результатов измерения, так и оценок производных реализуется существенная фильтрация помех, что является важным достоинством алгоритма. Для большей точности оценки вертикальной скорости предусматривается включение в схему обработки экспериментальных данных еще и алгоритма предварительной фильтрации. Алгоритм фильтрации найден из решения задачи оптимизации; показано, что данный алгоритм по структуре аналогичен алгоритмам фильтрации, построенным согласно известным подходам Р. Калмана. Приводятся результаты вычислительных экспериментов по исследованию особенностей и характеристик

предлагаемых алгоритмов, иллюстрирующие их преимущества, работоспособность и возможность дальнейшего использования в СВС. Показано, что предварительная фильтрация существенно повышает точность оценки вертикальной скорости. **Заключение.** Разработанные алгоритмы могут быть использованы при совершенствовании алгоритмического обеспечения СВС.

*Ключевые слова:* вертикальная скорость, воздушное судно, система воздушных сигналов, численное дифференцирование, высота, атмосферное давление, многоточечные алгоритмы, предварительная фильтрация, точность оценки.

### Литература

1. Панферов, В.И. *Авиационные приборы и пилотажно-навигационные комплексы: учеб. пособие: в 3 ч.* / В.И. Панферов, Н.А. Тренин, А.М. Хаяутин. – Челябинск: Филиал ВУНЦ ВВС «ВВА», 2018. – Ч. I. – 145 с.
2. Тихонов, А.Н. *Методы решения некорректных задач* / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. – 284 с.
3. Численные методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, А.В. Гончарский, В.В. Степанов, А.Г. Ягола. – М.: Наука, 1990. – 227 с.
4. Васин, В.В. *Об устойчивом вычислении производной в пространстве  $C(-\infty, \infty)$*  / В.В. Васин // *Вычислительная математика и математическая физика.* – 1973. – Т. 13, № 6. – С. 1383–1389.
5. Скорик, Г.Г. *Наилучшие оценки в методах аппроксимации производных функции, заданной с погрешностью: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук* / Г.Г. Скорик. – Екатеринбург: УрГУ им. А.М. Горького, 2006. – 15 с.
6. Глинченко, А.С. *Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие: в 2 ч.* / А.С. Глинченко. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. – Ч. I. – 199 с.
7. Майстренко, А.В. *Синтез, исследование и применение алгоритмов цифрового дифференцирования сигналов в системах автоматического регулирования процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / А.В. Майстренко. – Томск: Изд-во ТУСУР, 2007. – 21 с.
8. Майстренко, А.В. *Цифровое дифференцирование сигналов с применением многоточечных методов в системах автоматического регулирования процессов* / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, Н.В. Старовойтов // *Доклады ТУСУР.* – 2009. – № 2 (20). – С. 83–88.
9. *Авиационные приборы: учеб.* / З.Н. Федотов, С.И. Кувишинов, В.В. Лебедев и др.; под ред. С.С. Дорофеева. – М.: Воениздат, 1992. – 323 с.
10. Cheng, J. *Numerical differentiation and applications* / J. Cheng, X.Z. Jia, Y.B. Wang // *Inverse Problems in Science and Engineering.* – 2007. – Vol. 15. – P. 339–357.
11. Безуглов, Д.А. *Метод дифференцирования сигналов с использованием сплайн-аппроксимации* / Д.А. Безуглов, В.А. Крутов, О.В. Швачко // *Фундаментальные исследования.* – 2017. – № 4 – С. 24–28.
12. Майстренко, А.В. *Цифровое дифференцирование сигналов с использованием интегральных уравнений Вольтерра и его применение для моделирования систем управления и контроля в силовой электронике* / А.В. Майстренко, А.А. Светлаков, А.Г. Гарганеев // *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит.* – 2013. – Т. 1, № 8 (14). – С. 111–116.
13. Созонова, Т.Н. *Разработка алгоритмов численного дифференцирования и интерполяции сигналов на основе частотных представлений: автореф. дис. ... канд. техн. наук* / Т.Н. Созонова. – Белгород: Изд-во БелГУ, 2008. – 18 с.
14. Гармаев, Б.З. *Численное дифференцирование биометрических сигналов с помощью вейвлет-преобразования* / Б.З. Гармаев, В.В. Бороноев // *Журнал радиоэлектроники [электрон. журн.].* – 2017. – № 2. – С. 1–11. – <http://jre.cplire.ru/jre/feb17/9/text.pdf>.
15. Ефремова, Е.С. *Информационно-измерительная система воздушных сигналов дозвукового летательного аппарата на основе вихревого метода: дис. ... канд. техн. наук* / Е.С. Ефремова. – Казань: КазНИТУ им. А.Н. Туполева – КАИ, 2020. – 207 с.
16. Пат. 2059252 С1 Российская Федерация. *Способ определения вертикальной скорости объекта и устройство для его осуществления* / Е.В. Мартынов, А.А. Потапов, А.В. Колчин; заявитель и правообладатель Казанский гос. техн. ун-т. – № 93038254/28; заявл. 09.07.1993; опубл. 24.07.1996, Бюл. № 12. – 10 с.

17. Ефимов, И.П. *Авиационные приборы: учеб. пособие* / И.П. Ефимов. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. – 255 с.

18. Kalman, R.E. *Optimal synthesis of linear sampling control systems using generalized performance indexes* / R.E. Kalman, R.W. Coe // *Trans. ASME*. – 1958. – Vol. 80. – P. 1820–1826.

19. К решению задачи о вычислении вертикальной скорости воздушного судна в системе воздушных сигналов / В.И. Панферов, Н.А. Тренин, С.В. Панферов и др. // *Военный научно-практический вестник*. – 2019. – № 1 (10). – С. 64–69.

20. Панферов, С.В. *Адаптивная идентификация параметров систем отопления зданий* / С.В. Панферов, В.И. Панферов // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 33–38.

21. Панферов, В.И. *Об одном решении задачи построения динамической математической модели отопительных приборов и систем* / В.И. Панферов, А.Н. Нагорная, Ю.В. Кунгурцева // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. – 2012. – Вып. 15, № 38 (297). – С. 46–49.

22. Панферов, С.В. *Адаптивная идентификация математической модели теплового режима зданий* / С.В. Панферов, В.И. Панферов // *Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах* – 2013. – № 1. – С. 6–11.

23. Калман, Р.Е. *Очерки по математической теории систем*. – М.: Мир, 1971. – 400 с.

24. Ким, Д.П. *Теория автоматического управления. Т. 1: Линейные системы* / Д.П. Ким. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.

**Панферов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске; профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

**Панферов Сергей Владимирович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры градостроительства, инженерных сетей и систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск.

**Хяютин Андрей Михайлович**, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

**Тренин Николай Александрович**, канд. воен. наук, начальник кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск.

*Поступила в редакцию 16 марта 2020 г.*

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

On One Solution of the Numerical Problem Differentiation in Calculation Vertical Speed of Aircraft / V.I. Panferov, S.V. Panferov, A.M. Hayutin, N.A. Trenin // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 47–57. DOI: 10.14529/ctcr210205

#### FOR CITATION

Panferov V.I., Panferov S.V., Hayutin A.M., Trenin N.A. On One Solution of the Numerical Problem Differentiation in Calculation Vertical Speed of Aircraft. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 47–57. DOI: 10.14529/ctcr210205

# Управление в социально-экономических системах

УДК 330.322; 303.725.34

DOI: 10.14529/ctcr210206

## ПРОГРАММНЫЙ И ПРОЕКТНЫЙ ПОДХОДЫ ПРИ РЕШЕНИИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Я.Д. Гельруд<sup>1</sup>, Е.Б. Кибалов<sup>2</sup>, В.Ю. Малов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

В статье рассматривается федеральная программа «Экология Ангаро-Енисейского региона». Дано описание системного синтеза разных подходов к оценке программы восстановления и сохранения природного комплекса Енисея как скелетной основы эколого-ассимиляционного потенциала Ангаро-Енисейского региона. Обосновывается необходимость учёта фактора неопределенности при оценке крупномасштабных экологических проектов. **Цель исследования.** Показать, что эффекты, оказываемые крупномасштабными проектами, влияют на сам сценарий развития экономики, в этой связи некорректно использовать примитивное интегрирование альтернативы (стратегии) в один и тот же сценарий, показано, что необходимо оценивать соотношения «проект – сценарий». **Материалы и методы.** Авторами предлагается для оценки крупномасштабных проектов использовать три уровня оценки: макроуровень, мезоуровень и микроуровень. Такая классификация позволяет постепенно снижать уровень неопределенности. Информация, полученная на предыдущем уровне оценки, является исходной для нижестоящего уровня. **Результаты.** На первом этапе суждения экспертов обрабатывались с помощью компьютерных продуктов, разработанных в ИЭОПП. На втором шаге был проанализирован Национальный проект «Экология России» в составе 11 федеральных проектов, была разработана математическая модель многокритериальной задачи оптимального управления затратами проекта с учётом фактора неопределенности. Результатом третьего шага стало создание гибридной модели оценки крупномасштабных экологических проектов из логико-эвристической модели, базирующейся на экспертной информации, и экономико-математической модели. Аналоги подобных моделей, созданные с участием авторов, работают при оценке крупномасштабных железнодорожных проектов. Имеется в виду семейство полудинамических оптимизационных моделей, в разной степени апробированное при решении задач мезоуровня, как в плановой, так и в рыночной экономиках. Более того, на базе одной из версий этого семейства разработана медико-эколого-экономическая модель и с ее помощью осуществлен сценарный анализ развития субъектов Азиатской части России. **Заключение.** В статье даётся краткое описание функциональности и необходимости использования соответствующих математических и программных средств по мере продвижения этапов крупномасштабных экологических проектов от замысла до воплощения.

*Ключевые слова:* Ангаро-Енисейский регион, неосистемный подход, неоклассический мейнстрим, оптимизационные межрегиональные межотраслевые модели.

### Введение

В отличие от канонов традиционного системного анализа и сценарного подхода мы рассматриваем крупномасштабные экологические проблемы не только как межотраслевые и межрегиональные внутрироссийские, но на более высоком уровне общности, следуя установкам системной парадигмы Я. Корнаи [1]. Суть парадигмы в том, что крупномасштабные многоаспектные проблемы и средства их решения – программы и проекты – должны рассматриваться в различных парадигмах в спектре «марксизм – неоклассический мейнстрим», а выводы о предпочтительных способах решения проблем следует делать с максимальной осторожностью, принимая во

внимание фактор неопределенности последствий, определяемых нередко ошибочно. В рамках указанной парадигмы традиционный системный анализ трансформируется в так называемый неосистемный подход [2], который с точки зрения научного содержания не только отличается широтой охвата рассматриваемых явлений от своего предшественника, но и структурой исследовательского инструментария. А именно: главным инструментом анализа сложных экологических проблем и синтеза вариантов их решения становятся логико-эвристические модели, информационно опирающиеся на суждения экспертов, а модели экономико-математические, использующие преимущественно статистическую информацию, остаются в арсенале ученых, но занимают более скромное место, чем это было в парадигме неоклассического мэйнстрима со времен Кейнса.

### 1. Конкретизация общей постановки

Опираясь на вышесказанное, предлагается обосновать, разработать и реализовать федеральную реконвалесцентную (лечебную) программу с условным названием «Экология Ангаро-Енисейского региона (АЕР)», действуя при этом как опытный врач в соответствии с принципом «не навреди». Действительно, каким бы несовершенным ни был действующий ныне механизм функционирования и развития АЕР, это работающий условно обособленный блок в составе РФ, и его излечение от экологических недугов должно происходить без потери эффективности реально работающей системы, тем более в ситуации значимости процессов, происходящих в современном мире, таких как обострение противоречий между крупнейшими мировыми державами, усиление борьбы за ресурсы, территории, рынки и умонастроения, стремление к лидерству в сфере военных, промышленных и информационных технологий.

Стратегическим коридором для проведения мероприятий предлагаемой программы стал Указ Президента В.В. Путина «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» [3], в котором фиксировалась катастрофическая экологическая ситуация в России по состоянию на 2017 г. Территории концентрации экологического неблагополучия России в нем не назывались, но всем исполнительным органам государственной власти предписывалось экологическую безопасность понимать как часть национальной безопасности страны и принять участие в разработке стратегии, направленной на реализацию государственной политики в сфере обеспечения экологической безопасности на федеральном, региональном, муниципальном и отраслевом уровнях.

Естественно, прежде всего возник вопрос о целевых установках программы «Экология АЕР» в рамках «президентского» стратегического коридора, т. е. при привязке ее мероприятий к месту, времени и ресурсному обеспечению. Таких установок было обозначено три.

1. Продолжение исторически сложившейся политики государства: назовем ее политикой *проектного* регулирования экологической ситуации в АЕР.

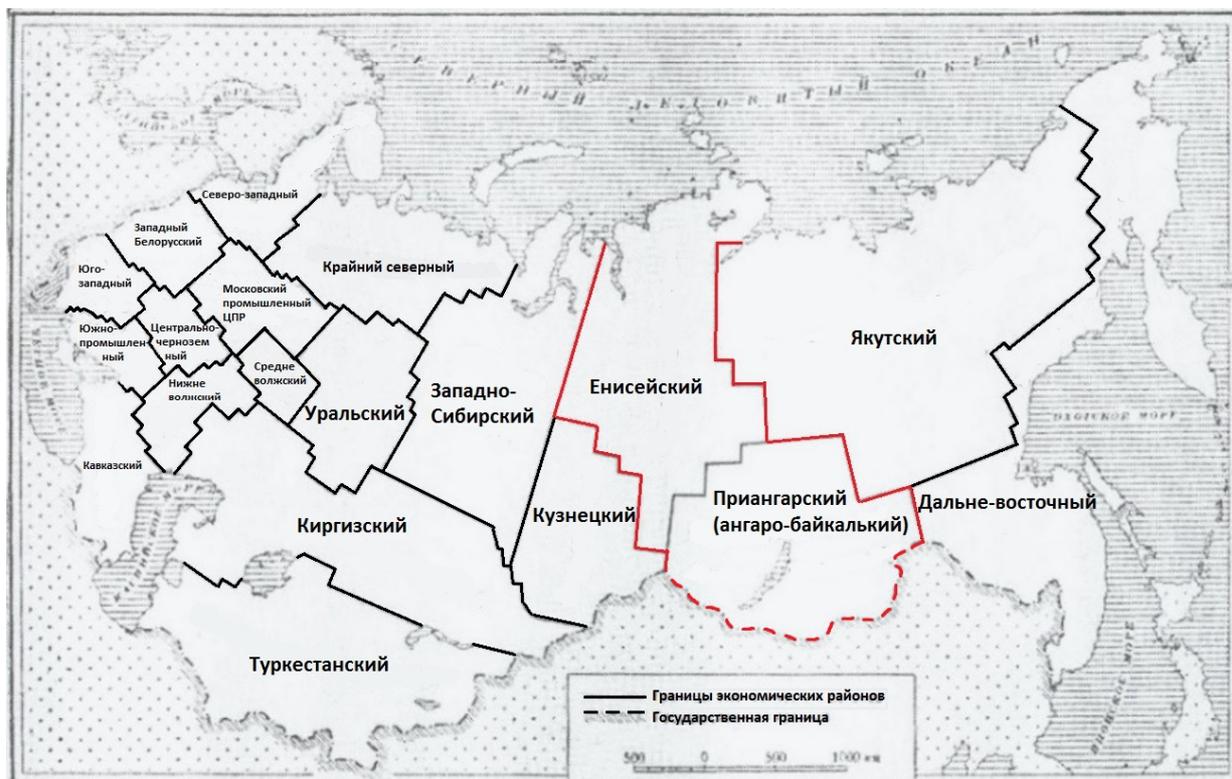
2. Максимально возможное восстановление эколого-ассимиляционного потенциала АЕР, многие годы разрушавшегося в процессе индустриального развития сложно построенного региона; назовем такую установку *программной*.

3. Компромиссная установка, учитывающая реальные ресурсные ограничения страны в современных условиях, неблагоприятных для ее устойчивого развития; назовем такую установку реконвалесцентной (лечащего типа).

Перечисленные установки и реализующие их проекты по необходимости должны быть ранжированы по степени предпочтительности в трех сценариях-контрастах, воздействующих на конфигурацию «президентского» коридора под влиянием меняющихся характеристик внешней среды: внутрироссийской и мирохозяйственной в аспектах политическом, экономическом и военно-стратегическом.

### 2. Решение проблемы: первый шаг

Была создана группа экспертов в составе специалистов ИЭОПП СО РАН, СГУПС Росжелдора, Красноярского научного центра СО РАН и представителей зарубежной науки. Суждения экспертов выявлялись методами анкетирования и личных интервью (рис. 1, анкета) и обрабатывались с помощью компьютерных продуктов, разработанных в ИЭОПП и СГУПС.



**Рис. 1. Карта-схема Ангаро-Енисейского региона в исследованиях по плану ГОЭЛРО (1920 г.)**  
**Fig. 1. Map-scheme of the Angara-Yenisei region in studies according to the GOELRO plan (1920)**

Источник: Труды государственной комиссии по электрификации России – ГОЭЛРО – Документы и материалы. М.: Изд-во социал.-экон. лит., 1960. С. 102.

Одновременно как следствие векового крупномасштабного промышленного освоения без должных экологических ограничений первозданный природный комплекс АЕР к настоящему времени основательно разрушен во всех его частях, начиная с верховий Енисея (Ангарск, Усолье-Сибирское), его срединной части (Нижнее Приангарье и оз. Байкал), низовий (Норильск), и ситуация находится на грани катастрофической.

В мире также имеет место обострение экологических проблем и императивом становится развитие с акцентом на сохранение природного комплекса как элемента национальной безопасности страны. В России такое понимание декларируется, но практически делается очень мало.

С учетом сказанного просим, обратившись к таблице, в порядковой шкале оценить возможные стратегии решения экологической проблемы АЕР в сценариях-контрастах развития России на временном интервале 2021–2040 гг.

**Таблица**

Экологические программы АЕР (альтернативы)	Сценарии развития России		
	1. Оптимистический	2. Пессимистический	3. Наиболее вероятный
1. Продолжать политику проектного регулирования экологической проблемы АЕР (А1)	3	1	3
2. Реализовать крупномасштабную программу полного восстановления эколого-ассимиляционного потенциала АЕР (А2)	1	3	2
3. Разработать и принять реконвалесцентную программу решения экологической проблемы АЕР (А3)	2	2	1

Пример заполнения экспертом таблицы.

1. Если эксперт считает, что в оптимистическом сценарии 1 развития России стратегия 2 наиболее предпочтительна, то в клетке таблицы на пересечении столбца 1 и строки 2 он ставит цифру 1. Если в том же сценарии следующей по предпочтительности эксперт считает стратегию 3, то на пересечении столбца 1 и строки 3 он ставит цифру 2. Естественно, на пересечении 1–1 ставится цифра 3.

2. Процедура повторяется для всех остальных клеток таблицы.

3. Ранжируйте Сценарии развития России по возможности их актуализации, поставив цифру 1 под названием сценария в таблице, если этот сценарий, по вашему мнению, наиболее достоверен; цифру 2 – второму по достоверности и цифру 3 – третьему.

В результате обработки анкет специально разработанными компьютерными продуктами была получена следующая Оценочная матрица (табл. 1).

Оценочная матрица

Таблица 1

Evaluation matrix

Table 1

Альтернативы	Сценарии		
	1	2	3
<b>A1</b>	0,01	0,56	0,21
<b>A2</b>	0,81	0,13	0,07
<b>A3</b>	0,19	0,32	0,71
<i>Вероятности сценариев</i>	0,11	0,38	0,52

В табл. 1 нет доминирующей альтернативы (программы), следовательно, имеет место неопределенность, которая вскрывается с помощью критериев Вальда, Сэвиджа, Гурвица и Лапласа (табл. 2).

Критерии оценки альтернатив

Таблица 2

Criteria for evaluating alternatives

Table 2

Альтернативы	Критерии					
	Вальда	Сэвиджа	Гурвица	Байеса	Лапласа	максимакса
<b>A1</b>						
<b>A2</b>						*
<b>A3</b>	*	*	*	*	*	

Из табл. 2 видно, что предпочтительной по всем критериям, кроме максимакса, является альтернатива А3 – «Разработать и принять реконвалесцентную программу решения экологической проблемы АЕР» (отмечена символом \*). Остается уточнить, что стоит за понятием реконвалесцентная программа применительно к интересующему нас случаю.

Комментируя полученный результат, коротко остановимся на его стратегическом аспекте. Ангаро-Енисейский регион рассматривается нами не только и не столько как система для решения ресурсных проблем страны, т. е. утилитарно [4], но и как один из четырех базовых природных кластеров Сибири и Дальнего Востока, фундамирующих российскую цивилизацию как гуманитарный феномен Российской Азии. Эти кластеры дислоцированы на территориях водосбора Оби, Енисея, Лены и Амура и в совокупности образуют фундамент эколого-ассимиляционного потенциала Зауралья. Его деградация опасна как в краткосрочной, так и долгосрочной перспективах, поскольку владение им является стратегическим преимуществом России в конкурентном, турбулентно развивающемся мире XXI века. Сохранению указанного преимущества, собственно, и посвящена настоящая статья, и первый шаг по анкетированию группы экспертов, описанный выше в рамках методологии неосистемного подхода, отвечает на вопрос «ЧТО?» применительно к АЕР. Тем самым раскрывается верхний слой радикальной (невероятной) неопределенности, а исходная проблемная ситуация из не-структурированной превращается в слабоструктурированную [5].

### 3. Решение проблемы: второй шаг

Будем различать проектный и программный подходы к решению любых сложных и крупномасштабных проблем. Отечественная хозяйственная практика, а также, к сожалению, нередко и наука эти подходы не различают, что приводит к не адекватному сложности проблемы выбору средств ее решения. Без малого четверть века тому назад об этом писал М.В. Рац [6], но, к сожалению, не был услышан «младореформаторами», ратовавшими в то время за «Россию регионов». В этой пионерной публикации было указано на решающее различие проектного и программного подходов: первый ввиду холистской своей природы в принципе не годится для оценки крупномасштабных комплексных программ, при оценке которых «слишком велик элемент неопределенности».

Экология АЕР, на наш взгляд, является типичным примером такого рода. Действительно, после экологических перипетий этого (2020) года в норильской тундре Госдума РФ готовит решения, как более эффективно делить средства на компенсацию экологических ущербов, полученных государст-

вом от Норникеля и аффилированных с ним структур-разрушителей природного комплекса низовий Енисея. С точки зрения проектного подхода все правильно: нанес государству-собственнику водных ресурсов ущерб, локализованный по месту и времени, плати государству как пострадавшей стороне. Однако открытым остается вопрос: как государство распределит полученную компенсацию между многочисленными очагами техногенных травм, нанесенных природе в разных регионах страны? Все отдаст, например, на восстановление водных объектов Нижней Волги или Байкала вместе с Ангарой и питающими озеро реками? И как взвесит текущие выгоды от «правильной» распределительной политики с долгосрочными последствиями решений, принятых «здесь и сейчас»? Проектный подход ответов на такие вопросы не дает (см., например, [7]), поскольку по своей природе локален. Цели любых проектов по определению жестко фиксированы, так же как и продолжительность их жизненных циклов. В то время как продолжительность жизненных циклов природных комплексов вроде АЕР, образовавшихся эволюционно вокруг рек, можно считать бесконечной. Для таких объектов, опять же по определению, адекватным средством решения экологических проблем является *программа*, цели которой могут ситуативно меняться, а продолжительность жизненного цикла, как правило, не оговаривается, она тоже может изменяться по обстоятельствам.

Рациональная логика подсказывает, что подходы следует согласованно сочетать, но как: под эгидой государства как активного актора проведения социальной и природосберегающей политики, или государства – «ночного сторожа», поведение которого рыночно эффективно, но нередко антисоциально и антиэкологично? История показывает, что выбор точки компромисса зависит от эффективности хозяйственно-политического механизма функционирования и развития конкретного государства. Чем мощнее этот механизм, построенный на конкуренции всех со всем, тем проектный подход как инструмент решения социальных и экологических проблем децентрализованного государства более соответствует его интересам и возможностям. Если же речь (подчеркнем: при прочих равных) идет о слабой экономике централизованного государства, то лучшим выбором является программный подход, в рамках которого государство имеет возможность концентрировать ограниченные ресурсы на ситуационно приоритетных целях.

Под таким углом зрения на втором шаге нами был проанализирован Национальный проект «Экология России» (далее – НПЭР) в составе 11 федеральных проектов [8]. Из самих названий экологических мероприятий следует, что они будут проводиться в рамках проектного подхода. Это означает (с точки зрения вышеприведенной теории), что российские власти полагают экономику страны эффективно функционирующей и проектный подход адекватным такому ее качеству (по крайней мере на среднесрочном интервале). Примем для начала эту сильную предпосылку в качестве *базовой* и на ней построим дальнейший анализ.

Начнем анализ НПЭР, опираясь на его описание в паспорте проекта [9]. Структуру и состав проекта представим с помощью рис. 2, следуя при этом работе [10].



Рис. 2. Структура НПЭР как иерархия по входимости  
Fig. 2. The structure of the NPER as a hierarchy of inputs

Трансформируем структуру проекта на рис. 2 в систему «цели – средства» НПЭР (рис. 3) и квантифицируем полученное дерево целей методом «снизу – вверх» (см., например, [11, с. 55–57, 126, 127]). Для этого используем данные п. 5. «Финансовое обеспечение реализации национального проекта» из Паспорта национального проекта «Экология» [9]<sup>1</sup> и вербальную формулировку проблемы (как она понята нами) из Указа Президента РФ В.В. Путина «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» [3].

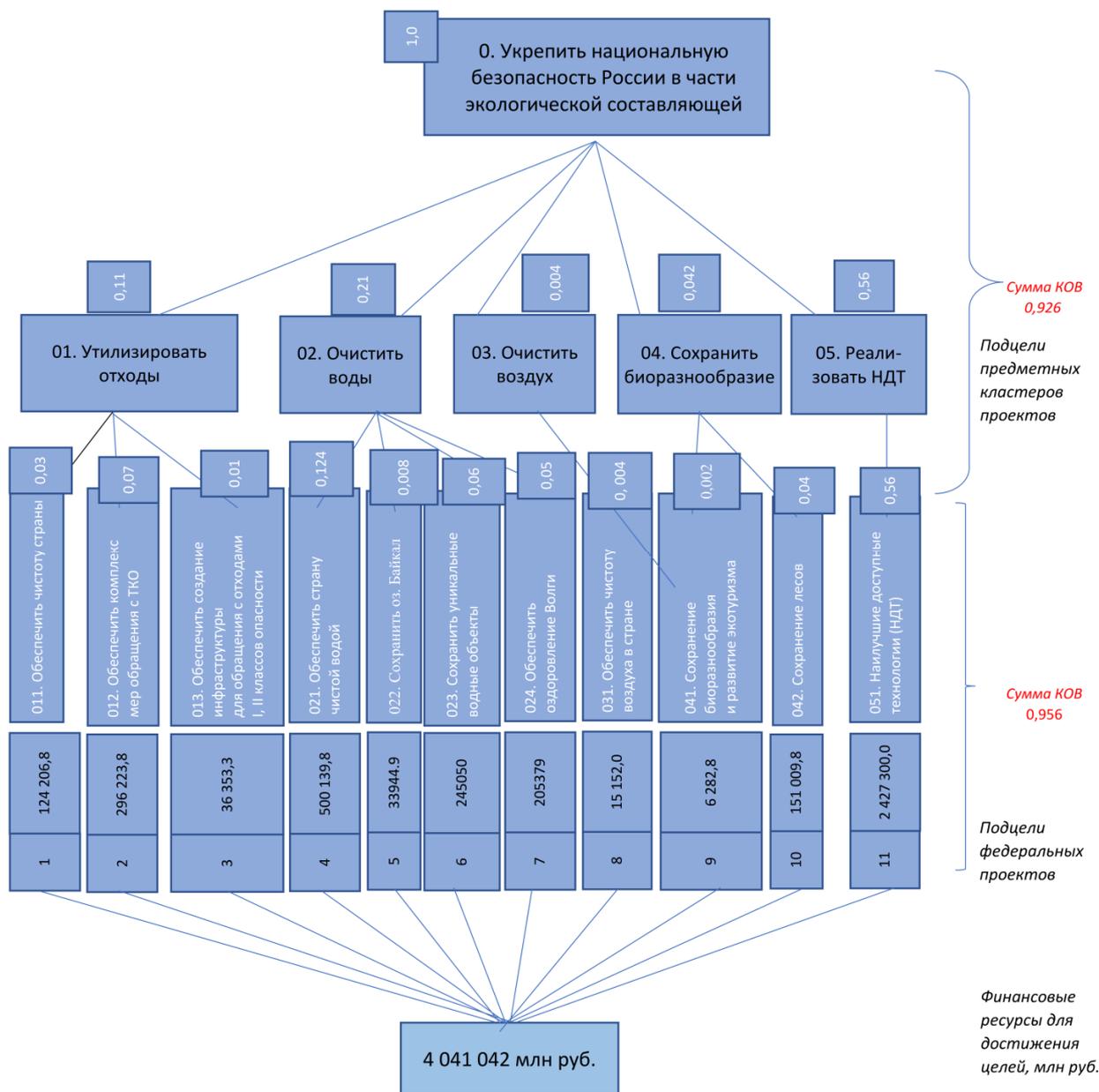


Рис. 3. Система «цели – средства» НПЭР  
Fig. 3. The “goals – means” system of the NPER

Используя названные первоисточники, мы с помощью рис. 1 и 2 осуществили на рис. 3 первичную структуризацию проблемы, когда цели и средства по возможности четко разделены и частично квантифицированы. Очевидно, что в 11 федеральных проектах НПЭР отсутствует представленный в явной форме проект, касающийся Енисея так, как это сделано в отношении Волги и оз. Байкал. Даже если затраты на подобный проект для Енисея по умолчанию входят в сумму за-

<sup>1</sup> Утвержден президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. № 16).

## Управление в социально-экономических системах

трат по проектам 4 и 6 из кластера «Чистые воды» на рис. 3, то неясно, какая доля этой суммы предназначена для Енисея и АЕР.

В табл. 3 представлены данные, заимствованные из Паспорта НПЭР, в виде цепочки операций (элементарной сети) по освоению средств, выделенных на каждый год ( $V_i$ ) реализации программы<sup>2</sup>. Это один из возможных вариантов, у которого эпюра затрат средств сдвинута к концу жизненного цикла НПЭР, и такая динамика вложений, естественно, минимизирует сумму дисконтированных затрат ( $V_{\min}^D$ ).

Освоение средств в поздние сроки

Таблица 3

Late disbursement of funds

Table 3

Годы	2019	2020	2021	2022	2023	2024
$V_i$ , млн руб.	221 533,3	528 693,7	659 196,4	892 258,9	889 565,5	849 794,2

$$V_{\min}^D = \sum_{i=1}^6 \frac{V_i}{(1+r)^i} = 2\,505\,179,56,$$

где  $r$  – ставка дисконтирования для проекта, равная 13 %<sup>3</sup>.

Осуществив все операции НПЭР в ранние сроки свершения, получаем распределение средств, максимизирующее сумму дисконтированных затрат ( $V_{\max}^D$ ) (табл. 4).

Освоение средств в ранние сроки

Таблица 4

Early disbursement of funds

Table 4

Годы	2019	2020	2021	2022	2023	2024
$V_i$ , млн руб.	865 023,50	899 325,10	850 544,60	622 541,90	502 410,50	301 196,40

$$V_{\max}^D = \sum_{i=1}^6 \frac{V_i}{(1+r)^i} = 2\,858\,456,17.$$

Вложения с поздним сроком осуществления характеризуют напряженный план, так как у всех операций отсутствуют резервы времени для освоения годовых затрат в полном (запланированном) объеме. Этот план имеет самую высокую степень риска недостижения конечных целей проекта. Соответственно, план с вложениями, осуществленными в ранние сроки, имеет минимальную степень риска недостижений конечных целей проекта среди всех других распределений выделенных суммарных средств. Таким образом, возникает двухкритериальная задача управления затратами средств, математическая модель которой выглядит следующим образом.

Пусть  $k$ -й вариант финансирования проекта характеризуется соответствующей динамикой затрат средств  $V_k^t$  в  $t$ -й период, при этом варианты, представленные в табл. 3 и 4, являются «крайними», имеющими минимальную ( $V_{\min}^D$ ) и максимальную ( $V_{\max}^D$ ) сумму дисконтированных затрат. Остальные варианты имеют промежуточные объемы резервов времени у некритических операций ( $T^k$ ) и, соответственно, суммы дисконтированных затрат в интервале от ( $V_{\min}^D$ ) до ( $V_{\max}^D$ ).

$\sum_i V_k^t = Q$ ;  $T_i^p$ ,  $T_i^n$  – значения ранних и поздних сроков свершения  $i$ -х событий графика выполнения операций;  $T_i^k$  – значения сроков свершения  $i$ -х событий  $k$ -го варианта финансирования. Тогда

$$T^k = \sum_i (T_i^n - T_i^k).$$

<sup>2</sup> Далее используется терминология, принятая в сетевом планировании.

<sup>3</sup> Такая ставка дисконтирования является средневзвешенной стоимостью капитала (weighted average cost of capital – WACC).

$T^k$  является оценкой риска невыполнения сроков строительства (максимальное значение  $T^k$  соответствует минимальной степени риска). Требуется определить такой вариант выполнения проекта и соответствующие ему объемы средств, которые обеспечат минимум суммы дисконтированных затрат для заданного уровня риска или минимальный размер риска для ожидаемого значения суммы дисконтированных затрат.

Таким образом, требуется найти:

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{если происходит вложение средств по } k\text{-му варианту проекта,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

при ограничениях:

$$T_i^p \leq T_i^k \leq T_i^n, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n V_k^t \cdot x_k = Q. \quad (2)$$

Целевые функции:

минимизация суммы дисконтированных затрат:

$$F_1 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot V_k^t \right) (1+r)^{-t} \rightarrow \min; \quad (3)$$

минимизация риска:

$$F_2 = \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot T^k \right) \rightarrow \max. \quad (4)$$

При решении поставленной задачи используем метод последовательных уступок, который заключается в следующем: сначала решаем задачу (1)–(3), не учитывая второй критерий (4). Получаем решение  $\{x_k(1)\}$  при значении первой целевой функции  $F_1^1$ . Затем вычисляем значение 2-го критерия  $F_2^1$  при полученном решении. Увеличиваем значение первого критерия (например, на 5 %) –  $F_1^2 = 1,05F_1^1$  и переводим его в ограничение:

$$\sum_{t=0}^T \left( \sum_{k=1}^n x_k \cdot V_k^t \right) (1+r)^{-t} \leq F_1^2. \quad (5)$$

На втором этапе решается исходная задача (1)–(2) при дополнительном ограничении (5), в которой максимизируется вторая целевая функция (4). В результате получается новое решение  $\{x_k(2)\}$ , у которого значение первой целевой функции будет  $F_1^2 \geq F_1^1$ , а второго критерия –  $F_2^2 \leq F_2^1$ . Продолжая этот пошаговый процесс, получим последовательно набор решений  $\{x_k(1)\}$ ,  $\{x_k(2)\}, \dots, \{x_k(N)\}$ , имеющих соответствующие значения критериев.

Каждое полученное решение этого набора является Парето-оптимальным, образуя множество вариантов, которые могут быть приняты к реализации. Полученная упорядоченная последовательность вариантов проекта обладает следующим свойством: каждый последующий вариант имеет большую сумму дисконтированных затрат, при этом убывает риск невыполнения программы в запланированные сроки. Выбранные варианты наглядно показывают тесную взаимосвязь между суммой дисконтированных затрат и риском и дают возможность принять Парето-мотивированный вариант проекта. Представленная выше постановка задачи выбора варианта проекта обеспечивает выбор объема годовых инвестиций в него –  $V_k^t$ .

Но как выбранная динамика распределения средств скажется на надежности достижения экологических целей НПЭР к завершающему году жизненного цикла проекта? Оказывается, по-разному, если результаты (выгоды) проекта оценивать с помощью понятия «антихрупкость», введенного в научный оборот Н. Талебом [12]. Действительно, если предположить, что функция выгод от годовых затрат средств имеет простейшую квадратичную форму (т. е. она выпукла), то элементарные расчеты по Талебу (возьмем для примера план с минимальной суммой дисконтированных затрат, представленный в табл. 3) дают следующий результат:

$$M[(\bar{V}_i)]^2 = 453\,611\,679\,049,00.$$

Среднее значение функции:

$$M(\bar{V}_i^2) = 512\,122\,805\,162,44.$$

Разность  $512\,122\,805\,162,44 - 453\,611\,679\,049,00 = 58\,511\,126\,113,44$  является скрытой выгодой от антихрупкости данной динамики финансирования НЭПР.

Разность между этими величинами при данной функции выгод есть дисперсия от годовых затрат средств, которая может быть вычислена для каждого  $k$ -го варианта распределения средств и введена в математическую модель в качестве третьего критерия.

Введение дополнительного показателя «антихрупкость» позволяет получить числовую оценку аллокативной эффективности распределения средств НЭПР во времени при точечном, преимущественно техническом подходе. Тем не менее при всех достоинствах числовых оценок крупномасштабных экологических программ качественный анализ пространственного аспекта проблемы остается неотъемлемой частью системной оценки. Выше дано описание системного синтеза разных подходов к оценке программы восстановления и сохранения природного комплекса Енисея как скелетной основы эколого-ассимиляционного потенциала АЕР. К полученным результатам следует относиться с *максимальной осторожностью*, памятуя, что проблема учета фактора неопределенности многоаспектна и нами рассмотрен лишь ее частный случай в рамках парадигмы Я. Корнаи.

#### 4. Решение проблемы: третий шаг

В отличие от двух первых, где рассматривались результаты проведенных модельных экспериментов с помощью вербальных и частично оцифрованных моделей системного анализа на конкретном примере НЭПР, данный шаг в известной степени носит гипотетический характер. Объясняется такое определение следующим образом. Если обратиться к начальному сюжету статьи, то логическим результатом третьего шага должно стать создание гибридной модели оценки крупномасштабных экологических проектов из логико-эвристической модели, базирующейся на экспертной информации, и экономико-математической модели (ЛЭМ + ЭММ) и описание результатов модельных экспериментов с ее помощью. Аналоги подобных моделей созданы с участием авторов, и они работают, например, при оценке крупномасштабных железнодорожных проектов, но, к сожалению, специфика экологических проблем и программ в них не учтена. Имеется в виду семейство полудинамических оптимизационных моделей ОМММ (Оптимизационные Межрегиональные Межотраслевые Модели), в разной степени апробированное при решении задач мезоуровня как в плановой, так и в рыночной экономиках [13–15].

Более того, на базе одной из версий семейства ОМММ разработана медико-эколого-экономическая модель (МЭЭМ) и с ее помощью осуществлен сценарный анализ развития субъектов Азиатской части России [16]. Однако использовать МЭЭМ на третьем этапе наших расчетов пока невозможно из-за несовпадения набора анализируемых в ней показателей с набором показателей нашей ЛЭМ, а также по причине различной архитектуры программных комплексов ОМММ и МЭЭМ. В настоящее время нами активно проводятся «стыковочные» мероприятия и совершенствование указанных моделей с ориентацией на конечную цель: создать гибридную модель оценки последствий реализации крупномасштабных экологических программ. Главная трудность состоит в нахождении универсального способа учета фактора радикальной неопределенности, и авторам настоящей статьи в своих исследованиях удалось продвинуться лишь в некоторых частных случаях. Поиск универсального подхода осуществляется в рамках технологии больших данных (Big Data). Исход поиска сегодня предсказать невозможно; именно поэтому третий шаг исследования, освещаемого в статье, следует считать гипотетическим.

### Литература

1. Корнаи, Я. Системная парадигма / Я. Корнаи // Вопросы экономики. – 2002. – № 4. – С. 4–22.
2. Клейнер, Г.Б. Эволюция институциональных систем / Г.Б. Клейнер. – М.: Наука, 2004. – 240 с.
3. <http://government.ru/docs/all/111285/> (дата обращения: 18.08.2020).
4. Бандман, М.К. Избранные труды и продолжение начатого / М.К. Бандман; под ред. д.э.н. В.Ю. Малова. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2014. – 448 с.
5. Simon, H. The Structure of Ill-structured Problems / H. Simon // Artificial Intelligence. – 1973. – Vol. 4. – P. 181–202.
6. Рац, М. «Белые» и «красные» / М. Рац // Независимая газета. – 08.10.1996. – С. 5.
7. Чаркина, Е.С. Развитие проектного подхода в системе государственного управления: методология, опыт, проблемы / Е.С. Чаркина. – М.: ИЭ РАН, 2017. – 54 с.
8. <https://нацпроектэкология.рф/v-gosdume-obsudili-v-kakoy-byudzhnet-napravlyat-vyplaty-zashcherb-ekologii/> (дата обращения: 18.08.2020).
9. Паспорт национального проекта «Экология», утвержденный президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол от 24 декабря 2018 г. № 16). – <file:///C:/Users/PC/Desktop/ecology.pdf>.
10. Веницианов, Е.В. (Институт водных проблем РАН). О национальном проекте «Экология» / Е.В. Веницианов. – [https://eco-project.org/data/upload/Venicianov\\_lekciya\\_po\\_prektu\\_Ekologiya.-20200512083929.pdf](https://eco-project.org/data/upload/Venicianov_lekciya_po_prektu_Ekologiya.-20200512083929.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).
11. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа // под ред. И.Ф. Шахнова. – М.: Радио и связь, 1981. – 560 с.
12. Талеб, Н.Н. Антихрупкость. Как извлечь выгоду из хаоса / Н.Н. Талеб; пер. с англ. Н. Караева. – М.: Колibri, Азбука-Аттикус, 2015. – 768 с.
13. Гранберг, А.Г. Моделирование пространственного развития национальной и мировой экономики: эволюция подходов / А.Г. Гранберг // Регион: экономика и социология. – 2007. – № 1. – С. 87–107.
14. Системное моделирование и анализ мезо- и микроэкономических объектов / отв. ред. В.В. Кулешов и Н.И. Сулов. – Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2014. – 488 с.
15. Комплексный подход к оценке общественной эффективности крупномасштабных железнодорожных проектов / Е.Б. Кибалов, И.А. Беспалов, В.Ф. Бузулуцков и др. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2015. – 160 с.
16. Азиатская часть России: моделирование экономического развития в контексте опыта истории / отв. ред. чл.-корр. В.А. Ламин, д.э.н. В.Ю. Малов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. – Вып. 34. – 464 с. – (Интеграционные проекты СО РАН).

**Гельруд Яков Давидович**, д-р техн. наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; [gelrud@mail.ru](mailto:gelrud@mail.ru).

**Кибалов Евгений Борисович**, д-р экон. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск; [kibalovE@mail.ru](mailto:kibalovE@mail.ru).

**Малов Владимир Юрьевич**, д-р экон. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск; [malov@ieie.nsc.ru](mailto:malov@ieie.nsc.ru).

*Поступила в редакцию 17 февраля 2021 г.*

PROGRAM AND PROJECT APPROACHES  
TO SOLVING LARGE-SCALE ENVIRONMENTAL PROBLEMS

Ya.D. Gelrud<sup>1</sup>, gelrudid@susu.ru,

E.B. Kibalov<sup>2</sup>, kibalovE@mail.ru,

V.Yu. Malov<sup>2</sup>, malov@ieie.nsc.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

The article discusses the federal program “Ecology of the Angara-Yenisei region (AYR)”. The description of the systemic synthesis of different approaches to the assessment of the program of restoration and preservation of the natural complex of the Yenisei, as the skeletal basis of the ecological-assimilation potential of AEP is given. The necessity of taking into account the uncertainty factor when evaluating large-scale environmental projects is substantiated. **Purpose of the study.** Show that the effects of large-scale projects affect the very scenario of economic development, in this regard, it is incorrect to use the primitive integration of an alternative (strategy) into the same scenario, it is shown that it is necessary to evaluate the “project – scenario” relationship. **Materials and methods.** The authors propose to use three levels of assessment for evaluating large-scale projects: macro level, meso level and micro level. This classification allows you to gradually reduce the level of uncertainty. The information obtained at the previous level of assessment is the source for the lower level. **Results.** At the first stage, the judgments of the experts were processed using computer products developed at the IEIE. At the second step, the National Project “Ecology of Russia” was analyzed, consisting of 11 federal projects, and a mathematical model was developed for the multicriteria problem of optimal cost management of the project, taking into account the uncertainty factor. The result of the third step was the creation of a hybrid model for assessing large-scale environmental projects from a logical-heuristic model based on expert information and an economic-mathematical model. Analogs of such models, created with the participation of the authors, work in the evaluation of large-scale railway projects. This refers to a family of semi-dynamic optimization models, which have been tested to varying degrees in solving meso-level problems, both in planned and market economies. Moreover, on the basis of one of the versions of this family, a medical-ecological-economic model was developed, and with its help, a scenario analysis of the development of the subjects of the Asian part of Russia was carried out. **Conclusion.** The article provides a brief description of the functionality and the need to use the appropriate mathematical and software tools as the stages of large-scale projects progress from concept to implementation.

*Keywords:* Angara-Yenisei region, neo-systemic approach, neoclassical mainstream, optimization inter-regional intersectoral models.

## References

1. Kornai J. [System paradigm]. *Voprosy ekonomiki*, 2002, no. 4, pp. 4–22. (in Russ.)
2. Kleiner G.B. *Evolutsiya institutsionalnich sistem* [Evolution of institutional systems]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 240 p.
3. Available at: <http://government.ru/docs/all/111285/> (accessed 08.18.2020). (in Russ.)
4. Bandman M.K. *Isbrannye trudy i prodolzhenie nachatogo* [Selected works and continuation of what was begun]. Novosibirsk, IEOPP SO RAN, 2014. 448 p.
5. Simon H. The Structure of Ill-structured Problems. *Artificial Intelligence*, 1973, vol. 4, pp. 181–202.
6. Rat M. [“White” and “red”]. *Nezavisimaya gazeta*, 08.10.1996, p. 5.
7. Charkina E.S. *Razvitie proektnogo podkhoda v sisteme gosudarstvennogo upravleniya: metodologiya, opyt, problemy* [Development of the project approach in the public administration system: methodology, experience, problems]. Moscow, IE RAN, 2017. 54 p.
8. Available at: <https://нацпроектэкология.рф/v-gosdume-obsudili-v-kakoy-byudzhet-napravlyat-vyplaty-za-ushcherb-ekologii/> (accessed 08.18.2020). (in Russ.)

9. *Pasport natsional'nogo proyekta "Ekologiya", utverzhdenyyu prezidiumom Soveta pri Prezidente Rossiyskoy Federatsii po strategicheskomu razvitiyu i natsional'nym proyektam (protokol ot 24 dekabrya 2018 g. No. 16)* [Passport of the national project "Ecology", approved by the Presidium of the Council under the President of the Russian Federation for Strategic Development and National Projects (protocol of December 24, 2018 No. 16)]. Available at: file:///C:/Users/PC/Desktop/ecology.pdf.

10. Venitsianov E.V. (Institute of Water Problems RAS). [On the national project "Ecology"]. Available at: [https://eco-project.org/data/upload/Venicianov\\_lekciya\\_po\\_prektu\\_Ekologiya.-20200512083929.pdf](https://eco-project.org/data/upload/Venicianov_lekciya_po_prektu_Ekologiya.-20200512083929.pdf) (accessed 08/18/2020). (in Russ.)

11. Keene R.L., Raifa H. *Prinyatie reshenii pri mnogikh kriteriyakh: predpochteniya i zamesheniya* [Decision-making under many criteria: preferences and substitutions]. Moscow, Radio and communication, 1981. 560 p.

12. Taleb N.N. *Antikhrupkost'. Kak izvlech' vygodu iz khaosa* [Antifragility. How to benefit from chaos]. Transl. from Engl. Moscow, CoLibri, Azbuka-Atticus, 2015. 768 p.

13. Granberg A.G. [Modeling the spatial development of the national and world economy: evolution of approaches]. *Region: ekonomika i sotsiologiya*, 2007, no. 1, pp. 87–107. (in Russ.)

14. Kuleshov V.V., Suslov N.I. (Eds.). *Sistemnoe modelirovanie i analiz mezo- i mikroekonomicheskikh ob'ektov* [System modeling and analysis of meso- and microeconomic objects]. Novosibirsk, Sib. department, IEOPP SD RAS, 2014. 488 p.

15. Kibalov E.B., Bespalov I.A., Buzulutskov V.F. et al. *Kompleksnyi podkhod k otsenke obshestvennoi effektivnosti krupnomasshtabnykh zheleznodorozhnykh projektov* [An integrated approach to assessing the social efficiency of large-scale railway projects]. Novosibirsk, Publishing house of SGUPS, 2015. 160 p.

16. Lamin V.A., Malov V.Yu. (Eds.). *Aziatskaya chast' Possii: modelirovanie ekonomicheskogo razvitiya v kontekste opyta istorii* [The Asian part of Russia: modeling economic development in the context of the experience of history]. Novosibirsk, Publishing house of the SB RAS, 2012, iss. 34. 464 p. (Integration projects of the SB RAS).

*Received 17 February 2021*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гельруд, Я.Д. Программный и проектный подходы при решении крупномасштабных экологических проблем / Я.Д. Гельруд, Е.Б. Кибалов, В.Ю. Малов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 58–69. DOI: 10.14529/ctcr210206

#### FOR CITATION

Gelrud Ya.D., Kibalov E.B., Malov V.Yu. Program and Project Approaches to Solving Large-Scale Environmental Problems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 58–69. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210206

## APPLICATION OF FUZZY LOGIC TO ASSESS BANKS' CREDIT RISK

*M.I. Ozerova, ozerovam@rambler.ru,*

*I.E. Zhigalov, ikgij@vlsu.ru*

*Vladimir State University named after Alexander and Nicolay Stoletovs, Vladimir,  
Russian Federation*

The banking system is a constantly evolving system. The information environment of the bank is growing, the volumes of processed information are increasing due to the growth of users and banking products. To reduce risks, banks make a financial assessment of the situation of individuals and legal entities. The aim of the work is to develop fuzzy multi-connected models designed to predict the receipt of a positive or negative decision to receive a banking product. The decision is made based on scoring. Scoring consists in assigning points for completing a certain questionnaire developed by underwriters of credit risk assessors. Based on the results of the points gained, the system automatically makes a decision on approving or refusing to issue a loan. Different banks have different scoring models. **Purpose of the study.** The paper considers the use of fuzzy models for making a decision by a bank to issue a banking product that implements the concept of “soft computing”. **Methods.** The use of fuzzy logic methods in credit scoring is not new, but it is not widely used in practice because it is expensive to integrate into existing systems. Each bank uses its own indicators of the client's financial reliability in scoring. Most of the indicators in banks are the same, but when deciding to issue different banking products, they have different numerical values. The data of the standard scoring methodology of a real bank were taken as the initial data. To predict a bank's decision to issue a banking product to a client, a fuzzy model was applied, production rules were proposed, and membership functions were determined. The model focused on the simultaneous processing of incoming data from multiple clients and for different banks and different scoring models. **Results.** The developed mathematical model for assessing the client's rating and predicting the decision to receive a banking product based on the fuzzy inference rule. The obtained results are proposed to be used in a multi-banking web-oriented system of providing banking products to corporate clients.

*Keywords: mathematical models, credit rating, scoring, fuzzy logic.*

### Introduction

The work of banks is associated with lending activities, investment of funds, and therefore in their activities should take into account the risks of loss of funds. To this end, banks regularly identify significant risks and analyze the causes of their occurrence. To reduce risks, banks make a financial assessment of the situation of individuals and legal entities. Deciding on the basis of which method to build a scoring system that determines the rating is a difficult problem, since the quality of the solution depends both on the model and on the quality of the available data, their noisiness and heterogeneity. The bank evaluates the financial position of the client, first, based on the information available to the bank about the client and, secondly, by requesting additional information on income from the client himself. Further, the data is processed according to its own algorithm adopted in each bank and a customer reliability rating is obtained. The rating is an aggregated assessment of the client's financial position. The rating model for assessing credit risk is quite popular and consists of a set of quantitative and qualitative characteristics of the client. These characteristics are checked, analyzed by the bank and they determine the creditworthiness of the client.

To conduct an adequate analysis of the client's financial position in terms of qualitative characteristics, reliable, from the point of view of the bank, sources of information are used [1]. These are accounting data, data from the tax service, documents received from various departments of the bank. Nowadays, it has become popular to analyze customer data posted on the Internet, media, and social networks.

For quantitative analysis, the data provided by the client in the financial statements is used.

It should be noted that each bank uses its own methodology for calculating the customer's reliability rating and assessing his financial position.

**Domain analysis**

One of the most popular methods for determining the credit rating based on the summation of points [2]. Quantitative and qualitative characteristics, according to expert judgment, are determined in the form of points. The score based on a rating scale, from highest (good) to lowest (bad). To determine the final indicator of the client's financial position, the arithmetic mean of the points considered based on the sum of all criteria, quantitative and qualitative characteristics.

For example, there is a group of indicators of the bank XXX: quantitative, qualitative and corrective characteristics of the client ( $X_i$ ). Each group is characterized by  $n$  characteristics.

For each group, the average score of the analyzed group is calculated, and is calculated using the following formula:

$$X_{average} = \frac{\sum(X_1 + X_2 + X_n)}{\sum X_n},$$

where  $X_{average}$  – the average score of the characteristics of the analyzed subgroup;  $X_n$  – the analyzed parameter of the characteristics of the subgroup;  $X_1$  – subgroup indicator;  $X_2$  – a subgroup indicator.

For each subgroup, the total number of points of quantitative, qualitative parameters and indicators calculated which adjust the client's credit rating. The client's credit rating determined by the formula:

$$R = \sum X_{1average} + \sum X_{2average} + \sum X_{3average},$$

where  $X_{1average}$  – the average score of the quality parameters of the Client;  $X_{2average}$  – the average score of the quantitative parameters of the Client;  $X_{3average}$  – the average score of the correcting parameters.

Based on the totality of the assigned points, taking into account the established intervals of the scoring values, the final credit rating of the client (R) and his financial position are determined.

The Table 1 contains a description of the client's financial position in accordance with the rating determined by the parameters of bank XXX.

Table 1

Compliance of the rating with the assessment of financial position

Score Min	Score Max	Rating R	Financial position	Description
0	< 1.5	C	not satisfactory	Low degree of creditworthiness. The main indicators of the financial position assessed as satisfactory or close to satisfactory, but their stability is questionable. The company has serious enough problems or is at a significant risk of serious problems
$\geq 1.5$	< 5	B	satisfactory	Average degree of creditworthiness. The financial position assessed as satisfactory and stable in the short term. The company has no problems that could lead to loss of creditworthiness
$\geq 5.1$	$\leq 8$	A	high position	High degree of creditworthiness. The financial position assessed as good and stable in the long term. The company has no discernible problems

The aim of the work is to develop fuzzy multi-connected models [3, 4], designed to predict the receipt of a positive or negative decision to receive a banking product, including the assessment of the credit rating of a legal entity (Client).

**Modeling method**

The use of fuzzy logic methods in credit scoring is not new, it is presented in works [5–8], and however, with the growth of information technologies, new opportunities for their implementation appear. Currently, neural networks and systems with fuzzy logic have proven themselves well in forecasting in the form of a fuzzy neural network [9–12]. The concept of “fuzzy set” fuzzy set, introduced by L. Zadeh in 1965 [13], admits that the characteristic function (the function of membership of an element

in a set) can take any values in the interval  $[0, 1]$ , and not only values 0 or 1. This relation is described using the membership function  $\mu \rightarrow [0, 1]$ . L. Zadeh proposed, by analogy with the theory of probability, to use the function [14] as a mathematical model of the linguistic uncertainty of the object [15]:

$$x \in X : [10]. Y = \mu(x, B),$$

where  $Y$  is the result of calculating the function, expressing the measure of uncertainty (fuzziness) for a specific object  $x \in X$ ;  $\mu$  is a continuous function such that  $\mu: X \rightarrow [0, 1]$ . In essence, the function  $\mu$  determines the distribution of uncertainty on  $X$ ;  $X$  – the domain of definition of the function  $\mu$ .

The domain of definition specified by an ordered set of values, of an arbitrary nature, called a universal set (or universe).

The support of the function  $\mu(x, B)$  is the subset  $w \subset X$ , on which the function  $\mu(x, B)$  takes on a nonzero value. The set of real numbers usually given as a universal set;  $B$  – a vector of function parameters, usually numeric.

Fuzzy inference systems based on rules [16], which can be represented by the following types of production rules, containing in the right-hand sides: three types of production rules, containing in the right parts, can represent constants:

constants

$$R^\theta : \text{if } x_1 \text{ is } X_1^0, x_2 \text{ is } X_2^0, \dots, x_m \text{ is } X_m^0, \text{ then } y = c^0, \quad (1)$$

fuzzy sets

$$R^\theta : \text{if } x_1 \text{ is } X_1^0, x_2 \text{ is } X_2^0, \dots, x_m \text{ is } X_m^0, \text{ then } y \text{ is } Y^0, \quad (2)$$

and linear equations

$$R^\theta : \text{if } x_1 \text{ is } X_1^0, x_2 \text{ is } X_2^0, \dots, x_m \text{ is } X_m^0, \quad (3)$$

$$y^\theta = c_0^\theta + \sum_{l=1}^m c_l^\theta x_l,$$

where  $\theta = \overline{1, n}$ ,  $l = \overline{1, m}$ ;  $\theta$  – is the rule number;  $n$  – number of rules;  $l$  – number of input;  $m$  – number of input variables;  $c^\theta = (c_0^\theta, c_1^\theta, \dots, c_m^\theta)$  – vector of coefficients;  $X_l^0, Y^0$  – fuzzy sets characterized by membership functions  $X_l^0(x_l, d_l^\theta), Y^0(y, d^\theta)$  the shape, size and location of which depends on the vectors of parameters  $d_l^\theta$  и  $d^\theta$ .

Fuzzy forecast models are calculated using the formula:

$$y_i^\theta = f(X_i^\theta(k), Z_i^\theta(k) \varepsilon_i^\theta), \quad (4)$$

where  $\varepsilon_i$  – the vector of parameters and structural elements of the fuzzy  $i$ -th model (rules 1, 2, 3).

In this case, the following conditions must be observed [17]:

1. There is at least one rule for each linguistic term of the output variable.
2. For any term of the input variable, there is at least one rule in which this term used as a prerequisite (left side of the rule). Otherwise, there is an incomplete fuzzy rule base.

To predict the bank's decision ( $Y_j$ ) to issue a banking product (BP) to the Client, apply fuzzy models like (1)–(3), with parametric and structural learning algorithms and implementing the concept of “soft computing” [18].

Let us introduce the following notation:

Qualitative parameters of the Client  $X_i$ :

$$U(k) = (U_1(k) \dots U_n(k)), \text{ the variables defining } Y_j, \text{ respectively: } U_j(k) = (U_{1j}(k) \dots U_{nj}(k)).$$

Quantitative indicators of the Client  $Z_i$ :

$$Z(k) = (Z_1(k) \dots Z_n(k)).$$

The variables defining  $Y_j$ , respectively:  $Z_j(k) = (Z_{1j}(k) \dots Z_{nj}(k))$ .

Indicators adjusting the Client's credit rating ( $\varepsilon_i$ ):

$$G(b) = (G_1(b) \dots G_n(b)) \text{ and accordingly } G_j(b) = (G_{1j}(b) \dots G_{nj}(b)).$$

In addition, it is necessary to take into account the type of banking product (BP) having the number  $g = 1, N$ .

Then, according to formula (4), to predict the optimal solution  $Y_j$  in the  $b$ -th bank, fuzzy models of forecasting the optimal solution  $Y_j$  are required, we obtain the formula:

$$y_j^g = f(U_j^g(k), Z_j^g(k)G_j^g(b)\varepsilon_j^g), \tag{5}$$

$$g = 1, m, j = n,$$

where  $m$  – the number of bank products;  $n$  – sample length;  $\varepsilon_j^g$  – a vector of parameters and structural elements of the fuzzy  $j$  model.

The accuracy of the forecast is the proximity of the calculated  $y_j^g$  to the given  $Y^g$  value is estimated by the value of the criterion, which is a function of the error:

$$J(\varepsilon_j^g(b)) = \Phi(\varepsilon_j^g(b)).$$

Next, you need to check the fuzzy model by the condition:

$$J_i = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N |y_i(p) - \hat{y}_i p|, \forall i = \overline{1, q},$$

$$0 \leq J_i \leq 0, 2.$$

In the process of training the model, it is possible to change the number of variables in groups, therefore, to simplify formula (5), we introduce the notation  $U(k)$ ,  $Z(k)$  and  $G_j(b)$  through  $X_j$  we obtain formula:

$$y_j^g = f(U_j^g(x_{ij}), Z_j^g(x_{ij})G_j^g(x_{ij})\varepsilon_j^g). \tag{6}$$

Table 2 shows the groups of input variables that influence the decision to provide a banking product ( $Y_i$ ).

**Table 2**  
Groups of input variables influencing the decision to provide a banking product

Variable name	Variable label	Categories of Possible Values	Measurement scale
Dependent variables			
$Y_i$	Customer not receiving banking products. Receipt of a banking product by a client	0 – bad 1 – good	Nominal
Independent variables			
$x_1$	Principal (client) region	0 – not incl. to the register 1 – incl. to the register	Nominal
$x_2$	Limit of the banking product of the principal (client) in the given bank	Strong, Good, Satisfactory, Weak	Quantitative
$x_3$	Number of applications in this bank	Strong, Good, Satisfactory, Weak	Quantitative
$x_4$	Procurement Law	0 – not incl. to the register 1 – incl. to the register	Nominal
$x_5$	Principal's form of ownership	0 – not incl. to the register 1 – incl. to the register	Nominal
$x_j$	...	...	...

It should be borne in mind that each bank has individual scoring models [19], in this case we have 39 different models that are built according to these variables. Thus, passing to the new designations of the input variables  $x_i$ :  $l = 1, j = 1, q = 39$  where  $q$  is the number of fuzzy forecast models by formula (4), we obtain  $y_j$ :

$$y_j = f_j(x_{ij}, \varepsilon_j);$$

$R_i^\theta$  : if  $x_1(k)$  is  $X_{i1}^\theta$ ,  $x_2(k)$  is  $X_{i2}^\theta, \dots, x_j(k)$  is  $X_{ij}^\theta, \dots, x_m(k)$  is  $X_{im}^\theta$ ;

$$y_i^\theta(k) = c_{i0}^\theta + c_{i1}^\theta x_1(k) + \dots + c_{ij}^\theta x_j(k) + \dots + c_{im}^\theta x_m(k),$$

$$\theta = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, q},$$

where  $X$  – fuzzy sets described by membership functions:  $X(x_j, d_{ij}^\theta)$ , depending on the input variables  $x_j$  and the parameter vectors

$$d_{ij}^\theta = (d_{ij1}^\theta, d_{ij2}^\theta, \dots, d_{ij\sigma}^\theta),$$

where  $\theta = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, q}$ ;  $\theta, n_i$  – number and number of production rules of a fuzzy model predicting the  $i$ -th probability indicator  $y_j$ ;  $c_{ij}^\theta$  – coefficients of linear equations.

The production rules and the fuzzification operation form a fuzzy model [20], which has the following analytical form:

$$y_j(k) = \sum_{\theta=1}^{n_i} (c_i^\theta)^T x_i^\theta(k, d_i^\theta),$$

where  $(c_i^\theta)^T = (c_{i0}^\theta, c_{i1}^\theta, \dots, c_{im}^\theta)$  – vector of coefficients of the linear equation of the  $\theta$ -th rule;

$\theta = \overline{1, n}$ ;  $\tilde{x}_i^\theta(k) = (\beta_i^\theta, \beta_i^\theta x_1(k), \dots, \beta_i^\theta x_m(k))$  – extended input vector of the  $\theta$ th rule, containing as a multiplier a nonlinear fuzzy function of parameters  $d_i^\theta$

$$\beta_i^\theta(d_i^\theta) = \frac{W_i^\theta}{\sum_{\theta=1}^{n_i} W_i^\theta},$$

where  $W_i^\theta$  – the truth value of the  $\theta$ -th rule, equal to the product of the membership functions.

$$W_i^\theta = X_i^\theta(x_1) \cdot X_i^\theta(x_2) \cdot \dots \cdot X_i^\theta(x_m).$$

The vector  $\varepsilon$  is refined by the identification algorithm, we indicate parametric (coefficients of linear equations  $c = \{c_{ij}^\theta\}$ , parameters  $= \{d_{ij}^\theta\}$ ,  $\theta = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, q}$ ) and structural elements (the number of rules  $n$  and the number  $m$  and the composition of the variables).

Getting the forecasting value  $y_j(k)$ , we check the accuracy of the forecast and if the value  $J_{II}^r(i)$  is not lower than the permissible value  $J_{II}^\circ = 0.8$  and satisfies the condition  $J_{II}^r(i) \geq J_{II}^\circ$ , then we accept.

The structure of a multiply connected fuzzy model is shown in Fig. 1.

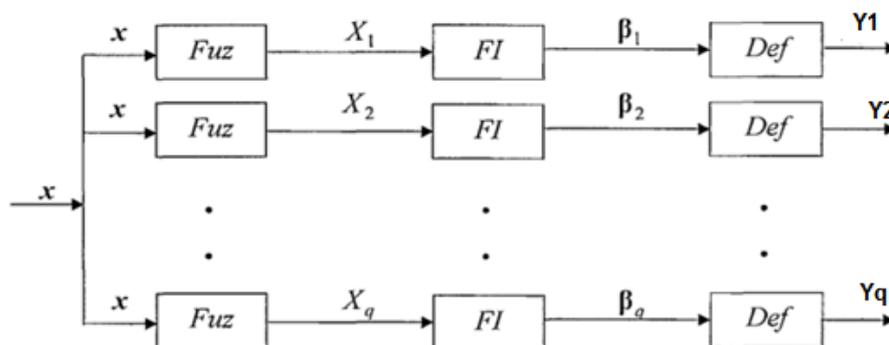


Fig. 1. Structure of a multiply connected fuzzy model

The model is focused on the simultaneous processing of incoming data from many clients and for different banks and different scoring models, so the entire space of incoming data is divided into subspaces using the FCM clustering method. The calculation was performed in the MATLAB system. Fig. 2 shows a fragment of the result of the proposed methodology in a multi-banking system.

```

===== RESTART: D:\All_material\WorkPrograms\Python27\module5.py =====
Генерируем случайный скоринг (True, False) с вероятностью = 0.8
Среднее число банков, по которым не прошел скоринг = 3 из 19
Суммарное количество заявок = 2000.0
Количество нераспределенных и отправленных на повтор заявок= 59
счетчик всех проходов, включая обработку потерянных  $x$  = 2059
('Kb[0]=0.01', 'Zb_otn[0]=0.01027', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00027')
('Kb[1]=0.01', 'Zb_otn[1]=0.01253', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00253')
('Kb[2]=0.01', 'Zb_otn[2]=0.01366', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00366')
('Kb[3]=0.01', 'Zb_otn[3]=0.01002', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -2e-05')
('Kb[4]=0.01', 'Zb_otn[4]=0.01151', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00151')
('Kb[5]=0.01', 'Zb_otn[5]=0.01349', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00349')
('Kb[6]=0.01', 'Zb_otn[6]=0.0111', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.0011')
('Kb[7]=0.02', 'Zb_otn[7]=0.02063', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00063')
('Kb[8]=0.03', 'Zb_otn[8]=0.0292', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = 0.0008')
('Kb[9]=0.04', 'Zb_otn[9]=0.04315', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00315')
('Kb[10]=0.05', 'Zb_otn[10]=0.05174', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00174')
('Kb[11]=0.06', 'Zb_otn[11]=0.06469', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00469')
('Kb[12]=0.07', 'Zb_otn[12]=0.06981', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = 0.00019')
('Kb[13]=0.08', 'Zb_otn[13]=0.0827', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.0027')
('Kb[14]=0.09', 'Zb_otn[14]=0.09', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = 0.0')
('Kb[15]=0.1', 'Zb_otn[15]=0.10061', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00061')
('Kb[16]=0.12', 'Zb_otn[16]=0.11956', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = 0.00044')
('Kb[17]=0.13', 'Zb_otn[17]=0.13367', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = -0.00367')
('Kb[18]=0.14', 'Zb_otn[18]=0.1199', '\xf0\xe0\xe7\xed\xe8\xf6\xe0 Kb-Zb_otn = 0.0201')
>>>
===== RESTART: D:\All_material\WorkPrograms\Python27\module5.py =====
Генерируем случайный скоринг (True, False) с вероятностью = 0.8
Среднее число банков, по которым не прошел скоринг = 3 из 19
Суммарное количество заявок = 2000.0

```

Fig. 2. A fragment of the result of the algorithm

### Conclusion

To predict the customer's reliability rating, three types of fuzzy models were taken, for certain groups of customer financial indicators and the requirements of banks. For each model, production rules are proposed, membership functions are defined.

The developed mathematical model for assessing the client's rating and predicting the decision to receive a banking product based on the fuzzy inference rule made it possible to find the most acceptable conclusion. The results obtained were proposed to be used in a multi-banking web-oriented system of providing banking products to corporate clients.

### References

1. Hannanova E.A. [Theoretical foundations for assessing creditworthiness]. *Bulletin of Science and Education*, 2016, no. 12 (24), pp. 46–48. (in Russ.)
2. Kostyikova M.Yu. [Scoring model of small business lending and its improvement in the Russian Federation]. *Finance and Credit*, 2014, no. 15, pp. 57–64. (in Russ.)
3. Joshua Ignatius, Adel Hatami-Marbini, Amirah Rahman, Lalitha Dhamotharan, and Pegah Khoshnevis. A fuzzy decision support system for credit scoring. *Neural Comput & Applic*, 2018, no. 29, pp. 921–937. DOI: 10.1007/s00521-016-2592-1
4. Gorlushkina N.N., Shin E.V. [Reengineering of the lending business process and the use of the apparatus of fuzzy sets for the classification of borrowers in the problem of credit scoring]. *Online magazine "Science of Science". Economics and Management*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 1–11. (in Russ.). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/82EVN215.pdf>.
5. Hoffmann F., Basens B., Mues K., Van Gestel T., and Vantienen J. Derivation of descriptive and approximate fuzzy rules for credit scoring using evolutionary algorithms. *European Journal of Operational Research*, 2007, pp. 540–555.

6. Ignatius J., Khatami-Marbini A., Rahman A. et al. Support system for fuzzy decisions for credit scoring. *Neural calculations and applications*, 2016, pp. 1–17. DOI: 10.1007 / s00521-016-2592-1
7. Xinhui C., Zhong Q. On Consumer Credit Scoring Based on Multi-criteria Fuzzy Logic. *Proc. Int. Conf. Business Intelligence and Financial Engineering, 2009, BIFE'09*. IEEE, 2009, pp. 765–768.
8. Lakhsasna A., Aionon R.N., Vakh T.Yu. Modeling decisions on credit risk assessment using an optimized fuzzy classifier. *International Symposium on Information Technology 2008*. IEEE, 2008, vol. 1, pp. 2–8.
9. Kudinov Yu.I., Ivanchenko K.S., Kudinov I.Yu. [Development of a fuzzy system for predicting the quality of metal products]. *Mechatronics, automation, control*, 2008, no. 10, pp. 27–32. (in Russ.)
10. Labinsky A.Yu., Nefediev S.A., Bardulin E.N [Use of fuzzy logic and neural networks in automatic control systems]. *Scientific-analytical journal Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the EMERCOM of Russia*, 2019, no. 1, pp. 44–50. (in Russ.)
11. Pezeshki Z., Mazinani S.M. Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: a survey. *Artif Intell*, 2019, vol. 52, no. 1, pp. 495–525. DOI: 10.1007/s10462-018-9630-6
12. Xiaoying Su, Sihong Xu, Shaochuan Xu. Compound control system for coagulant dosing process based on a fuzzy cerebellar model articulation controller. *Conference: 2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE, 2017, pp. 3931–3937. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8027972
13. Zade L. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye dlya prinyatiya priblizhennykh resheniy* [The concept of a linguistic variable and its application for making approximate decisions]. Moscow, Mir Publ., 1976. 167 p.
14. Yarushkina N.G., Afanasyeva T.V., Perfilieva I.G. *Integratsiya nechetkikh modeley dlya analiza vremennykh ryadov* [Integration of fuzzy models for time series analysis]. Ulyanovsk, 2010. 320 p.
15. Ozerova M.I., Zhigalov I.E. Application of neuro-fuzzy models in the information-analytical system of prediction of forest fires. *CEUR Workshop Proceedings*, 2019, pp. 389–396.
16. Novak V., Perfil'eva I., Mochkorzh I. *Matematicheskie printsipy nechetkoy logiki*. [Mathematical Principles of Fuzzy Logic]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2006. 352 p.
17. Sadatrasoul S., Gholamian M., Shahanaghi K. Combination of Feature Selection and Optimized Fuzzy Apriori Rules: The Case of Credit Scoring. *The International Arab Journal of Information Technology*, 2015, vol. 12, iss. 2, pp. 138–145. Available at: <http://www.ccis2k.org/iajit/PDF/vol.12,no.2/5795.pdf>.
18. Mammadli S. [Fuzzy Sistema ocenki kreditov na osnove nechetkoj logiki]. *Procedia Computer Science*, 2016, vol. 102, pp. 495–499. (in Russ.) Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs>.
19. Shi J., Xu B. Credit Scoring by Fuzzy Support Vector Machines with a Novel Membership Function. *Journal of Risk and Financial Management*, 2016, vol. 9, iss. 4, pp. 1–10. DOI: 10.3390/jrfm9040013
20. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. *Nechetkie modeli i seti Fuzzy models and network*. [Fuzzy models and networks]. Moscow, Hot line – Telecom, 2007, 284 p.

**Received 25 February 2021**

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КРЕДИТНОГО РИСКА БАНКОВ

М.И. Озерова, И.Е. Жигалов

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича  
и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

Банковская система является постоянно развивающейся системой. Информационная среда банка растет, увеличиваются объемы обрабатываемой информации из-за роста пользователей и банковских продуктов. Для сокращения рисков банки производят финансовую оценку положения физических и юридических лиц. Целью работы является разработка нечетких многосвязных моделей, предназначенных для прогнозирования получения положительного или отрицательного решения на получение банковского продукта. Решение принимается на основе скоринга. Скоринг заключается в присвоении баллов по заполнению некой анкеты, разработанной оценщиками кредитных рисков андеррайтерами. По результатам набранных баллов системой автоматически принимается решение об одобрении или отказе в выдаче кредита. Модели скоринга у разных банков различные. **Цель исследования.** Рассмотрено применение нечетких моделей для принятия решения банком на выдачу банковского продукта, реализующих концепцию «мягких вычислений». **Методы.** Применение методов нечеткой логики в кредитном скоринге не ново, но не имеет широкого применения на практике потому, что дорого обходится интеграция в существующие системы. Каждый банк применяет в скоринге свои показатели финансовой благонадежности клиента. Большая часть показателей в банках одинаковые, но при решении на выдачу разных банковских продуктов имеют различные числовые значения. В качестве исходных данных были взяты данные стандартной балльной методики реального банка. Для прогнозирования решения банка на выдачу клиенту банковского продукта была применена нечеткая модель, предложены продукционные правила, определены функции принадлежности. Модель ориентируема на одновременную обработку входящих данных от множества клиентов и для разных банков и различных скоринговых моделей. **Результаты.** Разработана математическая модель оценки рейтинга клиента и прогнозирования решения на получение банковского продукта на основе правила нечеткого вывода. Полученные результаты предложено использовать в мультибанковской веб-ориентированной системе предоставления корпоративным клиентам банковских продуктов.

*Ключевые слова:* математические модели, кредитный рейтинг, скоринг, нечеткие множества.

### Литература

1. Ханнанова, Е.А. Теоретические основы оценки кредитоспособности / Е.А. Ханнанова // Вестник науки и образования. – 2016. – № 12 (24). – С. 46–48.
2. Костыкова, М.Ю. Скоринговая модель кредитования малого бизнеса и ее совершенствование в Российской Федерации / М.Ю. Костыкова // Финансы и кредит. – 2014. – № 15. – С. 57–64.
3. A fuzzy decision support system for credit scoring / J. Ignatius, A. Hatami-Marbini, A. Rahman et al. // *Neural Comput & Applic*, 2018, no. 29, pp. 921–937. DOI: 10.1007/s00521-016-2592-1
4. Горлушкина, Н.Н. Реинжиниринг бизнес-процесса кредитования и применение аппарата нечетких множеств для классификации заемщиков в задаче кредитного скоринга / Н.Н. Горлушкина, Е.В. Шин // Интернет-журнал «Науковедение». Экономика и менеджмент. – 2015. – Т. 7, № 2. – С. 1–11. – <https://naukovedenie.ru/PDF/82EVN215.pdf>.
5. Derivation of descriptive and approximate fuzzy rules for credit scoring using evolutionary algorithms / F. Hoffmann, B. Basens, K. Mues et al. // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – P. 540–555.
6. Support system for fuzzy decisions for credit scoring / J. Ignatius, A. Khatami-Marbini, A. Rahman et al. // *Neural calculations and applications*. – 2016. – P. 1–17. DOI: 10.1007 / s00521-016-2592-1
7. Xinhui, C. On Consumer Credit Scoring Based on Multi-criteria Fuzzy Logic / C. Xinhui, Q. Zhong // *Proc. Int. Conf. Business Intelligence and Financial Engineering, 2009, BIFE'09*. – IEEE, 2009. – P. 765–768.

8. Lakhsasna, A. Modeling decisions on credit risk assessment using an optimized fuzzy classifier / A. Lakhsasna, R.N. Aïnon, T.Yu. Vakh // *International Symposium on Information Technology 2008*. – IEEE, 2008. – Vol. 1. – P. 2–8.
9. Кудинов, Ю.И. Разработка нечеткой системы прогнозирования качества металлопродукции / Ю.И. Кудинов, К.С. Иванченко, И.Ю. Кудинов // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2008. – № 10. – С. 27–32.
10. Лабинский, А.Ю. Использование нечеткой логики и нейронных сетей в системах автоматического управления / А.Ю. Лабинский, С.А. Нефедьев, Е.Н. Бардулин // *Научно-аналитический журнал Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России*. – 2019. – № 1. – С. 44–50.
11. Pezeshki, Z. Comparison of artificial neural networks, fuzzy logic and neuro fuzzy for predicting optimization of building thermal consumption: a survey / Z. Pezeshki, S.M. Mazinani // *Artif Intell*. – 2019. – Vol. 52, no. 1. – P. 495–525. DOI: 10.1007/s10462-018-9630-6
12. Xiaoying Su. Compound control system for coagulant dosing process based on a fuzzy cerebellar model articulation controller / Xiaoying Su, Sihong Xu, Shaochuan Xu // *Conference: 2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*. – IEEE, 2017. – P. 3931–3937. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8027972
13. Заде, Л. Понятие лингвистической переменной и его применение для принятия приближенных решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 167 с.
14. Ярушкіна, Н.Г. Интеллектуальный анализ временных рядов: учеб. пособие / Н.Г. Ярушкіна, Т.В. Афанасьева, И.Г. Перфильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. – 320 с.
15. Ozerova, M.I. Application of neuro-fuzzy models in the information-analytical system of prediction of forest fires / M.I. Ozerova, I.E. Zhigalov // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2019. – P. 389–396.
16. Новак, В. Математические принципы нечеткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкорж. – Физматлит. – 2006. – 352 с.
17. Sadatrasoul, S. Combination of Feature Selection and Optimized Fuzzy Apriori Rules: The Case of Credit Scoring / S. Sadatrasoul, M. Gholamian, K. Shahanaghi // *The International Arab Journal of Information Technology*. – 2015. – Vol. 12, iss. 2. – P. 138–145. – <http://www.ccis2k.org/iajit/PDF/vol.12,no.2/5795.pdf>.
18. Mammadli, S. Fuzzy Logic Based Loan Evaluation System / S. Mammadli // *Procedia Computer Science*. – 2016. – Vol. 102. – P. 495–499. DOI: 10.1016/j.procs.2016.09.433
19. Shi, J. Credit Scoring by Fuzzy Support Vector Machines with a Novel Membership Function / J. Shi, B. Xu // *Journal of Risk and Financial Management*. – 2016. – Vol. 9, iss. 4. – P. 1–10. DOI: 10.3390/jrfm9040013
20. Борисов, В.В. Нечеткие модели и сети / В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.

**Озерова Марина Игоревна**, канд. техн. наук, доцент кафедры информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир; ozerovam@rambler.ru.

**Жигалов Илья Евгеньевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и программной инженерии, Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир; ikgij@vlsu.ru.

*Поступила в редакцию 25 февраля 2021 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ozerova, M.I. Application of Fuzzy Logic to Assess Banks' Credit Risk / M.I. Ozerova, I.E. Zhigalov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 70–78. DOI: 10.14529/ctcr210207

### FOR CITATION

Ozerova M.I., Zhigalov I.E. Application of Fuzzy Logic to Assess Banks' Credit Risk. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 70–78. DOI: 10.14529/ctcr210207

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ БИЗНЕС-МОДЕЛИ СТРОИТЕЛЬНОЙ КОМПАНИИ В УСЛОВИЯХ ПАНДЕМИИ И ПОСТПАНДЕМИЙНЫЙ ПЕРИОД

*Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, М.А. Крючкова*

*Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия*

Вызовом и потрясением для всего мира стала пандемия COVID-19. Изменился уклад жизни людей и компаний различных отраслей. Требуется корректировка бизнес-моделей компаний для восстановления и нормального функционирования. Во время пандемии предприятия строительной отрасли также столкнулись со множеством проблем. **Цель исследования:** разработать алгоритм совершенствования бизнес-моделей строительных компаний с учетом изменений предпочтений потребителей в связи с распространением COVID-19. **Материалы и методы.** В работе применены методы системного анализа, методы оптимизации и теории принятия решений. Шаблон для формирования бизнес-модели был выделен на основании анализа существующих исследований в данной области. **Результаты.** Выявлено, что в сложившихся условиях особого внимания руководства строительных компаний требуют персонал, финансы, цепочки поставок. В работе предложен алгоритм совершенствования бизнес-модели компании, включающий следующие основные этапы: 1. Определить условия и пути создания ценности. В данном случае учитываются изменения потребностей потребителей в связи с пандемией. 2. Выявить целевые сегменты потребителей, реализовав классификацию по нескольким признакам. Рассмотреть возможность объединения (укрупнения) целевых сегментов относительно сходства требований. 3. Выстроить бизнес-модель в общем виде, отразив следующие аспекты: целевой клиент, предложение, ресурсы, получение дохода. 4. Детализировать бизнес-модель, заполнив шаблон Александра Остервальдера. 5. Сделать соответствующие выводы. **Заключение.** Разработанный алгоритм применен на примере строительных компаний, реализующих проекты в сфере жилищного строительства. Потребности варьируются и изменяются в связи с пандемией. Формирование ценностного предложения компании в настоящее время должно быть направлено на удовлетворение изменившихся потребностей. В частности, установлено, что потребители ориентированы в настоящее время на покупку домов, уделяют большее внимание безопасности, экологичности и автономности жилья, готовы использовать умные технологии. Стоит отметить перспективность учета в разрабатываемых планировках квартир и домов, возможность оборудования домашнего офиса (WFH) и отделения входной зоны.

*Ключевые слова:* бизнес-модель, управление, строительные компании, пандемия COVID-19, кризис.

### Введение

Последний год стал испытанием для всего мира. Мир охвачен пандемией COVID-19. На сегодняшний день мы сталкиваемся с беспрецедентным масштабом социально-экономических потрясений не только из-за безработицы, но и из-за того, как работает промышленность. И строительный бизнес меняется с популяризацией удаленной работы и новых необходимых условий обеспечения безопасности.

Текущий кризис заставил обратить внимание на то, что отрасль больше не может принимать статус-кво, включая низкую производительность, низкую предсказуемость, состязательные модели ценообразования, финансовую хрупкость, отсутствие сотрудничества, недостаток инвестиций в НИОКР и инновации. Возникают новые вопросы и всесторонние обсуждения, поскольку они заложат основы того, как строительная отрасль будет развиваться после восстановления нормальной жизни.

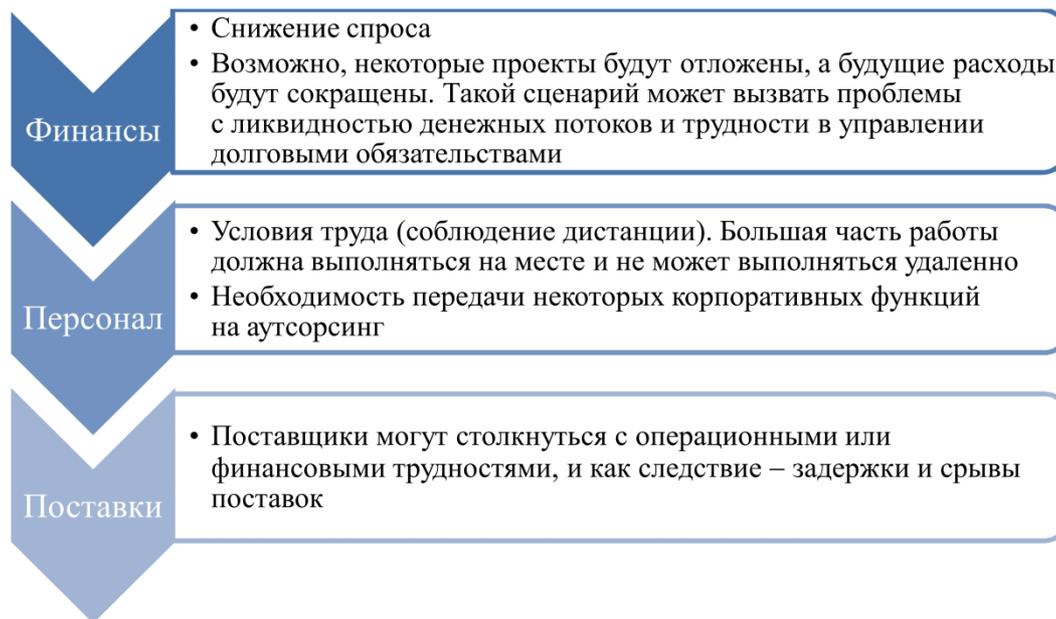
Легкого выхода из этого кризиса не существует. Но есть более перспективная альтернатива – трансформация бизнес-моделей. Эти изменения не просто «тенденция» 2020–2021 годов; это «тренд», который изменит следующее десятилетие, возможно, даже дольше. Компании должны

понять это, чтобы выжить и процветать. Изобретать альтернативные бизнес-модели – это не роскошь, это условие будущих успехов [1–4].

Поэтому для предприятий строительной сферы вопрос совершенствования бизнес-моделей является актуальным, особенно в современных условиях в связи с распространением COVID-19. Компаниям необходимо совершенствовать свои бизнес-модели для восстановления деятельности.

### Выявление проблем строительных компаний в связи с пандемией

Рассмотрим более подробно проблемы, с которыми могут столкнуться компании стройиндустрии и возможные пути их решения [5] (рис. 1).



**Рис. 1. Возможные проблемы строительных компаний в условиях пандемии и постпандемийный период**  
**Fig. 1. Possible problems for construction companies in a pandemic and post-pandemic period**

Таким образом, многие строительные компании будут вынуждены делать сокращения в этот нестабильный период. Некоторые будут строгими, но такова необходимость настоящего времени. Меры экономии должны быть введены, чтобы сохранить долгосрочные цели.

Далее рассмотрим рекомендации Пола Доллин [6], главного операционного директора консалтинговой службы по оказанию профессиональных услуг WSP.

Пол Доллин высказывает следующую интересную точку зрения о том, что мы подошли к COVID-19 с менталитетом «планируем худшее, стремимся к лучшему», стремясь к решительным, быстрым действиям по защите безопасности людей, программ клиентов и долготелю бизнеса.

Основная и непосредственная задача каждой организации – продолжать удовлетворять уникальные потребности каждого клиента, предвидя, как эти потребности могут измениться в текущей среде. Компаниям следует использовать то, что они видят в качестве ключевой силы операционной модели, которая заключается в расширении возможностей местных руководящих групп, наиболее близких к клиентам. Лидеры могут адаптировать свои операционные подходы к надзору за строительными работами, используя видеоконференции для проверки проектов и проведения презентаций, активизировать усилия по выявлению, обработке и передаче важной информации клиентам.

Выявлено, что взаимодействие с клиентом возможно не только в контексте блокировки, но и более широко, более спокойно и часто. Во многих случаях клиенты готовы общаться по видеосвязи больше времени, чем они хотели бы провести на встрече в своих офисах. Вебинары,

открытые для всех сотрудников и широкой общественности, позволяют своевременно обмениваться информацией, анализом и лучшими практиками от лидеров.

Этот стратегический сдвиг требует переосмысления и обдумывания относительно того, как превратить эти положительные результаты в долговременную практику для компании [7–10].

Кроме того, необходимо уделять особое внимание психическому здоровью и благополучию сотрудников, когда они работают из дома. Сотрудники также могут участвовать в многочисленных консультационных сессиях, спонсируемых компанией, как для себя, так и для своих семей. Перспективным направлением является поддержка сотрудников с помощью постоянных виртуальных групп поддержки, образовательных вебинаров и сеансов осознанности, которые призваны помочь людям почувствовать связь друг с другом, даже если они физически не находятся в одном пространстве.

Компании дополняют эти мероприятия, организуя виртуальные игровые вечера, конкурсы и общественные мероприятия.

Виртуальные интерактивные семинары могут объединить различные группы для продвижения процесса планирования. Эти семинары могут помочь определить параметры проектов, которые следует продвигать к проектированию и строительству. Использование технологии видеозахвата для проверки площадок и методов дистанционного зондирования вместо полевых обследований является возможным и перспективным для строительных проектов.

И во время кризиса многие компании осознали, что поддержание и расширение взаимодействия с клиентами является ключом к укреплению доверия и эффективному принятию решений. Неотъемлемая часть этих усилий – держать всех в курсе последних событий с COVID-19 посредством звонков и виртуальных встреч.

### **Формирование шаблона бизнес-модели строительной организации**

Концепция бизнес-модели имеет несколько полезных ролей в управлении строительным бизнесом: она предоставляет менеджерам согласованную структуру для понимания и развития бизнеса с точки зрения создания потребительской ценности [5].

Терминология бизнес-модели и четко определенные элементы бизнес-модели также предоставляют общий язык для обсуждения и обмена бизнес-моделями между членами организации и согласования их усилий. В свою очередь, четко определенные бизнес-модели обеспечивают основу для последовательной практики управления и разработки процессов, тем самым формируя реальные бизнес-модели, которые в конечном итоге определяют бизнес.

В настоящее время бизнес-модель рассматривается как неотъемлемая часть успешного бизнеса, так как ее главная цель – индивидуализировать компанию и дать ей преимущество перед конкурентами [4, 11–13].

Бизнес-модель определяет, как работает компания, как она создает ценность для своих клиентов и как может извлекать прибыль для себя.

Последние разработки в этой области исследований также привели к визуализации бизнес-модели, что приводит к лучшему пониманию различной бизнес-логики и того, как бизнес-модели используются в качестве эффективного инструмента управления для реализации стратегии.

При этом бизнес-модель требует постоянной адаптации к изменяющимся условиям внешней среды и как следствие – изменениям предпочтений потребителей.

На основании существующих исследований [2, 11–13] предлагается использовать структуру бизнес-модели для строительной компании, которую можно определить, как показано на рис. 2.

Структура бизнес-модели была ограничена выбором компонентов и переменных, по которым имеются данные.

Чтобы обеспечить четкое представление о создании и захвате ценности, в исследовании используются вопросы, следующие из Gassmann et al. (2014). Принят четырехмерный вопросник: «кто», «что», «как» и «ценность», мы будем использовать трехмерные вопросы: «кто», «что» и «как».

Измерение «кто» объясняет, кто целевой клиент. Поскольку каждая бизнес-модель обслуживает определенную группу клиентов, целевой клиент – одно из основных измерений в разработке бизнес-модели.



Рис. 2. Структура бизнес-модели  
Fig. 2. Business model structure

Измерение «что» отображает то, что предлагается целевому клиенту. Его можно определить как целостное представление о наборе проектов компании и услуги, представляющие ценность для клиента.

Измерение «как» описывает, как создать предложение и как заработать деньги.

Ключевые ресурсы используются для создания ценности, которую выполняет фирма относительно лучше, чем другие.

Получение дохода объединяет такие аспекты, как структура затрат и механизм получения и преумножения дохода.

В связи с этим предлагаемая модель бизнес-структуры имеет четыре бизнес-компоненты модели: целевой клиент, предложение, ключевые ресурсы и получение дохода. Особое внимание уделяется трехмерным вопросам: «кто», «что» и «как».

Целевой клиент описывает сегмент клиентов, которому компания стремится предложить ценность.

Предложение относится ко всему, что предлагается рынку, что может удовлетворить желание или потребность цели.

И в этой связи есть смысл обратиться к диверсификации в современных условиях. Диверсификации может помочь минимизировать риски и увеличивать доходность.

Ключевые ресурсы описывают, как создается предложение.

Ключевые ресурсы описывают наиболее важные активы, которые требуют создания предложения для целевого клиента и обычно отличаются от ключевых ресурсов, используемых конкурентами.

Подробнее рассмотрим людские, физические и финансовые ресурсы.

Человеческие ресурсы являются основным активом строительных компаний, играя важную роль в достижении конкурентного преимущества, потому что фирмы могут выбирать сотрудников с высокими способностями и обучать их созданию уникальных навыков, которые другим компаниям трудно воспроизвести, что может привести к устойчивому конкурентному преимуществу.

Физические ресурсы относятся к уровню сложности технологии, которой обладает фирма: оборудование, географическое положение и доступ к сырью.

Финансовые ресурсы характеризуют силу компании на рынке с точки зрения ее способности выполнять проекты. Наличие адекватных финансовых ресурсов позволяет компании справляться с рискованными ситуациями и иметь перспективу высокой доходности.

Получение дохода относится к тому, как деньги поступают в организацию. Этот компонент измеряет способность фирмы переводить ценность, которую она предлагает своим клиентам в деньги, генерируя поток доходов.

После того как основа бизнес-модели сформирована, следует переходить к ее более детальной проработке. Для большей информативности следует заполнить шаблон А. Остервальдера [3, 4].

И здесь уже необходимо обратить внимание на более широкий круг вопросов: будущую структуру расходов, взаимоотношения и поиск поставщиков, каналы общения и продвижения продуктов в целевом сегменте и т. д.

Таким образом, в общем виде алгоритм совершенствования бизнес-модели строительной компании можно представить следующим образом (рис. 3).

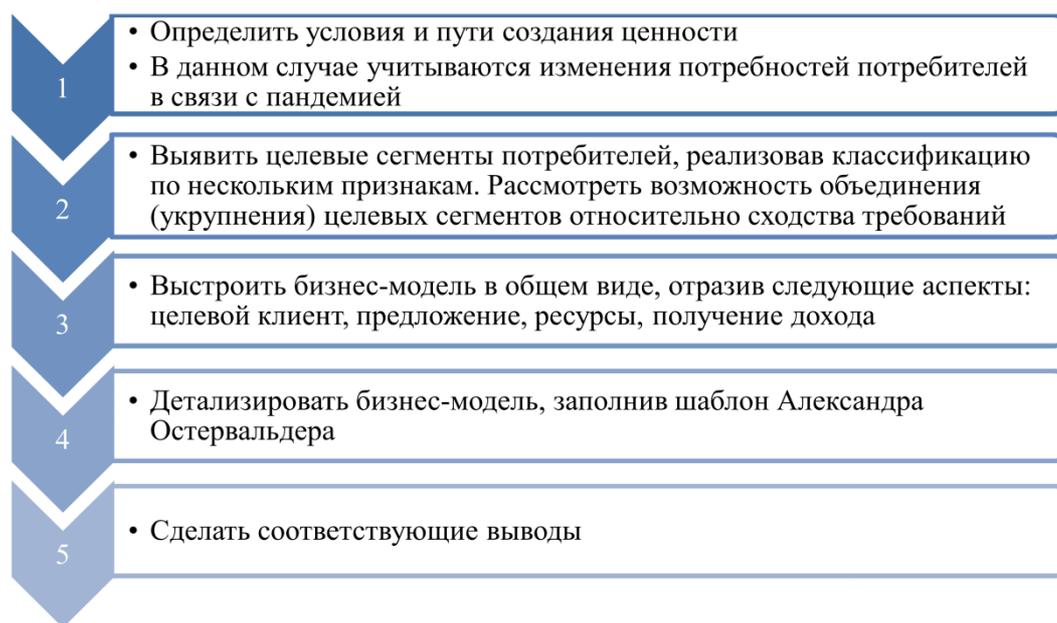


Рис. 3. Алгоритм совершенствования бизнес-модели  
Fig. 3. Algorithm for improving the business model

### Определение изменений в предпочтениях потребителей в сфере жилищного строительства

Поскольку люди во всем мире сталкиваются с реалиями самоизоляции, рассмотрим, как наши дома изменятся, когда пандемия коронавируса закончится (на основании мнений дизайнеров и архитекторов).

Жизнь после вспышки Covid-19 никогда не будет прежней. Мы в начале конца, ожидая нового начала. Планета Земля нарушит соглашение о сотрудничестве с человечеством, если мы не будем срочно пересматривать свое поведение.

Прогнозы появляются один за другим. Некоторые из них более оптимистичны, некоторые – нет. Но почти все согласны с тем, что, несмотря на столь беспрецедентный спад, человечество все же найдет в себе силы выздороветь.

Ценности изменятся, наша жизнь и привычки изменятся, и наши дома также изменятся под этим влиянием. Имея это в виду, рассмотрим семь направлений для изменений [14], которые могут произойти: дома, изменения в планировке, самодостаточность (коммуникации), фильтрация, домашний офис (WFH), озеленение, умные технологии.

#### *Дома, не квартиры*

Высотные здания были предназначены для организации как можно большего количества людей в одном месте. Здоровье и гигиена не рассматривались как приоритетные. Во времена пандемии необходимо было уменьшить контакт со всем, что используется в многоэтажных домах: лифтом, кнопками лифта, дверными ручками, поверхностями и прежде всего соседями.

После вынужденной самоизоляции на разных этажах над землей, часто без балкона или террасы, все хотят иметь дом. Он может быть небольшим, но с внутренним двором и террасой.

На протяжении всего времени основной функцией дома была безопасность. Сегодня людям нужен дом, который может эффективно обеспечить социальную изоляцию.

Дом теперь больше, чем побег от рутины и городского хаоса, предполагает убежище от вирусов и инфекций. Урбанизация делает шаг назад, когда мы переезжаем в пригороды города.

Для тех, кто постоянно готовится выжить в грядущем апокалипсисе, уже была характерна тенденция к укреплению зданий. Но теперь можно ожидать, что эта тенденция станет более распространенной.

Желание подготовить свой дом к природным или техногенным опасностям уже не вызывает удивления. Возле дома будет не только гараж, но и бункер или хотя бы укрепленный «минус» этаж с кладовой для еды и воды.

Мы также можем попрощаться с одной из главных тенденций последних лет: открытые пространства, объединяющие вход, гостиную, столовую и кухню. После пандемии входная зона будет разделена, чтобы можно было оставлять обувь, одежду и вещи в коридоре и не вносить грязь в жилые помещения.

### *Самодостаточность (коммуникаций)*

Здания будущего, вероятно, будут самодостаточными и независимыми, с собственным водоснабжением и отоплением. Геотермальные скважины уже набирают популярность. Помимо воды они могут частично обеспечить дом отоплением.

В качестве системы безопасности будет несколько других источников отопления: плита, камин, твердотопливный котел, генератор топлива, солнечные батареи. Автономные мини-станции, генерирующие альтернативную энергию, станут реальностью. Целью будет независимость от внешнего мира, минимизация рисков в случае полного отключения.

Спутниковый интернет в настоящее время является дорогостоящим и неудобным сервисом, доступным только определенным лицам и организациям, таким как морской транспорт, горнодобывающие и строительные компании и военные организации. В будущем будут ускорены разработки для гражданского использования, что обеспечит нам очень быстрый доступ к Интернету.

OneWeb и SpaceX уже планировали покрыть всю планету этой технологией до начала пандемии. OneWeb уже развернул 40 из запланированных 648 спутников на орбите Земли, в то время как проект Starlink компании SpaceX предусматривает запуск 12 000 спутников на низкую орбиту к середине 2020-х годов.

### *Фильтрация*

После пандемии отношение к системам фильтрации изменится, так как люди беспокоятся о том, что может произойти, если вирус попадет в водоснабжение.

Производители систем умного дома пойдут еще дальше. Их программы будут не только контролировать температуру воздуха в доме, но и его качество и, при необходимости, автоматически очищать его. Воздух снаружи будет, конечно, фильтроваться.

### *Дом как новый офис*

Во время карантина большинство были вынуждены работать из дома. После его окончания есть люди, кто не захочет возвращаться в офис. Больше внимания будет уделяться обустройству рабочего места дома. Пространственная организация изменится. Теперь это будет совершенно отдельная комната с большими окнами, плотными шторами и удобной мебелью. Он будет технически оборудован и звукоизолирован.

### *Умные технологии*

Переупорядочение после COVID-19 почти наверняка также будет иметь неожиданные исходные эффекты, в том числе то, как архитекторы представляют новое определение «дома» после нескольких месяцев укрытия людей на месте. Это примет форму более бесконтактных технологий в высотных зданиях, более широкое использование дистанционно доступных технологий, таких как замки, и проекты домов, созданные для #WFH (работа из дома).

«Теперь, когда Америка прошла ускоренный курс по работе на дому, я думаю, что она станет гораздо большей частью нашей повседневной жизни, – прогнозирует Роуз. – Могу поспорить,

что домашние офисы, которые приспособлены для существования цифровой работы, станут новейшими удобствами. Представьте себе, что его и ее домашние офисы готовы к вездесущей конференции Zoom, изобилующей зеленым экраном для вашего виртуального фона» [15].

McFeely из Compass считает, что долгосрочные последствия Covid-19 более значительны.

«Что касается социальных и культурных сдвигов, я думаю, что люди действительно осознают ценность дома, и никогда не было более очевидно, насколько важны наши дома, – говорит Макфили. – Я думаю, что недели и месяцы, которые мы проводим внутри, навсегда изменят наши представления о доме. Дом – это то, где мы сейчас едим, спим, играем, работаем и обучаемся. Те, кто продолжит работать из дома, могут быть настроены на работу и домашний офис. Наружные пространства, внутренние дворики могут теперь казаться необходимостью. И я думаю, что безопасность и чувство общности станут более важными».

*Городское хозяйство становится глобальным*

Раньше было модно заводить небольшие садики возле домов или на балконах, но теперь это будет бум. Доказано, что физическое взаимодействие с живыми растениями полезно для нашего психического здоровья.

Выращивание того, что вы едите, приятно и дает вам некоторую свободу от повседневности, особенно во время самоизоляции. Карантин, возможно, лучшее время, чтобы узнать больше о комнатных садах – как вырастить растения из семян и создать рацион питания, даже если вы живете в многоквартирном здании. В дополнение к производству пищи внутренние сады могут обеспечить кислородом. Тенденция к фитостенам существует уже много лет, но весь ее потенциал еще не исследован.

### **Применение предлагаемого алгоритма совершенствования бизнес-моделей для компаний сферы жилищного строительства**

*Сегментирование потребителей*

Ранее была отмечена важность сегментирования потребителей и создания ценностного предложения под каждый сегмент.

В настоящее время стоит говорить о необходимости более тщательной сегментации потребителей, основанной уже не на одном, а нескольких признаках.

Рассмотрим жилищное строительство.

Разумеется, есть смысл рассматривать трудоспособное население, имеющее постоянный или относительно постоянный доход, в принципе обладающее покупательной способностью жилья (возможно и на разных условиях – собственный капитал, ипотека, материнский капитал и пр.).

Кроме того, необходимо учитывать, что как правило покупательная способность зависит от возраста.

Поэтому в качестве признака для сегментации применим возрастной критерий и условно выделим следующие категории: люди среднего возраст (от 35 до 45 лет); молодежь (от 18 до 35 лет); люди старше среднего возраста (старше 45 лет).

Следует обратить внимание на потребности вышеуказанных категорий с учетом среднестатистического количественного и структурного состава семьи.

Также следует учитывать, что зачастую категория молодежь будет ориентирована на жилье для 1–3 человек (одинокое, семейные пары, семейные пары с ребенком), средний возраст – 3–5 человек (семейные пары, имеющие 1–3 ребенка), люди старшего возраста – 2–3 человека (семейные пары).

Наличие и перспектива маленьких детей также вносит коррективы при формировании ценностного предложения. Поэтому сегментацию целесообразно проводить с учетом потенциального состава семьи, выделяя одиноких, семейные пары и семьи с детьми.

При формировании укрупненных ценностных предложений может оказаться возможным и целесообразным объединение некоторых сегментов.

*Выявление перспективных технологий*

Рассмотрим более подробно перспективные технологии в соответствии с предпочтениями потребителей и проанализируем имеющийся мировой опыт (рис. 4).

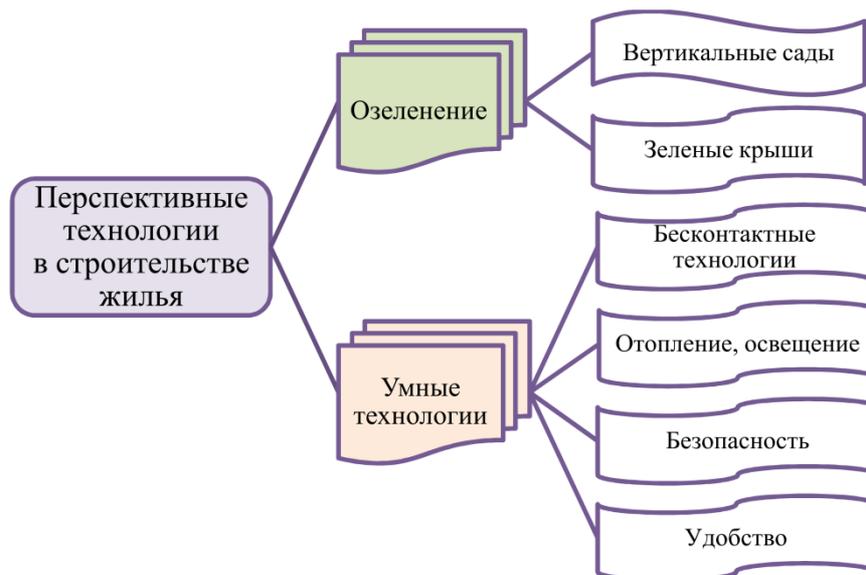


Рис. 4. Перспективные технологии для применения в жилищном строительстве  
 Fig. 4. Advanced technologies for use in housing construction

Потребности варьируются и изменяются в связи с пандемией. Формирование ценностного предложения компании в настоящее время должно быть направлено на удовлетворение изменившихся потребностей.

Выделим три категории потребителей и рассмотрим для них общую схему бизнес-моделей (табл. 1, рис. 5–7).

Сегментация потребителей в контексте жилищного строительства

Таблица 1

Segmentation of consumers in the context of housing construction

Table 1

	Одинокие	Семейные пары	Семьи с детьми
Молодежь			
Люди среднего возраста			
Люди старше среднего возраста			

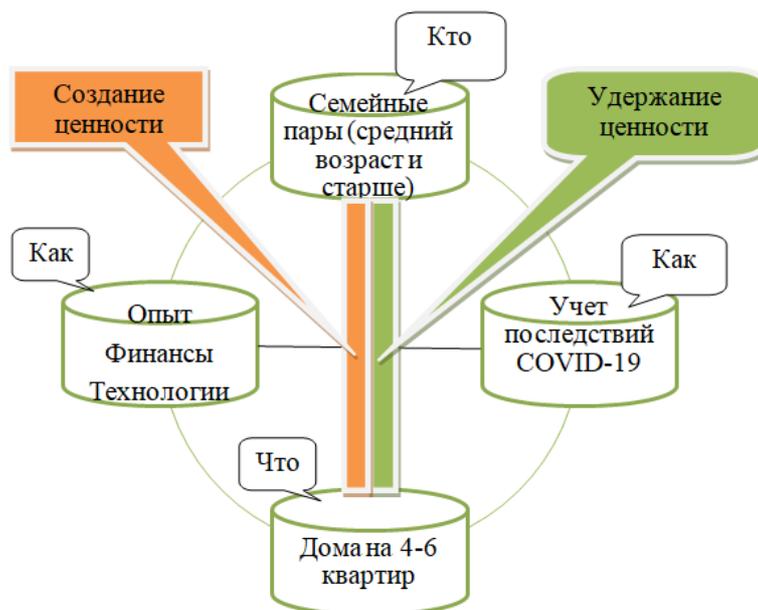


Рис. 5. Бизнес-модель для сегмента «Семейные пары (средний возраст и старше)»  
 Fig. 5. Business model for a segment “Middle-aged and older married couples”



Рис. 6. Бизнес-модель для сегмента «Семейные пары»  
Fig. 6. Business model for the segment “Couples”



Рис. 7. Бизнес-модель для сегмента «Молодежь»  
Fig. 7. Segment Business Model “Youth”

Далее рассмотрим более подробно основные аспекты реализации. Будем следовать структуре бизнес-модели Александра Остервальдера (табл. 2).

Из табл. 2 следует, что для того чтобы максимально удовлетворять потребности потребителей в современных условиях, компаниям целесообразно:

1) налаживать контакты с поставщиками «умных технологий» (внутридомовые и внутриквартирные) и «зеленых технологий» (озеленение), при выборе необходимо учитывать стоимость, так как экономическая ситуация в стране тяжелая и доходы населения имеют тенденцию к снижению. Не стоит забывать о необходимости обучения персонала для работы с новыми технологиями и информировании потенциальных потребителей;

2) создавать проекты ЖК с учетом спроса и на малоэтажное жилье;

3) при разработке проектов строительства учитывать необходимость создания социальной,

## Управление в социально-экономических системах

спортивной и культурной инфраструктуры в рамках ЖК (тренажерный зал, по возможности детский сад, супермаркет и пр.), особое внимание уделять озеленению территорий;

4) при создании проектов планировок квартир уделять внимание необходимости изоляции входной зоны и наличию условий для создания домашнего офиса.

Таблица 2

Детализация бизнес-модели по Александру Остервальдеру

Table 2

Detailing the business model according to Alexander Osterwalder

Основные партнеры	Основные направления деятельности	Предлагаемые преимущества	Отношения с клиентами	Сегменты клиентов
Компании-поставщики умных технологий и технологий вертикального и горизонтального озеленения	Популяризация и реализация малоэтажной застройки. Обеспечение возводимых зданий собственными коммуникациями, современными технологиями фильтрации, бесконтактными технологиями. Оснащение объектов необходимой инфраструктурой. Дополнительное озеленение. Учет при проектировании WFH	Удовлетворение потребностей клиентов с учетом пандемии и пост-пандемийного периода	Видеосеминары. Видеоконсультации. Онлайн-показы. Обратная связь через соц. сети	Молодежь. Семейные пары среднего возраста и старше. Семьи с детьми
	Основные ресурсы		Каналы	
	Финансы. Человеческие ресурсы. Новые технологии		Сайт. Социальные сети. Офисы продаж	
<b>Структура расходов</b>		<b>Потоки выручки</b>		
Освоение новых технологий в строительстве и оснащении домов и квартир (умные технологии, бесконтактные технологии, технологии озеленения). Разработка новых проектов (ЖК со всей необходимой инфраструктурой, ЖК, включающие малоэтажные здания, автономные системы отопления и пр., планировки с изолированной входной зоной и домашними офисами)		Доход от разовых сделок. Возможно введение сервиса для новых технологий и получение постоянного дохода (умные технологии и озеленение)		

Совершенствование бизнес-модели компании с учетом грамотного отношения к затратам и выбора надежных поставщиков в перспективе должно привести к увеличению прибыли организации и повышению эффективности ее деятельности.

### Заключение

Применение предложенного алгоритма позволило дать рекомендации по совершенствованию бизнес-модели в сфере жилищного строительства с учетом изменения предпочтений потребителей в связи с пандемией, в частности: популяризация и реализация малоэтажной застройки, обеспечение возводимых зданий собственными коммуникациями, современными технологиями фильтрации, бесконтактными технологиями, оснащение объектов необходимой инфраструктурой, дополнительное озеленение, учет при проектировании WFH.

### Литература

1. Технологическое предпринимательство. С чего начать – первые шаги / Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, Е.В. Баутина, С.А. Колодяжный: учеб. – Старый Оскол, 2020. – 400 с.
2. Технологическое предпринимательство. Движение вперед – рост и развитие / Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, Е.В. Баутина, С.А. Колодяжный: учеб. – Старый Оскол, 2020. – 380 с.
3. Остервальдер, А. Построение бизнес-моделей. Настольная книга стратега и новатора / А. Остервальдер. – М.: Альпина Паблицер, 2014. – 116 с.

4. Osterwalder, A. *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers* / A. Osterwalder, Y. Pigneur. – New York: John Wiley & Sons, 2010.

5. PwC. – <https://www.pwc.com/us/en/library/covid-19/coronavirus-impacts-engineering-construction.html> (дата обращения: 03.03.2021).

6. McKinsey&Company. – <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/meeting-ec-needs-in-and-after-coronavirus-a-qa-with-wsps-paul-dollin#> (дата обращения: 23.03.2021).

7. *Integrated Technology for Creating a Development Management Systems in the Field of Energy Saving* / V.N. Burkov, I.V. Burkova, T.A. Averina, O.S. Perevalova // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – Vol. 1258. – P. 588–600. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_51

8. *Factors of Sustainable Development of Energy Technologies in the Formation of Digital Economy* / E. Avdeeva, T. Davydova, O. Belyantseva, T. Makeeva // *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE-2019*. – 2020. P. 09045. DOI: 10.1051/e3sconf/202016409045

9. Авдеева, Е.А. Исследование факторов успешного развития предпринимательства за рубежом в условиях цифровой среды / Е.А. Авдеева // *Цифровая и отраслевая экономика*. – 2020. – № 1. – С. 87–90.

10. Авдеева, Е.А. Формирование гибкой рабочей среды как следствие цифровизации экономики / Е.А. Авдеева, Т.Е. Давыдова, А.В. Шульгин // *ФЭС: Финансы. Экономика*. – 2019. – Т. 16, № 11. – С. 12–16.

11. Chesbrough, H. *The Role of the Business Model in Capturing Value from Innovation* / H. Chesbrough, R.S. Rosenbloom. – Boston: Harvard Business School, 2000.

12. Johnson, M.W. *Seizing the White Space: Business Model Innovation for Growth and Renewal* / M.W. Johnson, A.G. Lafley. – Boston: Harvard Business Review Press, 2010.

13. Андрей Солянттэ. Бизнес-модели на основе многосторонних платформ – инновации, революционно преобразующие бизнес – [http://www.executive.ru/knowledge/announcement/1509147/index.php?PAGE\\_NAME=read&FID=10&TID=12729](http://www.executive.ru/knowledge/announcement/1509147/index.php?PAGE_NAME=read&FID=10&TID=12729) (дата обращения: 27.02.2021).

14. Sergey Makhno. *Life after coronavirus: how will the pandemic affect our homes?* – <https://www.dezeen.com/2020/03/25/life-after-coronavirus-impact-homes-design-architecture/> (дата обращения: 03.03.2021).

15. Forbes. – <https://www.forbes.com/sites/petertaylor/2020/04/12/what-will-americas-housing-market-look-like-after-the-coronavirus-pandemic-ends-heres-what-5-top-producing-real-estate-agents-had-to-say/#155331334952> (дата обращения: 03.03.2021).

**Аверина Татьяна Александровна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; ta\_averina@mail.ru.

**Баркалов Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; bsa610@yandex.ru.

**Крючкова Мария Александровна**, магистрант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; kruchkova\_mariya@mail.ru.

*Поступила в редакцию 5 апреля 2021 г.*

## IMPROVING THE BUSINESS MODEL OF A CONSTRUCTION COMPANY IN A PANDEMIC AND POST-PANDEMIC PERIOD

T.A. Averina, [ta\\_averina@mail.ru](mailto:ta_averina@mail.ru),

S.A. Barkalov, [bsa610@yandex.ru](mailto:bsa610@yandex.ru),

M.A. Kryuchkova, [kruchkova\\_mariya@mail.ru](mailto:kruchkova_mariya@mail.ru)

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

The COVID-19 pandemic has become a challenge and shock for the whole world. The way of life in various industries has changed. Adjustments are required to companies' business models for recovery and normal operation. During the pandemic, the construction industry also faced many challenges. **Research objective.** Develop an algorithm for improving the business models of construction companies, taking into account changes in consumer preferences in connection with the spread of COVID-19. **Materials and methods.** Methods of systems analysis, optimization methods and decision-making theory were applied in the work. The template for the formation of a business model was selected based on the analysis of existing research in this area. **Results.** It was revealed that in the current conditions, the management of construction companies require special attention from personnel, finances, and supply chains. The paper proposes an algorithm for improving the company's business model, which includes the following main stages: 1. Determine the conditions and ways of creating value. In this case, changes in consumer needs due to the pandemic are taken into account. 2. Identify target segments of consumers by implementing a classification based on several criteria. Consider the possibility of combining (consolidating) target segments in relation to the similarity of requirements. 3. Build a business model in general terms, reflecting the following aspects: target customer, offer, resources, income generation. 4. Detail the business model by filling in the Alexander Osterwalder template. 5. Make the appropriate conclusions. **Conclusion.** The developed algorithm is applied on the example of construction companies implementing projects in the field of housing construction. Needs vary and change due to the pandemic. The formation of the company's value proposition now must be aimed at meeting the changed needs. In particular, it was found that consumers are currently focused on buying houses, pay more attention to safety, environmental friendliness and autonomy of housing, and are ready to use smart technologies. It is worth noting the prospect of accounting in the developed layouts of apartments and houses, the possibility of equipping a home office (WFH) and separating the entrance area.

*Keywords: business model, management, construction companies, COVID-19 pandemic, crisis.*

### References

1. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V., Kolodyazhny S.A. *Tekhnologicheskoye predprinimatel'stvo. S chego nachat' – pervyye shagi* [Technological Entrepreneurship. How to Start – the First Steps]. Staryy Oskol, 2020. 400 p.
2. Averina T.A., Barkalov S.A., Bautina E.V., Kolodyazhny S.A. *Tekhnologicheskoye predprinimatel'stvo. Dvizheniye vpered – rost i razvitiye* [Technological Entrepreneurship. Moving forward – growth and development]. Staryy Oskol, 2020. 380 p.
3. Osterwalder A. *Postroyeniye biznes-modeley. Nastol'naya kniga stratega i novatora* [Building business models. Handbook of the Strategist and Innovator]. Moscow, Alpina Publisher, 2014, 116 p.
4. Osterwalder A., Pigneur Y. *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. New York: John Wiley & Sons, 2010.
5. PwC. Available at: <https://www.pwc.com/us/en/library/covid-19/coronavirus-impacts-engineering-construction.html> (accessed 03.03.2021).
6. McKinsey&Company. Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/meeting-ec-needs-in-and-after-coronavirus-a-qa-with-wsps-paul-dollin#> (accessed 23.03.2021).

7. Burkov V.N., Burkova I.V., Averina T.A., Perevalova O.S. Integrated Technology for Creating a Development Management Systems in the Field of Energy Saving. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, vol. 1258, pp. 588–600. DOI: 10.1007/978-3-030-57450-5\_51

8. Avdeeva E., Davydova T., Belyantseva O., Makeeva T. Factors of Sustainable Development of Energy Technologies in the Formation of Digital Economy. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE-2019*, 2020, p. 09045. DOI: 10.1051/e3sconf/202016409045

9. Avdeeva E.A. [Study of the Factors of Successful Development of Entrepreneurship Abroad in the Digital Environment]. *Digital and Sectoral Economics*, 2020, no. 1, pp. 87–90. (in Russ.)

10. Avdeeva E.A., Davydova T.E., Shulgin A.V. [Formation of a Flexible Working Environment as a Consequence of the Digitalization of the Economy]. *FES: Finance. Economy*, 2019, vol. 16, no. 11, pp. 12–16. (in Russ.)

11. Chesbrough H., Rosenbloom R.S. *The Role of the Business Model in Capturing Value from Innovation*. Boston, Harvard Business School, 2000.

12. Johnson M.W., Lafley A.G. *Seizing the White Space: Business Model Innovation for Growth and Renewal*. Boston, Harvard Business Review Press, 2010.

13. Andrey Soolyatte. *Biznes-modeli na osnove mnogostoronnikh platform – innovatsii, revolyutsionno preobrazuyushchiye biznes* [Business Models Based on Multilateral Platforms – Innovations that are Revolutionizing Business]. Available at: [http://www.executive.ru/knowledge/announcement/1509147/index.php?PAGE\\_NAME=read&FID=10&TID=12729](http://www.executive.ru/knowledge/announcement/1509147/index.php?PAGE_NAME=read&FID=10&TID=12729) (accessed 27.02.2021).

14. Sergey Makhno. Life after coronavirus: how will the pandemic affect our homes? Available at: <https://www.dezeen.com/2020/03/25/life-after-coronavirus-impact-homes-design-architecture/> (accessed 03.03.2021).

15. Forbes. Available at: <https://www.forbes.com/sites/petertaylor/2020/04/12/what-will-americas-housing-market-look-like-after-the-coronavirus-pandemic-ends-heres-what-5-top-producing-real-estate-agents-had-to-say/#155331334952> (accessed 03.03.2021).

*Received 5 April 2021*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Аверина, Т.А. Совершенствование бизнес-модели строительной компании в условиях пандемии и постпандемийный период / Т.А. Аверина, С.А. Баркалов, М.А. Крючкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 79–91. DOI: 10.14529/ctr210208

#### FOR CITATION

Averina T.A., Barkalov S.A., Kryuchkova M.A. Improving the Business Model of a Construction Company in a Pandemic and Post-Pandemic Period. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 79–91. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctr210208

## МОДЕЛЬ ЗАКРЕПЛЕНИЯ УЧЕНИКА ЗА НАСТАВНИКОМ В СИСТЕМЕ ОБУЧЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ОРГАНИЗАЦИИ

*О.С. Перезалова, С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, Д.Н. Батракова*

*Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия*

В данной статье речь идет о процессе наставничества, который взаимосвязан с такими функциями управления персоналом, как адаптация, мотивация и обучение. И в последнее время многие работодатели из множества альтернатив делают выбор именно в его пользу. **Цель исследования.** В работе рассматриваются основные функции наставничества, его практическая польза и области применения, а основное внимание будет направлено на вопрос, связанный с формированием пар наставников и учеников с целью достижения наибольшего эффекта от их взаимодействия. **Материалы и методы.** В процессе достижения цели исследования на начальном этапе планировалось решить вопрос закрепления ученика за наставником путем формирования наиболее «эффективных» пар наставников и учеников. Эти задачи решались с помощью венгерского метода. Но все полученные решения свидетельствовали об оптимальности любого решения этой задачи. Из этого был сделан вывод об отсутствии значимости в совмещении наставников и учеников, исходя из комплексной оценки их компетенций, навыков и др. Следствием полученного результата и анализа различных литературных источников стал вывод о том, что наиболее эффективным критерием составления пар «наставник – ученик» является совместимость (психологическая и социально-психологическая), наличие которой благоприятно отразится на эффективности взаимодействия наставника и ученика. Следовательно, отделу по управлению человеческими ресурсами необходимо помимо оценки компетенций, навыков и других параметров эффективности наставников и учеников, проводить оценку их психотипов и/или применять различные методы по определению совместимости участников процесса наставничества. **Результаты.** Основным результатом работы является механизм закрепления ученика за наставником и опровержение того факта, что «эффективность» наставников и учеников, т. е. балльная оценка их компетенций, навыков и качеств, может являться определяющим фактором при формировании пар наставников и учеников. **Заключение.** Итак, при формировании пар наставников и учеников, т. е. при распределении учеников по наставникам, предлагается ориентироваться на их психологическую и социально-психологическую совместимость.

*Ключевые слова:* наставничество, оценка персонала, закрепление наставников, совместимость, модель, алгоритм.

### Введение

Процедура наставничества не является новой идеей для нашей страны. Этот метод обучения персонала был очень популярен в советское время. Но впоследствии стали более популярны такие программы обучения, как стажировки, тренинги, коучинги и т. д. Однако в последнее время все больше работодателей возвращаются к столь знакомому нам методу обучения на рабочем месте – наставничеству [1]. Это объясняется высокой эффективностью метода, его экономичностью для организации, а также возможностью не только научить и удержать молодого специалиста, но и позволить действующим сотрудникам проявить себя в новой роли. В организациях его используют как для подготовки молодых специалистов, так и для повышения квалификации действующих [2–4].

Наставничество имеет практическую направленность и, как правило, осуществляется в индивидуальной форме. Для нового сотрудника наставник должен стать тем человеком, который не просто даст знания о рабочем процессе, но и вовлечет в корпоративную жизнь, привьет основы корпоративной культуры, поможет осознать принципы и ценности компании, сформирует к ней лояльное отношение. В целом можно сказать, что в отличие от других форм обучения в основе

наставничества лежат партнерские и доверительные отношения, конструктивный диалог и взаимовыгодное сотрудничество.

Под наставничеством понимается способ передачи профессиональных знаний и практических навыков от опытного сотрудника новичку.

Рассмотрим основные задачи, которые решает метод наставничества в организациях.

1. Введение новичка в корпоративную культуру, повышение его лояльности к компании, знакомство с коллективом. Все это позволяет задержать сотрудника в организации, уменьшает вероятность его быстрого ухода из компании.

2. Скорейшая интеграция нового сотрудника в организацию, создание у него мотивации для дальнейшей успешной работы, тем самым повышается эффективность его деятельности.

3. Система наставничества помогает избежать профессионального выгорания у опытных сотрудников, так как выполнение функций наставника является горизонтальным развитием карьеры и дает чувство значимости.

Таким образом, мы можем выделить пользу как для новичка, так и для самого наставника [5, 6].

Польза для наставника заключается в следующем:

1. Возможность показать свои навыки руководства, попасть в кадровый резерв на замещение более высоких должностей в случае необходимости.

2. Повышение личной мотивации за счет признания заслуг коллегами и руководством.

3. В процессе наставничества происходит систематизация имеющихся знаний и опыта.

4. Появляется возможность увидеть ранее незаметные проблемы и найти новые способы решения задач глазами ученика.

Пользой для ученика являются следующие моменты:

1. Наставник дает опору и поддержку, избавляет от страха перед новым местом работы и помогает наладить контакт с другими работниками. От понимания «профессионального опекуна» у новичка возрастает чувство ответственности перед компанией, появляется ощущение причастности к коллективу и к организации в целом [6].

2. Большинство новичков очень боятся совершать ошибки, из-за чего часто не могут в полной мере раскрыть свой потенциал. С грамотным наставником новый работник избавляется от этого страха и в целом испытывает меньше стресса в период адаптации.

3. За период наставничества ученик получает необходимые знания и навыки для дальнейшей работы, повышает уже имеющиеся профессиональные компетенции и осознает все особенности рабочего процесса в конкретной организации.

Стоит отметить, что метод наставничества как правило не является затратным для самой компании, при этом имеет ряд неоспоримых плюсов для всех участников данного метода, что делает его актуальным для использования практически в любой сфере [6, 7].

## 1. Описание подхода

Процедура наставничества предполагает операцию закрепления за учеником или учениками наставника (в нашем случае не более двух, так как процедура наставничества может стать неэффективной). Следовательно, имеет место задача распределения наставников по ученикам.

Пусть имеем множества наставников –  $H$  и учеников –  $U$  одинакового размера  $t$ , где каждый из элементов множества имеет оценку  $o_l$  и  $o_m$  соответственно, которая была получена на этапе предварительной оценки потенциальных наставников и учеников;  $l$  – число попыток, которое устанавливается организацией [8] (рис. 1).

Заметим: так как наставники и ученики оцениваются по одним и тем же параметрам [9, 10], то оценка ученика, естественно, должна быть меньше оценки наставника, иначе в процедуре наставничества нет смысла.

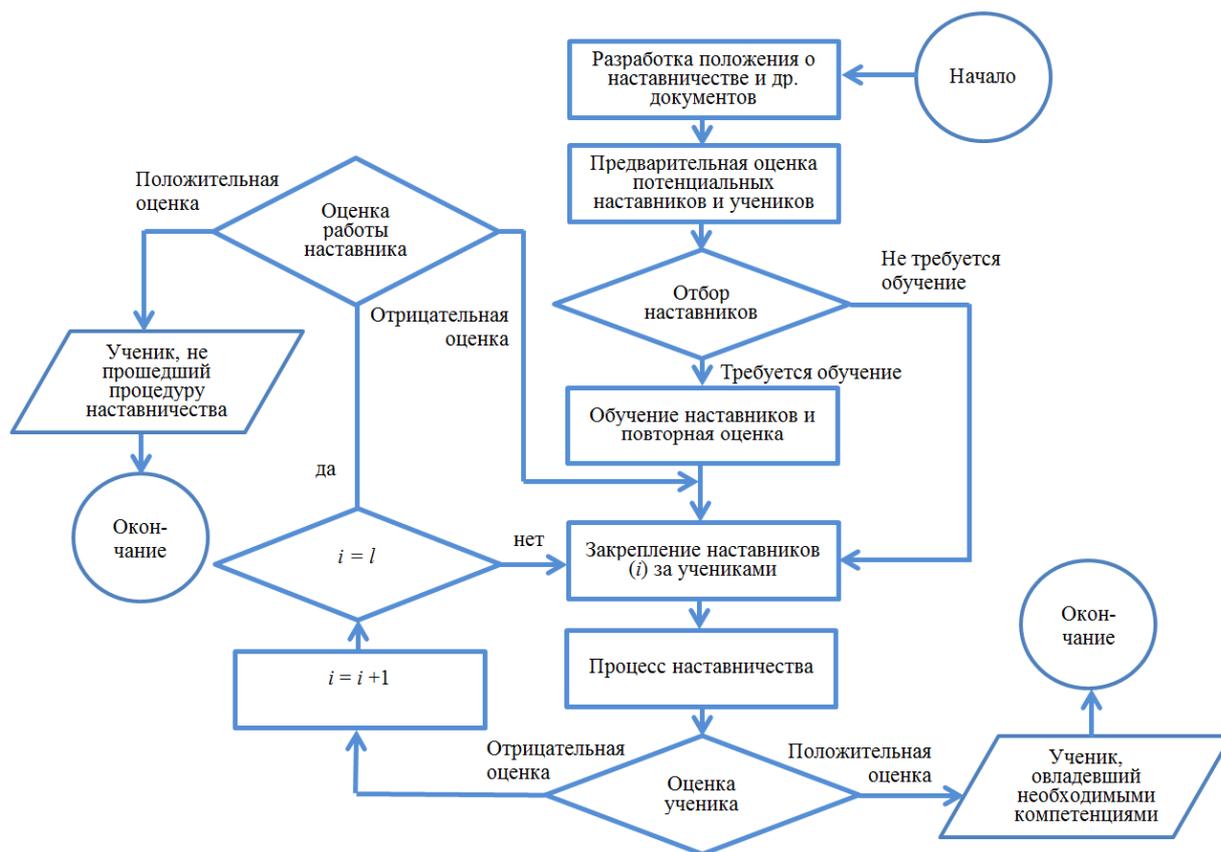


Рис. 1. Алгоритм внедрения системы наставничества в организации [8]  
 Fig. 1. Algorithm for implementing a mentoring system in an organization [8]

Необходимо распределить наставников по ученикам таким образом, чтобы разница между их оценками была минимальной:

$$F(X) = \sum_{l=1}^t \sum_{m=1}^t (o_l - o_m) \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$o_l > o_m; \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^t (x_{lm}) = 1, m \in U; \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^r (x_{lm}) = 1, l \in H; \quad (4)$$

$$x_{lm} \in \{0; 1\}, l \in H, m \in U. \quad (5)$$

То есть принцип распределения заключается в том, чтобы средний балл пары «наставник – ученик» стремился к максимуму:

$$\text{при } o_l - o_m \rightarrow \min, \frac{o_l + o_m}{2} \rightarrow \max. \quad (6)$$

Рассматриваемая задача является задачей о назначениях. Задача состоит в поиске минимальной суммы дуг во взвешенном двудольном графе.

Задачи данного типа можно решить с помощью венгерского метода.

Венгерский метод – один из многих алгоритмов, разработанный для решения линейной задачи о назначениях за полиномиальное время от числа работ (рис. 2).

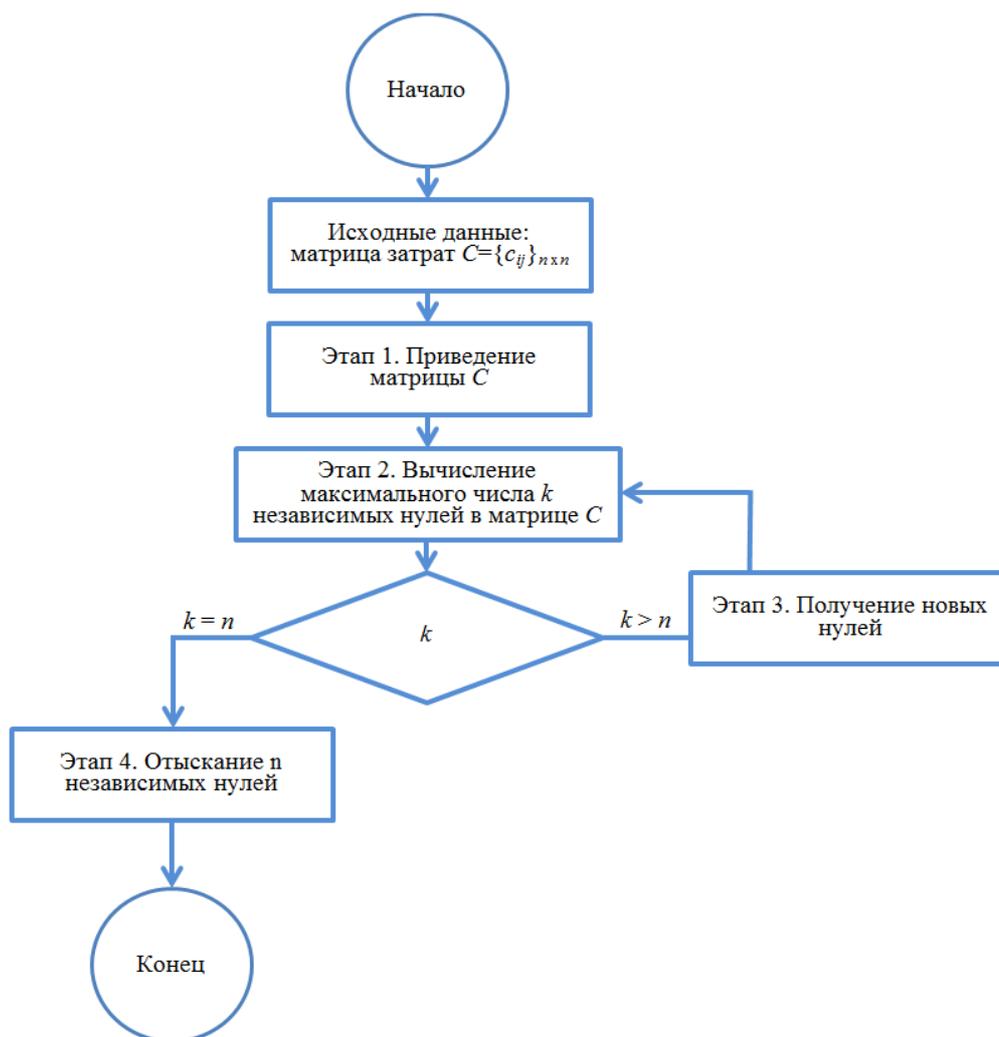


Рис. 2. Алгоритм венгерского метода [11]  
Fig. 2. Algorithm of the Hungarian method [11]

На третьем этапе алгоритма нужно преобразовать матрицу по правилу:

$$c_{ij}^{(k+1)} = \begin{cases} c_{ij}^{(k)} - \gamma, & \text{(незачеркнутые)} \\ c_{ij}^{(k)}, & \text{(зачеркнутые один раз)} \\ c_{ij}^{(k)} + \gamma, & \text{(зачеркнутые два раза)} \end{cases} \quad (7)$$

где  $\gamma = \min c_{ij}$  – минимальное число из незачеркнутых элементов;

$c_{ij}^{(k)}$  – незачеркнутые элементы матрицы;

$c_{ij}^{(k)}$  – элементы матрицы, зачеркнутые один раз;

$c_{ij}^{(k)}$  – элементы матрицы, зачеркнутые дважды.

## 2. Практические расчеты

Рассмотрим следующий абстрактный пример.

*Пример 1.*

В организации имеется необходимость проведения процедуры наставничества 6 учеников. Организация имеет для этого достаточный штат наставников. Оценки учеников и наставников приведены в табл. 1. Напомним, что для оценивания предлагается использовать десятибалльную шкалу.

Таблица 1

Исходные данные к примеру 1  
(оценки наставников и учеников), в баллах

Table 1

Initial data for example 1  
(assessments of mentors and students), in points

№ п/п	Оценка наставника ( $o_l$ )	Оценка ученика ( $o_m$ )
1	9	5
2	8	6
3	8	4
4	9	6
5	7	4
6	10	3

Решение.

Рассчитаем разность оценок всех возможных пар «наставник – ученик»:

$$o_l - o_m. \tag{8}$$

То есть для первого наставника значения (8) будут следующими: если он будет в паре с первым учеником, то  $o_1 - o_1 = 9 - 5 = 4$ , если со вторым –  $o_1 - o_2 = 9 - 6 = 3$ , если с третьим –  $o_1 - o_3 = 9 - 4 = 5$  и т. д.

Результаты записываем в первой строке матрицы. Далее проводим такие же расчеты для каждого куратора. Результаты всех расчетов представлены в матрице:

$$\begin{pmatrix} 4 & 3 & 5 & 3 & 5 & 6 \\ 3 & 2 & 4 & 2 & 4 & 5 \\ 3 & 2 & 4 & 2 & 4 & 5 \\ 4 & 3 & 5 & 3 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 3 & 1 & 3 & 4 \\ 5 & 4 & 6 & 4 & 6 & 7 \end{pmatrix}. \tag{9}$$

Применим венгерский алгоритм для нахождения оптимального распределения учеников по наставникам.

Этап 0 (приведение исходной матрицы).

$$\begin{pmatrix} 4 & 3 & 5 & 3 & 5 & 6 \\ 3 & 2 & 4 & 2 & 4 & 5 \\ 3 & 2 & 4 & 2 & 4 & 5 \\ 4 & 3 & 5 & 3 & 5 & 6 \\ 2 & 1 & 3 & 1 & 3 & 4 \\ 5 & 4 & 6 & 4 & 6 & 7 \end{pmatrix} \begin{matrix} |3 \\ |2 \\ |2 \\ |3 \\ |1 \\ |4 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 2 & 3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{10}$$

Следовательно, любое решение этой задачи будет оптимальным, т. е. давать план распределения наставников по ученикам такой, что сумма разностей оценки пар «наставник – ученик» будет минимальной.

Замечание. Стоит отметить, что решение задачи в такой постановке всегда дает аналогичный ответ.

Рассмотрим еще один пример (пример 2).

*Пример 2.*

В организации имеется необходимость проведения процедуры наставничества 6 учеников. Организация имеет для этого достаточный штат наставников. Оценки учеников и наставников приведены в табл. 2. Напомним, что для оценивания предлагается использовать десятибалльную шкалу.

Таблица 2

Исходные данные к примеру 2  
(оценки наставников и учеников), в баллах

Table 2

Initial data for example 2  
(assessments of mentors and students), in points

№ п/п	Оценка наставника ( $o_l$ )	Оценка ученика ( $o_m$ )
1	9	5
2	8	6
3	8	4
4	9	6
5	7	4
6	10	3

Необходимо распределить наставников по ученика таким образом, чтобы разница между их оценками была минимальной:

$$F(X) = \sum_{l=1}^t \sum_{m=1}^t \left( \frac{o_l + o_m}{2} \cdot (-1) \right) \rightarrow \min; \quad (11)$$

$$o_l > o_m; \quad (12)$$

$$\sum_{l=1}^t (x_{lm}) = 1, m \in U; \quad (13)$$

$$\sum_{m=1}^r (x_{lm}) = 1, l \in H; \quad (14)$$

$$x_{lm} \in \{0; 1\}, l \in H, m \in U. \quad (15)$$

То есть принцип распределения заключается в том, чтобы средний балл пары «наставник – ученик» стремился к максимуму.

Решение.

Составляем исходную матрицу, состоящую из средних баллов пар «наставник – ученик»:

$$\begin{pmatrix} -7 & -7,5 & -6,5 & -7,5 & -6,5 & -6 \\ -6,5 & -7 & -6 & -7 & -6 & -5,5 \\ -6,5 & -7 & -6 & -7 & -6 & -5,5 \\ -7 & -7,5 & -6,5 & -7,5 & -6,5 & -6 \\ -6 & -6,5 & -5,5 & -6,5 & -5,5 & -5 \\ -7,5 & -8 & -7 & -8 & -7 & -6,5 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Применим венгерский алгоритм для нахождения оптимального распределения учеников по наставникам.

Этап 0 (приведение исходной матрицы).

$$\begin{pmatrix} -7 & -7,5 & -6,5 & -7,5 & -6,5 & -6 \\ -6,5 & -7 & -6 & -7 & -6 & -5,5 \\ -6,5 & -7 & -6 & -7 & -6 & -5,5 \\ -7 & -7,5 & -6,5 & -7,5 & -6,5 & -6 \\ -6 & -6,5 & -5,5 & -6,5 & -5,5 & -5 \\ -7,5 & -8 & -7 & -8 & -7 & -6,5 \end{pmatrix} \begin{matrix} -7,5 \\ -7 \\ -7 \\ -7,5 \\ -6,5 \\ -8 \end{matrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0,5 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1,5 \\ 0,5 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1,5 \\ 0,5 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1,5 \\ 0,5 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1,5 \\ 0,5 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1,5 \\ 0,5 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1,5 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

Следовательно, любое решение этой задачи будет оптимальным, т. е. давать план распределения наставников по ученикам такой, что сумма разностей оценки пар «наставник – ученик» будет минимальной.

Так как все рассмотренные примеры предполагают распределение наставников по ученикам на основании оценок эффективности работы наставника или среднего балла (оценки) наставника и ученика с целью минимизации или максимизации рассматриваемого параметра и дают ответ (10), то было выдвинуто предположение, что распределять наставников по ученикам, исходя из их «эффективности», не имеет смысла. Поэтому было выдвинуто предложение при распределении учеников по наставникам руководствоваться их совместимостью для налаживания между ними наиболее результативных взаимоотношений.

Будем рассматривать совместимость как такое сочетание социально-психологических свойств, при котором обеспечивается максимально эффективное сосуществование контактирующих людей [12].

Понятие совместимости необходимо при изучении всех видов межличностных и межгрупповых коммуникаций, особенно в сфере наставничества. Было выявлено, что слаженность действий и оптимальный результат достигаются именно при наилучшем взаимоотношении субъектов. В случаях, когда не удается наладить благоприятное взаимодействие, эффективность процесса трудовой деятельности заметно ухудшается [13].

Можно выделить три вида совместимости (рис. 3). В организациях делается упор на психологическую и социально-психологическую совместимость.

Психофизиологическая совместимость подразумевает определенное сходство психофизиологических характеристик людей и на этой основе согласованность их сенсомоторных реакций, синхронизацию темпа совместной деятельности

Социально-психологическая совместимость является следствием оптимального сочетания типов поведения людей в группах, а также общности их социальных установок, потребностей и интересов, ценностных ориентаций

Психологическая совместимость – характеристика длительного взаимодействия между двумя и более индивидами, при котором проявления свойственных данным индивидам устойчивых черт характера не приводят к длительным и неразрешимым без внешнего вмешательства противоречиям

**Рис. 3. Виды совместимости**  
**Fig. 3. Types of compatibility**

Для того чтобы группы «наставник – ученик» не распались и минимизировать число конфликтов в группе, руководителю / ответственному работнику отдела по управлению человеческими ресурсами необходимо знать социально-психологические и психологические особенности взаимоотношений в них.

Способы оценки разных видов совместимости сотрудников [14] представлены на рис. 4.

Проведение психогеометрических тестов

Исследование психотипа сотрудников

Исследование совместимости сотрудников при распределении обязанностей – командных ролей

Исследование совместимости по эмоциональному и социальному интеллекту сотрудников

Исследование совместимости по гороскопу, дате рождения и соционическим типам и др.

**Рис. 4. Способы оценки разных видов совместимости**  
**Fig. 4. Methods for assessing different types of compatibility**

Способами сбора информации при исследовании совместимости будут тестирование, опрос (анкетирование и интервьюирование) и непосредственный осмотр (наблюдение за сотрудником).

Как нам уже удалось выяснить, при совместной работе один из важнейших критериев успеха – гармоничные отношения между сотрудниками. От психологического климата в коллективе зависит уровень самоотдачи, желание приходить на работу и делиться идеями. Важным моментом является то, что при благоприятных взаимоотношениях люди готовы более открыто говорить и более внимательно слушать, благодаря чему появляется возможность рассмотреть задачу с разных сторон. Помимо этого, поддержка коллег дает чувство уверенности, позволяющее раскрыться сотруднику в полной мере.

Один из факторов формирования сплоченной команды – это общая цель, к которой стремится каждый из участников. Цель должна быть поставлена максимально понятно и давать представления о том, каким будет результат. В ряде случаев общая цель может быть разбита на небольшие задачи, поэтапное решение которых приближает команду к достижению цели [13].

Помимо общей цели обязательным компонентом психологической структуры совместной деятельности является общий мотив, т. е. участники должны иметь стимул работать именно вместе, в существующем коллективе (важно помнить, что наличие общего мотива не лишает участников индивидуальных мотивов)

Еще один компонент – совместные действия, которые направлены на решение задач общей деятельности. Могут быть как групповыми, так и индивидуальными, но обязательно должны быть направлены на достижение общей цели.

Завершающим компонентом структуры совместной деятельности является общий результат, достигнутый участниками [15].

Схематично ее можно представить следующим образом (рис. 5).

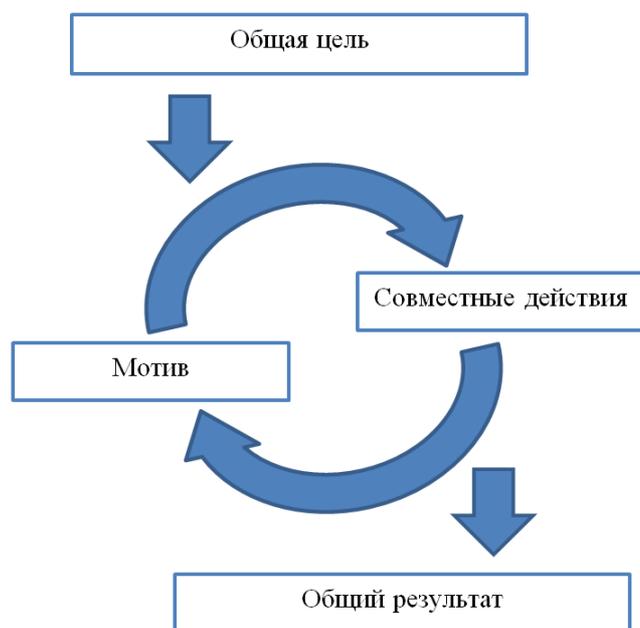


Рис. 5. Схема понятия «совместная деятельность»  
Fig. 5. Scheme of the concept of “joint activities”

Итак, для формирования пар «наставник – ученик» определяющим моментом должна быть психологическая совместимость, следовательно, отделу по управлению человеческими ресурсами не следует пренебрегать исследованием этого параметра у участников процесса наставничества, так как от этого будет зависеть его эффективность.

В том случае, когда программа наставничества внедряется в небольшой организации, сотрудники HR-отдела могут самостоятельно составить списки потенциальных наставников, провести с ними собеседование, психологические тесты на совместимость и закрепить за наставником ученика.

Если компания большая и имеет филиалы в разных городах, то стоит рассмотреть вариант внедрения специального программного обеспечения, с помощью которого может быть произведен анализ профилей учеников и предложены варианты составления пар.

Некоторые специалисты предлагают использовать технику «Быстрые свидания», она будет уместна в тех случаях, когда претендентов несколько и они не знакомы друг с другом заранее. Как правило, этот метод воспринимается как некий игровой процесс, что позволяет чувствовать себя более расслабленно как потенциальным наставникам, так и ученикам. Общение длительностью 5–15 минут поможет составить первое представление друг о друге и «отсеять» нежелательную для кого-то пару.

Благоприятные отношения, которые при правильном подходе выстраиваются между учениками и наставником, позволяют раскрыть молодого специалиста, создать комфортную рабочую обстановку и, возможно, «вырастить» будущего лидера.

### Заключение

Наставничество является эффективным методом внедрения в рабочий процесс для организации любого масштаба. Особенно актуально применять его в случаях, когда:

- на предприятии высокая текучка кадров, особенно среди молодых специалистов;
- сфера деятельности предполагает высокую степень риска, требует время для вхождения в должность и необходимо минимизировать ошибки (например, медицина);
- проект является новым или даже уникальным, и от сотрудников требуются особые знания и навыки;
- сфера деятельности предполагает быстро меняющиеся технологические платформы (например, IT-сфера).

В любом случае наставничество будет являться плюсом для организации. Ведь помимо «взращивания» нового сотрудника под нормы и стандарты компании оно помогает мотивировать и пробуждать угасающий интерес у уже состоявшихся специалистов (наставников). Однако стоит еще раз отметить, что положительный эффект будет ощутим лишь при грамотной организации этого процесса.

### Литература

1. Авдеева, Е.А. Формирование гибкой рабочей среды как следствие цифровизации экономики / Е.А. Авдеева, Т.Е. Давыдова, А.В. Шульгин // ФЭС: Финансы. Экономика. – 2019. – Т. 16, № 11. – С. 12–16.
2. Первалова, О.С. Наставничество – инструмент профессиональной и социально-психологической адаптации кадров в организации / О.С. Первалова, Л.В. Шевченко, Д.Н. Батракова // Научный журнал «Проектное управление в строительстве». – 2020. – № 1 (18). – С. 114–123.
3. Умное управление проектами / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, Я.Д. Гельруд и др. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2019. – 189 с.
4. Averina, T.A. Evaluation and Suggestions for Improving the System of Training and Education of Industrial Personnel on the Basis of Foreign Experience / T.A. Averina, E.A. Avdeeva, V. Priz // Society. Integration. Education. Proceedings of the International Scientific Conference. – 2019. – P. 28–41. DOI: 10.17770/sie2019vol6.3728
5. Давыдова, Т.Е. Человеческий потенциал в стратегии развития региона: мотивация деятельности субъектов вузов / Т.Е. Давыдова, С.А. Баркалов // Экономика и менеджмент систем управления. – 2019. – № 4 (34). – С. 32–39.
6. Одегов, Ю.Г. Кадровая политика и кадровое планирование: учеб. и практикум для академ. бакалавриата / Ю.Г. Одегов, М.Г. Лабаджян. – М.: Юрайт, 2016. – 444 с.
7. Averina, T. Introduction of Management Innovations in the Work of Municipal Organizations / T. Averina, E. Avdeeva, O. Perevalova // MATEC Web of Conferences. Conference Proceedings. – 2018. – 01121. DOI: 10.1051/mateconf/201817001121
8. Баутина, Е.В. Алгоритм внедрения системы наставничества в организации / Е.В. Баутина, О.С. Первалова, Д.Н. Батракова // Научный журнал «Проектное управление в строительстве». – 2020. – № 3 (20). – С. 85–91.

9. Бондаренко, Ю.В. Двухкритериальная задача формирования пакета тестов для отбора персонала / Ю.В. Бондаренко, Т.А. Свиридова, О.В. Бондаренко / Научный журнал «Управление строительством». – 2019. – № 3 (16). – С. 82–87.

10. Разработка практико-ориентированного алгоритма формирования интегральной оценки компетентности выпускников образовательных направлений / Т.В. Азарнова, Т.Н. Гоголева, А.Г. Гусева и др. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2018. – № 4. – С. 119–131.

11. Медведев, С.Н. Задача о назначениях с дополнительными ограничениями / С.Н. Медведев, О.А. Медведева. – Воронеж: Издат. дом ВГУ, 2015. – 37 с. – <https://rucont.ru/efd/590423>

12. Выбор методов оценки при формировании кадрового состава проектных команд / Ю.В. Бондаренко, И.С. Никитин, Н.Ю. Калинина, А.М. Ходунов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 116–124. DOI: 10.14529/ctcr200211

13. Горелов, Н.А.. Управление человеческими ресурсами: современный подход: учеб. и практикум для академ. бакалавриата / Н.А. Горелов, Д.В. Круглов, О.Н. Мельников. – М.: Юрайт, 2016. – 270 с.

14. Методический инструментарий по формированию кадрового состава государственной гражданской службы Российской Федерации Версия 3.1 / Российская ассоциация правовой информации ГАРАНТ – <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72098548/>

15. Базаров, Т. Ю. Психология управления персоналом: учеб. и практикум для академ. бакалавриата / Т.Ю. Базаров. – М.: Юрайт, 2016. – 182 с.

**Перевалова Ольга Сергеевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; [nilga.os\\_vrn@mail.ru](mailto:nilga.os_vrn@mail.ru).

**Баркалов Сергей Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; [bsa610@yandex.ru](mailto:bsa610@yandex.ru).

**Калинина Наталия Юрьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

**Батракова Дарья Николаевна**, магистрант факультета экономики, менеджмента и информационных технологий, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; [daria.speckadr@gmail.com](mailto:daria.speckadr@gmail.com).

Поступила в редакцию 5 апреля 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210209

## MODEL FOR ASSIGNING A PUPIL TO A MENTOR IN THE STAFF TRAINING SYSTEM OF THE ORGANIZATION

**O.S. Perevalova**, [nilga.os\\_vrn@mail.ru](mailto:nilga.os_vrn@mail.ru),

**S.A. Barkalov**, [bsa610@yandex.ru](mailto:bsa610@yandex.ru),

**N.Yu. Kalinina**,

**D.N. Batrakova**, [daria.speckadr@gmail.com](mailto:daria.speckadr@gmail.com)

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

This article will focus on the mentoring process, which is interconnected with such HR functions as adaptation, motivation and training. And recently, many employers from a variety of alternatives have made a choice in its favor. **Aim.** The work examines the main functions of mentoring, its practical benefits and areas of application, and the main attention will be focused on the issue associated with the formation of pairs of mentors and students in order to achieve the greatest effect from

their interaction. **Materials and methods.** In the process of achieving the research goal at the initial stage, it was planned to solve the problem of assigning a student to a mentor by forming the most “effective” pairs of mentors and students. These tasks were solved using the Hungarian method. But all the solutions obtained testified to the optimality of any solution to this problem. From this, it was concluded that there was no significance in combining mentors and students, based on a comprehensive assessment of their competencies, skills, etc. As a consequence of the result obtained and analysis of various literary sources, it was concluded that the most effective criterion for composing pairs “mentor – teaching” is compatibility (psychological and socio-psychological), the presence of which will favorably affect the effectiveness of the interaction between the mentor and the student. Consequently, the human resource management department needs, in addition to assessing the competencies, skills and other parameters of the effectiveness of mentors and students, to assess their psychotypes and/or apply various methods to determine the compatibility of the participants in the mentoring process. **Results.** The main result of the work is a mechanism for securing a student for a mentor and a refutation of the fact that the “effectiveness” of mentors and students, i.e. a point assessment of their competencies, skills and qualities can be a determining factor in the formation of pairs of mentors and students. **Conclusion.** So, when forming pairs of mentors and students, i.e. distribution of students by mentors, it is proposed to focus on their psychological and socio-psychological compatibility.

*Keywords: mentoring, personnel assessment, mentoring, compatibility, model, algorithm.*

### References

1. Avdeeva E.A., Davydova T.E., Shulgin A.V. [Formation of a Flexible Working Environment as a Consequence of the Digitalization of the Economy] *FES: Finance. Economy* [FES: Finance. Economy], 2019, vol. 16. no. 11. pp. 12–16. (in Russ.)
2. Perevalova O.S., Shevchenko L.V., Batrakov D.N. [Mentoring is a tool for professional and socio-psychological adaptation of personnel in an organization]. *Nauchnyy zhurnal “Proyektnoye upravleniye v stroitel'stve”* [Scientific journal “Project management in construction”], 2020, no. 1 (18), pp. 114–123. (in Russ.)
3. Barkalov S.A., Burkov V.N., Gelrud Ya.D., Gollay A.V., Loginovskiy O.V., Shestakov A.L. *Umnoye upravleniye proyektami* [Smart project management]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2019. 189 p.
4. Averina T.A., Avdeeva E.A., Priz V. Evaluation and Suggestions for Improving the System of Training and Education of Industrial Personnel on the Basis of Foreign Experience. *Society. Integration. Education. Proceedings of the International Scientific Conference*, 2019, pp. 28–41. DOI: 10.17770/sie2019vol6.3728
5. Davydova T.E., Barkalov S.A. [Human potential in the development strategy of the region: motivation of the activities of the subjects of universities]. *Ekonomika i menedzhment sistem upravleniya* [Economics and management of control systems], 2019, no. 4 (34), pp. 32–39. (in Russ.)
6. Odegov Yu.G., Labadzhyan M.G. *Kadrovaya politika i kadrovoye planirovaniye: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Personnel policy and personnel planning: textbook and workshop for academic undergraduate]. Moscow, Yurayt Publ., 2016, 444 p.
7. Averina T., Avdeeva E., Perevalova O. Introduction of Management Innovations in the Work of Municipal Organizations. MATEC Web of Conferences. Conference Proceedings, 2018, 01121. DOI: 10.1051/mateconf/201817001121
8. Bautina E.V., Perevalova O.S., Batrakov D.N. [Algorithm for the implementation of the mentoring system in the organization]. *Nauchnyy zhurnal “Upravlenie stroitel'stvom”* [Scientific journal “Project management in construction”], 2020, no. 3 (20), pp. 85–91. (in Russ.)
9. Bondarenko Yu.V., Sviridova T.A., Bondarenko O.V. [Two-criteria problem of forming of the test package for selection of personnel]. *Nauchnyy zhurnal “Upravlenie stroitel'stvom”* [Scientific journal “Project management in construction”], 2019, no. 3 (16), pp. 82–87. (in Russ.)
10. Azarnova T.V., Gogoleva T.N., Guseva A.G., Demidova A.S. [Development of the praktiko-focused algorithm of formation of integrated assessment of competence of graduates of the educational directions]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyy analiz i informatsionnyye tekhnologii* [Messenger of Voronezh State University. Series: System analysis and information technologies], 2018, no. 4, pp. 119–131. (in Russ.)

11. Medvedev S.N., Medvedev O.A. *Zadacha o naznacheniyakh s dopolnitel'nymi ogranicheniyami* [The assignment problem with additional restrictions. Voronezh, Voronezh State University Publishing House, 2015. 37 p. Available at: <https://rucont.ru/efd/590423>

12. Bondarenko Yu.V., Nikitin I.S., Kalinina N.Yu., Khodunov A.M. Selection of Evaluation Methods when Forming Personnel of Project Teams. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 116–124. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr200211

13. Gorelov N.A., Kruglov D.V., Melnikov O.N. *Upravleniye chelovecheskimi resursami: sovremennyy podkhod: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Human Resource Management: A Modern Approach: A Textbook and Workshop for Academic Bachelor's Degree]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 270 p. Series: Bachelor. Academic course.

14. *Metodicheskiy instrumentariy po formirovaniyu kadrovogo sostava gosudarstvennoy grazhdanskoy sluzhby Rossiyskoy Federatsii Versiya 3.1* [Methodological tools for the formation of the staff of the state civil service of the Russian Federation Version 3.1]. Russian Association of Legal Information GARANT. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72098548/>

15. Bazarov T.Yu. *Psikhologiya upravleniya personalom: uchebnik i praktikum dlya akademicheskogo bakalavriata* [Psychology of personnel management: textbook and workshop for academic undergraduate]. Moscow, Yurayt Publ., 2016. 182 p.

*Received 5 April 2021*

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Модель закрепления ученика за наставником в системе обучения персонала организации / О.С. Перевалова, С.А. Баркалов, Н.Ю. Калинина, Д.Н. Батракова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 92–103. DOI: 10.14529/ctcr210209

#### FOR CITATION

Perevalova O.S., Barkalov S.A., Kalinina N.Yu., Batrakova D.N. Model for Assigning a Pupil to a Mentor in the Staff Training System of the Organization. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 92–103. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210209

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВАЛОВОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ПРОДУКТА

**А.В. Кутышкин**

*Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, Россия*

Валовой региональный продукт является ключевым макроэкономическим показателем, который характеризует развитие региональной социально-экономической системы. Моделирование динамики данного показателя как конечного продукта экономической системы предполагает также разработку моделей изменения значений агрегированных факторов затрат, связанных с его производством. Одним из направлений использования разработанных моделей является формирование краткосрочных прогнозов непосредственно значений валового регионального продукта и обуславливающих их значений факторов затрат труда и капитала региональной экономики. **Цель исследования:** моделирование динамики значения валового продукта региональной экономики Ямало-Ненецкого автономного округа на основе односекторной модели Р. Солоу для формирования краткосрочных прогнозов значения данного показателя. **Материалы и методы.** Используется односекторная модель экономического роста Р. Солоу, в которой функционирование региональной экономики описывается двухфакторными неоклассическими функциями с постоянной эластичностью замещения факторов затрат производства. Идентификация производственных функций осуществляется на ретроспективных последовательностях индексов валового регионального продукта и факторов затрат региональной экономики. Краткосрочное прогнозирование величины валового продукта региональной экономики осуществляется с использованием производственной функции, обеспечивающей лучшее приближение ретроспективных данных временного интервала, предшествующего году прогнозирования. **Результаты.** Построены неоклассические двухфакторные производственные функции с постоянной эластичностью замещения факторов затрат региональной экономики Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) для периода с 2001 по 2018 г. Рассчитаны значения валового регионального продукта и среднегодовой численности занятых в экономике ЯНАО для 2017–2019 гг., которые сопоставлялись с соответствующими данными, публикуемыми Росстатом РФ, и прогнозными значениями, публикуемыми региональной администрацией. **Заключение.** Установлено, что используемые производственные функции дают приемлемые оценки аппроксимации фактических значений валового регионального продукта рассматриваемой региональной экономики на рассмотренном временном интервале. Модификация моделей изменения значений факторов затрат дала возможность повысить точность краткосрочных прогнозов как непосредственно значений валового регионального продукта, так и значений факторов затрат труда и капитала.

*Ключевые слова:* региональная экономика, валовой региональный продукт, моделирование динамики факторов затрат, производственные функции.

### Введение

Моделирование функционирования региональной экономики предполагает оценку динамики таких макроэкономических показателей, как валовой региональный продукт (ВРП)  $Y$ , стоимость основных производственных фондов  $K$  и среднегодовой численности занятых в региональной экономике  $L$ . Показатели  $K$  и  $L$  характеризуют факторы затрат в региональной экономике (РЭ). Одной из моделей, используемой для решения данной задачи, является односекторная модель экономической системы Р. Солоу [1, 2]. Работы, посвященные исследованиям применения данной модели для моделирования экономических систем, можно разделить на две группы. К первой группе относятся работы теоретического характера, в которых основное внимание уделяется получению аналитических выражений, характеризующих управление рассматриваемой экономической системой [3–5]. В этих работах для описания функционирования экономической системы всегда используются производственные функции Кобба – Дугласа. Наряду с этим вводятся ограничения и допущения, в определенной степени упрощающие условия функционирования рассматриваемой экономической системы такие, как, например, постоянство нормы накопления или

темпов роста занятых в рассматриваемой системе. Это в целом снижает практическую значимость данных работ. Вторая группа включает работы прикладного характера, посвященные моделированию функционирования экономических систем российских регионов [6–10]. К недостаткам этих работ можно отнести использование только одного вида производственной функции, использование при ее идентификации значений факторов затрат в натуральном исчислении, отсутствие сравнительного анализа моделируемого изменения факторов затрат с их фактическими значениями. В данной работе рассматривается использование односекторной модели Р. Солоу для моделирования функционирования региональной экономики Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО), являющегося одним из ключевых ресурсодобывающих регионов РФ. Разработка подобного рода моделей, по мнению автора, достаточно актуальна, так как данные модели можно использовать как для краткосрочного прогнозирования динамики ключевого показателя – ВРП, характеризующего состояние региональной экономики, так и для оценки изменений значений макроэкономических показателей, включенных в данные модели.

**Цель исследования:** моделирование динамики значений валового продукта региональной экономики Ямало-Ненецкого автономного округа на основе односекторной модели Р. Солоу для формирования краткосрочных прогнозов значения данного показателя.

## Материалы и методы

### Теоретические аспекты моделирования динамики значений валового регионального продукта

Модель Р. Солоу представляет собой макроэкономическую модель экономического роста [1, 2], согласно которой региональная экономика рассматривается как неструктурированное замкнутое единое целое, в котором производится только один универсальный (агрегированный) конечный продукт – валовой региональный продукт, который направляется на потребление и инвестируется непосредственно в региональную экономику. Считается, что условия функционирования региональной экономики условно стабильны; характер изменений факторов затрат  $K$  и  $L$  в целом известен; временные лаги между инвестициями в основной капитал и стоимостью основных производственных фондов (ОПФ) региональной экономики не учитываются. Динамика выбытия/ликвидации ОПФ и изменение среднегодовой численности занятых в РЭ описываются известными статистическими показателями. Модель Р. Солоу с дискретным временем характеризуется следующей системой уравнений [2]:

$$\left. \begin{aligned} Y(t) &= F(K(t), L(t)), & (1.1) \\ Y(t) &= In(t) + C(t), & (1.2) \\ K(t) &= (1 - \mu)K(t-1) + In(t), & (1.3) \\ L(t) &= (1 + \nu)L(t-1), \quad t \in [t_n, t_k]. & (1.4) \end{aligned} \right\} (1)$$

Здесь  $\nu$  – темп прироста среднегодовой численности занятых в РЭ;  $\mu$  – коэффициент ликвидации основных фондов РЭ;  $In(t)$  – инвестиции в основной капитал РЭ в году  $t$ ;  $C(t)$  – величина потребления в рассматриваемой экономической системе в году  $t$ ;  $[t_n, t_k]$  – период времени, в течение которого наблюдается функционирование рассматриваемой РЭ ( $t_n, t_k$  – базовый (начальный) и конечный годы).

Значения переменных  $K(t_n)$ ,  $L(t_n)$ ,  $In(t_n)$  известны. Функционирование региональной экономики (1.1) чаще всего описывается неоклассической линейно-однородной двухфакторной производственной функцией (ПФ) Кобба – Дугласа (ПФ КД) [6–10]:

$$Y(t) = F(K(t), L(t)) = A_1 (K(t))^\alpha (L(t))^\beta, \quad \alpha > 0, \beta > 0, \alpha + \beta = 1, \sigma = 1, \quad (2)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – эластичности ВРП по факторам затрат  $K(t)$  и  $L(t)$  соответственно;  $\sigma$  – эластичность замещения факторов затрат  $K(t)$  и  $L(t)$ .

В данной работе в качестве ПФ помимо (2) предлагается использовать ПФ типа CES – функция (ПФ CES) [11]:

$$Y = F(K(t), L(t)) = A_2 \left( bK(t)^{-\rho} + (1-b)L(t)^{-\rho} \right)^{-\frac{\delta}{\rho}}, \quad (3)$$

$$\delta = 1, \rho = \frac{1 - \sigma}{\sigma}, 0 \leq \sigma \leq 1, \sigma = \text{const.}$$

Значения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $b$  определяются при идентификации (2), (3) по ретроспективным данным  $Y(t)$ ,  $K(t)$ ,  $L(t)$  временного интервала  $[t_n, t_k]$  для рассматриваемой региональной экономики.

При идентификации ПФ в качестве затрат фактора труда  $L(t)$  используется показатель среднегодовой численности занятых в региональной экономике, а для фактора затрат капитала  $K(t)$  – стоимость основных производственных фондов региональной экономики без учета или с учетом их загрузки. Переменные  $Y(t)$ ,  $K(t)$ ,  $L(t)$  предлагается представлять в виде базисных относительно 2001 г. индексов физического объема (ИФО)  $I_Y(t)$ ,  $I_K(t)$ ,  $I_L(t)$ , а переменную  $L(t)$  – в виде базисного индекса относительно того же года  $I_L(t)$ .

Оценку изменения значения  $K(t)$  (1.3) целесообразно сопоставить с оценками данного показателя, получаемыми согласно методике работы [12], которая также позволяет исчислять и индекс физического объема стоимости ОПФ  $I_K(t)$  рассматриваемой экономической системы. Значения последнего в территориальном разрезе не так часто публикуются в открытой печати, что не позволяет сопоставить официальные статистические данные этого показателя с расчетными. Согласно указанной методике  $I_K(t)$  оценивается выражениями:

$$I_K(t, t+1) = \frac{K(t+1)}{K(t)}; \quad (4)$$

$$K(t+1) = K(T) + \sum_{\tau=T+1}^{t+1} K_n(\tau) - \sum_{\tau=T+1}^{t+1} K_o(\tau); \quad (5)$$

$$K_n(t) = \frac{Q_n(t)}{I_p(T, t)} \cdot \frac{a_T}{a_t}; \quad K_o(t) = \frac{Q_o(t)}{I_p(T, t)} \cdot \frac{a_T}{a_t}; \quad I_p(T, t) = \prod_{\tau=T+1}^t I_p(\tau-1, \tau). \quad (6)$$

Здесь  $Q_n(t)$ ,  $Q_o(t)$  – стоимость введенных в строй и ликвидированных ОПФ региональной экономики в ценах текущего года  $t$ ,  $a_t$ ,  $a_T$  – поправочные коэффициенты, которые определяются на основе модели распределённого строительного лага и равные 1,0 с 1995 г. [12];  $I_p(\tau-1, \tau)$  – индекс-дефлятор для года  $\tau$  по отношению к году  $\tau-1$ .

В общем случае индекс-дефлятор  $I_p(t, t+1)$  для года  $t+1$  по отношению к году  $t$  находится из следующего выражения:

$$I_p(t, t+1) = \frac{V_{in}(t+1)}{V_{in}(t)} \cdot \frac{1}{I_{in}(t+1)}, \quad (7)$$

где  $I_{in}(t)$  – индекс физического объема инвестиций, значения которого ежегодно публикуются в статистических справочниках о социально-экономическом состоянии регионов РФ;  $V_{in}(t)$  – величина инвестиций в основной капитал региональной экономики в текущих ценах года  $t$ .

Для получения значений базисных индексов  $I_K(t)$  относительно 2001 г. слагаемые (1.3) преобразовываются с использованием выражений (6), (7). В дальнейшем ИФО ОПФ, рассчитанный на основании (4), обозначается  $I_{K.1}(t)$ , а рассчитанный с использованием (1.3) –  $I_{K.2}(t)$ .

Зависимость (1.4) представляет собой своего рода авторегрессию первого порядка [13] для  $L(t)$ . Обеспечить достаточно высокую точность аппроксимации таким выражением исходных данных  $L(t)$  экономической системы, которая функционирует в достаточно волатильной внешней среде, не всегда возможно, поэтому автор предлагает не ограничиваться указанной моделью и при необходимости использовать комбинированные модели, включающие подходящие трендовые модели и авторегрессию ошибок аппроксимации [13]. По аналогии с  $I_{K.1}(t)$  и  $I_{K.2}(t)$  базисные индексы среднегодовой численности занятых в региональной экономике ЯНАО обозначаются следующим образом:  $I_{L.1}(t)$  – индекс, соответствующий статистическим данным;  $I_{L.1}(t)$  – индекс, рассчитанный по авторегрессии первого порядка (1.4);  $I_{L.2}(t)$  – индекс, рассчитанный по комбинированной модели, включающей подходящие трендовые модели и авторегрессию ошибок аппроксимации. Таким образом, предполагается построение ПФ (2), (3) для двух наборов данных:  $(I_Y(t), I_{K.1}(t), I_{L.1}(t))$  – ПФ КД1, ПФ CES1;  $(I_Y(t), I_{K.2}(t), I_{L.2}(t))$  – ПФ КД2, ПФ CES2. Корректность построения указанных производственных функций оценивается общепринятыми статистическими критериями: коэффициентом детерминации  $R^2$ , критерием Фишера ( $F_{расч}$ ) и критерием Дарбина – Уотсона ( $DW_{расч}$ ).  $F_{расч}$  сопоставлялись с критическим значением  $F_T$  при уровне значимости 0,05 и заданном количестве объясняющих переменных  $m$  и испытаний  $n$ , а  $DW_{расч}$  сопоставлялись с верхним значением данного критерия  $DW^{up}$  для соответствующих значений  $m$  и  $n$  [13].

Следствием (1) является понятие «устойчивого уровня капиталовооруженности»  $k^*$ , который находится из соотношения [1, 2]:

$$\rho \cdot g(k) - (\mu + \nu)k(t) = 0; \quad g(k) = \frac{F(K(t), L(t))}{L(t)}; \quad k(t) = \frac{K(t)}{L(t)}. \quad (8)$$

Здесь  $g(k)$  – средняя производительность труда в региональной экономике;  $\rho$  – уровень накопления в региональной экономике, характеризующий долю ВРП, инвестиции в основные производственные фонды РЭ.

Интерпретация зависимости (8) состоит в том, что инвестиции, обеспечивающие устойчивый рост ОПФ региональной экономики и, как следствие, рост ее ВРП, должны компенсировать расходы на замену ликвидируемых ОПФ РЭ и рост потребления работниками, занятыми в экономике, и обеспечивая при этом его максимизацию [1–5]. Определение  $k^*$  (8) для интервала  $[t_n, t_k]$  осуществляется при допущениях о постоянстве величин  $\mu(t)$ ,  $\nu(t)$  и  $\rho(t)$  (1). В том случае, если колебания значений указанных показателей существенны, то расчет  $k^*$  необходимо осуществлять для каждого  $t \in [t_n, t_k]$ , оценивая таким образом динамику  $k^*$  в этом временном интервале. Следует также отметить, что (1.2) и (8) предполагают наличие у менеджмента рассматриваемой экономической системы механизмов, позволяющих изменять соотношение между  $I_n(t)$  и  $C(t)$ , исходя из планов её развития в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Региональная же администрация полноценным инструментарием такого рода не располагает, поскольку решения относительно величины  $I_n(t)$  являются прерогативой владельцев предприятий, объединяемых региональной экономикой. Вследствие этого поиск «управления», обеспечивающего реализацию (8), в такой ситуации представляет скорее теоретический, нежели практический интерес.

#### Подготовка статистических данных о функционировании региональной экономики ЯНАО

На основе статистических данных [14, 15] о региональной экономике ЯНАО – значения ВРП ( $Y_\phi(t)$ ), факторов затрат производства  $K_\phi(t)$ ,  $L_\phi(t)$ , а также значения инвестиций в основной капитал  $I_n(t)$  – рассчитаны значения индексов  $I_{Y_\phi(t)}$ ,  $I_{K.1(t)}$ ,  $I_{K.2(t)}$ , приведенные в табл. 1. Значения коэффициента ликвидации основных фондов  $\mu$  региональной экономики ЯНАО [14, 15] с 2001 по 2018 г. практически постоянны ( $\mu \cong 0,003$ ), т. е. в краткосрочной перспективе можно использовать данное значение  $\mu$ .

Уравнение авторегрессии первого порядка, которое по своей структуре близко к (1.4), для интервала с 2001 по 2018 г. имеет вид:

$$L_1(t) = 45,845 + 0,892 \cdot L_\phi(t-1). \quad (9)$$

Значения статистических критериев для (8):  $R^2 = 0,918$ ;  $F_{\text{расч}} = 168,84$ ,  $F_7(0,05; 2,15) = 3,633$ ;  $DW_{\text{расч}} = 1,477$ ,  $DW^{\text{кр}}(2,18) = 1,239$ .

Таблица 1

Базисные индексы физического объема  $I_{Y_\phi(t)}$ ,  $I_{K.1(t)}$ ,  $I_{K.2(t)}$   
региональной экономики ЯНАО за период с 2001 по 2018 г.

Table 1

Basic indexes of actual volume  $I_{Y_\phi(t)}$ ,  $I_{K.1(t)}$ ,  $I_{K.2(t)}$   
of the regional economy of the YNAO for the period from 2001 to 2018

Год, $t$	$I_{Y_\phi(t)}$	$I_{K.1(t)}$	$I_{K.2(t)}$	Год, $t$	$I_{Y_\phi(t)}$	$I_{K.1(t)}$	$I_{K.2(t)}$
2001	1,000	1,000	1,000	2010	1,367	2,192	2,715
2002	1,098	1,023	1,445	2011	1,404	2,570	3,071
2003	1,191	1,159	1,332	2012	1,435	2,922	3,550
2004	1,196	1,531	1,501	2013	1,491	3,218	3,218
2005	1,210	1,435	2,229	2014	1,576	3,612	3,437
2006	1,266	1,621	2,704	2015	1,546	3,454	3,071
2007	1,310	2,330	1,955	2016	1,632	3,604	3,371
2008	1,383	2,815	2,011	2017	1,760	3,364	3,633
2009	1,242	2,127	2,381	2018	1,962	3,532	4,556

Наряду с (9) для описания динамики  $L(t)$  предлагается использовать модель следующего вида [13]:

$$L_2(t) = L_{2.tr}(t) + 0,611 \cdot z(t-1) - 0,562 \cdot z(t-2); \quad (10)$$

$$L_{2.tr}(t) = -0,0773t^2 + 6,5754t + 322,3; \quad (11)$$

$$z(t) = L_{\phi}(t) - L_{2.tr}(t).$$

Значения статистических критериев: для (10):  $R^2 = 0,939$ ;  $F_{расч} = 34,84$ ,  $F_T(0,05; 2,15) = 3,633$ ;  $DW_{расч} = 1,729$ ,  $DW^{up}(4,18) = 1,604$ ; для (11):  $R^2 = 0,9533$ ;  $F_{расч} = 6,149$ ,  $F_T(0,05; 2,15) = 3,633$ ;  $DW_{расч} = 1,627$ ,  $DW^{up}(3,18) = 1,422$ .

Базисные относительно 2001 г. индексы  $I_{L,\phi}(t)$  и рассчитанные для  $L_1(t)$  (8) –  $I_{L,1}(t)$ ,  $L_2(t)$  (9) –  $I_{L,2}(t)$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Базисные индексы  $I_{L,\phi}(t)$ ,  $I_{L,1}(t)$ ,  $I_{L,2}(t)$  для региональной экономики ЯНАО за период с 2001 по 2018 г.

Table 2

Basic indexes  $I_{L,\phi}(t)$ ,  $I_{L,1}(t)$ ,  $I_{L,2}(t)$  of the regional economy of the YNAO for the period from 2001 to 2018

Год, $t$	$I_{L,\phi}(t)$	$I_{L,1}(t)$	$I_{L,2}(t)$	Год, $t$	$I_{L,\phi}(t)$	$I_{L,1}(t)$	$I_{L,2}(t)$
2001	1,000	1,000	1,000	2010	1,215	1,160	1,165
2002	1,037	1,023	1,023	2011	1,222	1,213	1,200
2003	1,107	1,056	1,054	2012	1,231	1,219	1,202
2004	1,120	1,117	1,083	2013	1,242	1,227	1,215
2005	1,128	1,129	1,086	2014	1,239	1,236	1,228
2006	1,116	1,136	1,103	2015	1,234	1,234	1,233
2007	1,120	1,125	1,114	2016	1,263	1,230	1,246
2008	1,143	1,129	1,132	2017	1,318	1,255	1,268
2009	1,155	1,149	1,153	2018	1,309	1,304	1,290

### Результаты моделирования динамики значений валового регионального продукта ЯНАО

Значения переменных (2), (3) ПФ КД1, ПФ CES1, ПФ КД2, ПФ CES2 в среде MATLAB 15™ для временного интервала с 2001 по 2018 г. представлены в табл. 3, согласно им лучшую аппроксимацию значений  $I_{Y,\phi}(t)$  обеспечивает ПФ CES1 при  $R^2 = 0,932$ . Следует отметить, что отличия ПФ КД1 и ПФ КД2 друг от друга, как и ПФ CES1 от ПФ CES2, незначительны, что объясняется достаточно устойчивым ростом всех макроэкономических показателей региональной экономики ЯНАО (см. табл. 1).

Таблица 3

Идентифицированные ПФ Кобба – Дугласа и ПФ типа CES-функция для региональной экономики ЯНАО в интервале 2001–2018 гг.

Table 3

The identified Cobb–Douglas PFs and CES PFs for the regional economy of the YNAO in the interval 2001–2018

ПФ	Значения переменных производственных функций	$\frac{DW_{расч}}{DW^{up}}$	$R^2$	$\frac{F_{расч}}{F_T}$
ПФ КД1	$A_1 = 1,054$ ; $\alpha = 0,223$ ; $\beta = 0,777$	$\frac{1,478}{1,422}$	0,836	$\frac{40,45}{3,633}$
ПФ CES1	$A_2 = 1,0212$ ; $b = 0,2306$ ; $\sigma = 0,9989$	$\frac{1,817}{1,604}$	0,932	$\frac{89,34}{3,239}$
ПФ КД2	$A_1 = 1,0042$ ; $\alpha = 0,2294$ ; $\beta = 0,7706$	$\frac{1,578}{1,422}$	0,85	$\frac{36,82}{3,633}$
ПФ CES2	$A_2 = 0,9986$ ; $b = 0,2263$ ; $\sigma = 0,999$	$\frac{1,742}{1,604}$	0,842	$\frac{34,52}{3,239}$

Одним из приложений моделирования динамики валового регионального продукта является формирование краткосрочных прогнозов его значений  $I_{Y,пр}(t)$ , которые целесообразно сопоставлять как с  $I_{Y,ф}(t)$  (см. табл. 1), так и с оценками этого показателя  $I_{Y,прав}(t)$ , которые определяются в рамках прогнозирования основных параметров социально-экономического развития ЯНАО, проводимого соответствующими подразделениями администрации округа (<https://de.yanao.ru/activity/13/?nav-documents=page-1>). Наряду с оценкой  $I_{Y,прав}(t)$  осуществляется и оценка среднегодовой численности занятых в региональной экономике  $L_{прав}(t)$ , которая сопоставляется с  $L_{ф}(t)$  и  $L_{р}(t)$  (9). Прогнозирование же стоимости ее основных производственных фондов не проводится. Краткосрочное прогнозирование значений  $I_{Y,пр}(t)$  РЭ ЯНАО на 2017–2019 гг. осуществляется с использованием той ПФ (2), (3), которая более точно аппроксимирует ретроспективные значения  $I_{Y,ф}(t)$  рассматриваемого интервала времени. Использование ПФ КД2 и ПФ CES2 для краткосрочного прогнозирования затруднено тем, что оценка  $I_{К2}(t+1)$ , т. е. непосредственно для года прогнозирования, возможна только при наличии значений введенных в эксплуатацию основных производственных фондов региональной экономики  $K_n(t+1)$ . Поэтому для краткосрочного прогнозирования  $I_{Y,пр}(t)$  используется ПФ КД1 и ПФ CES1. В табл. 4 приведены параметры ПФ КД1, ПФ CES1, построенных для интервалов времени, предшествующих году прогноза.

Таблица 4

Идентифицированные значения переменных ПФ Кобба – Дугласа  
и ПФ типа CES-функция региональной экономики ЯНАО

Table 4

The identified values of the variables PF Cobb–Douglas  
and PF CES of the regional economy of the YNAO

Временной интервал, $[t_n, t_k]$	Значения переменных производственных функций	$R^2$	$F_{расч}/F_T$
ПФ Кобба – Дугласа			
2001–2016	$A_1 = 1,038; \alpha = 0,1954; \beta = 0,8046$	0,926	87,17/3,739
2001–2017	$A_1 = 1,033; \alpha = 0,1948; \beta = 0,8052$	0,894	59,06/3,682
2001–2018	$A_1 = 1,054; \alpha = 0,223; \beta = 0,777$	0,836	40,45/3,633
ПФ CES-функция			
2001–2016	$A_2 = 1,0357; b = 0,1797; \sigma = 0,998$	0,866	64,46/3,49
2001–2017	$A_2 = 1,0298; b = 0,2012; \sigma = 0,999$	0,818	29,62/3,287
2001–2018	$A_2 = 1,0212; b = 0,2306; \sigma = 0,998$	0,932	89,34/3,239

В табл. 5 и 6 приведены следующие данные:

– оценки  $I_{Y,прав}(t+1)$  и  $L_{прав}(t+1)$  для 2017–2019 гг., сформированные соответствующими подразделениями администрации ЯНАО и опубликованные на её веб-сайте, указанном выше;

– для этого же временного интервала расчетные оценки  $I_{Y,р}(t+1)$  с использованием следующих идентифицированных ПФ (см. табл. 4): 2001–2016 гг. – ПФ КД1; 2001–2017 гг. – ПФ КД1; 2001–2018 гг. – ПФ CES1;

– расчетные оценки  $L_{р}(t+1)$  2017–2019 гг., полученные с использованием модели динамики  $L_{р}(t+1)$  (9).

– значения относительной ошибки прогнозирования  $\varepsilon_P(t)$ , которые определяется выражением:

$$\varepsilon_P(t) = \frac{P_{расч}(t) - P_{ф}(t)}{P_{ф}(t)},$$

где  $P_{расч}(t)$ ,  $P_{ф}(t+1)$  – расчетное и фактическое значения показателя.

Значения  $\mu(t)$ ,  $\nu(t)$ ,  $\rho(t)$  и расчетные значения  $k^*(t)$  (8) приведены в табл. 7. Значения  $\nu(t)$  рассчитывались как коэффициент линейной регрессии без свободного члена, которая аппроксимирует  $L_{ф}(t)$  в интервале времени, предшествующем рассматриваемому году.

При непосредственном расчете согласно (1.4) для 2006, 2015 и 2018 гг. получаются отрицательные значения  $\nu(t)$  по своей абсолютной величине, превышающие  $\mu(t)$ , что не позволяет определить  $k^*(t)$  для этих лет.

Таблица 5

Прогнозные значения ВРП региональной экономики ЯНАО на период с 2017 по 2019 г.

Table 5

Forecasted GRP values of the regional economy of the YNAO for the period from 2017 to 2019

Год, $t$	$I_{Y,\phi}(t)$	$I_{Y,прав}(t)$	$\varepsilon_{Y,прав}(t)$	$I_{Y,p}(t)$	$\varepsilon_Y(t)$
2017	1,4943	1,5093	0,009	1,5033	0,006
2018	1,4944	1,4958	0,001	1,4884	-0,005
2019	1,4788	1,4943	-0,01	1,4869	0,005

Таблица 6

Прогнозные значения среднегодовой численности занятых (тыс. чел.) в региональной экономике ЯНАО на период 2017–2019 гг.

Table 6

Forecasted values of the average annual number of employed (thousand people) in the regional economy of the YNAO for the period from 2017 to 2019

Год, $t$	$L_{\phi}(t)$	$L_{прав}(t)$	$\varepsilon_{L,прав}(t)$	$L_p(t)$	$\varepsilon_{L,p}(t)$
2017	420,50	383,35	0,088	405,61	0,035
2018	417,70	386,79	0,074	421,24	-0,008
2019	423,00	406,25	0,040	419,53	0,008

Таблица 7

Значения  $\mu(t)$ ,  $\nu(t)$ ,  $\rho(t)$  и  $k^*(t)$  для региональной экономики ЯНАО в период с 2001 по 2018 г.

Table 7

The values of  $\mu(t)$ ,  $\nu(t)$ ,  $\rho(t)$  и  $k^*(t)$  for the regional economy of the YNAO in the period from 2001 to 2018

Год	$\mu(t)$	$\nu(t)$	$\rho(t)$	$k^*(t)$	Год	$\mu(t)$	$\nu(t)$	$\rho(t)$	$k^*(t)$
2001	0,002	0,003	0,834	775,1	2010	0,003	0,022	0,648	72,5
2002	0,002	0,037	0,599	36,5	2011	0,003	0,019	0,659	87,12
2003	0,002	0,048	0,576	25,01	2012	0,003	0,02	0,563	65,54
2004	0,003	0,041	0,54	26,68	2013	0,003	0,02	0,522	59,49
2005	0,002	0,035	0,506	30,65	2014	0,003	0,019	0,449	51,04
2006	0,003	0,029	0,561	42,35	2015	0,004	0,019	0,428	47,34
2007	0,003	0,025	0,641	59,92	2016	0,003	0,018	0,395	46,66
2008	0,002	0,023	0,671	73,81	2017	0,003	0,018	0,375	45,08
2009	0,002	0,021	0,727	89,1	2018	0,003	0,017	0,288	32,88

Оценка  $\rho(t)$  осуществлялась с использованием показателя «фактическое конечное потребление домашних хозяйств на душу населения» с учетом индекса потребительских цен и тарифов на товары и услуги для ЯНАО.

## Заключение и выводы

Данные табл. 5 и 6 показывают, что краткосрочные прогнозные оценки значений валового регионального продукта  $I_{Y,p}(t)$  и среднегодовой численности занятых в региональной экономике  $L_p(t)$  ЯНАО достаточно хорошо согласуются с фактическими значениями этих показателей, опубликованными в изданиях Росстата РФ. Относительная ошибка  $\varepsilon_Y(t)$  не превосходит 1 % и характеризует прогноз как нижнюю оценку рассматриваемого показателя. Аналогичная ситуация и прогнозированием  $L_p(t)$ , для которой  $\varepsilon_{L,p}(t)$  только для 2017 г. превышает 1 %. Полученные прогнозные значения  $I_{Y,p}(t)$  и  $L_p(t)$  для рассматриваемого временного интервала не уступают по точности соответствующим данным, опубликованным профильными подразделениями администрации ЯНАО. Оценки  $k^*(t)$  (табл. 7) для региональной экономики ЯНАО в рассмотренном временном интервале существенно выше значений  $k(t)$ , рассчитанных по статистическим данным  $K_{\phi}(t)$  и  $L_{\phi}(t)$ . Начиная с 2009–2010 гг. сформировалась тенденция снижения значений  $k^*(t)$  на фоне ус-

тойчивого роста потребления со стороны населения региона. Влияние данного фактора на  $k^*(t)$  носит ограниченный характер, что обусловлено природно-климатическими особенностями региона. Так, за период с 2001 по 2018 г.  $L_\Phi(t)$  увеличилось более чем на 30 %, тогда как непосредственно население ЯНАО выросло менее чем на 15 %. Эти же факторы оказывают влияние и на динамику  $K_\Phi(t)$  экономики региона. Инвестиции используются для поддержания эксплуатационных характеристик ОПФ региональной экономики, что подтверждается достаточно низким по сравнению с другими регионами показателем их износа. Коэффициент же обновления ОПФ лишь начиная с 2016 г. превысил ранее сформировавшийся уровень на 5–6 %. Таким образом, использование модели односекторной экономики Р. Солоу в целом позволяет получать приемлемые как количественные оценки динамики валового регионального продукта, так и качественные оценки, характеризующие непосредственно развитие рассматриваемой экономической системы.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ и Правительства ХМАО-Югра на реализацию научного проекта № 18-47-860016 «Компьютерное моделирование динамики социально-экономической системы ресурсодобывающего региона севера России с использованием теории роста, агентного подхода и ГИС-технологий».

### Литература

1. Солоу, Р.А. Перспективы теории роста / Р.А. Солоу // *Мировая экономика и международные отношения*. – 1966. – № 8. – С. 69–77.
2. Колемаев, В.А. *Экономико-математическое моделирование. Моделирование макроэкономических процессов и систем* / В.А. Колемаев. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2005. – 295 с.
3. Демин, Н.С. Управление односекторной экономикой на конечном интервале времени в модели Солоу / Н.С. Демин, Е.В. Кулешова // *Вестник Томского государственного университета*. – 2004. – № 2 (84). – С. 52–56.
4. Анисимов, А.В. Задача оптимального управления для односекторной модели экономического роста со смешанными ограничениями / А.В. Анисимов, Н.Л. Григоренко, Л.Н. Лукьянова // *Труды факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова. Прикладная математика и информатика: сб. науч. тр.* – М.: МГУ, 2013. – С. 5–21.
5. Параев, Ю.И. Аналитическое решение задачи оптимального управления односекторной экономикой на конечном интервале времени / Ю.И. Параев, Т.И. Грекова, Е.Ю. Данилюк // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. – 2011. – № 4 (17). – С. 5–15.
6. Тихонов, М.С. Построение прогноза доходной части бюджета Рязанской области на основе анализа односекторной макроэкономической модели региона / М.С. Тихонов // *Известия РАЕН. Дифференциальные уравнения*. – 2009. – № 14. – С. 132–141.
7. Воронов, А.А. Исследование экономики Северо-Западного региона Российской Федерации как нелинейной динамической системы при помощи модели Солоу / А.А. Воронов // *Проблемы экономики и менеджмента*. – 2014. – № 7 (35). – С. 27–32.
8. Гаджикурбанов, Д.М. Экономическое развитие индустриального региона: оценочный подход / Д.М. Гаджикурбанов, Л.М. Лабутина // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 70–74.
9. Лазарева, И.А. Построение и идентификация односекторной модели экономики региона, учитывающей конечное потребление и конкуренцию за ограниченные ресурсы / И.А. Лазарева, Е.Ю. Лискина // *Вестник РАЕН*. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 36–40.
10. Кокоткина, Т.Н. *Математические модели в прогнозировании развития экономики региона: моногр.* / Т.Н. Кокоткина, Н.С. Садовин, Е.И. Царегородцев. – Йошкар-Ола: ООО «СТИНГ», 2017. – 177 с.
11. *Экономико-математическое моделирование: учеб. для студентов вузов / под общ. ред. И.Н. Дрогобыцкого*. – М.: Изд-во «Экзамен», 2004. – 800 с.
12. Бессонов, В.А. Динамика основных фондов и инвестиций в российской переходной экономике / В.А. Бессонов, И.Б. Воскобойников. – М.: ИЭПП, 2006. – 65 с.
13. Афанасьев, В.Н. *Анализ временных рядов и прогнозирование: учеб.* / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Финансы и статистика, 2010. – 320 с.

14. *Статистический ежегодник. Ямало-Ненецкий автономный округ: в 2 ч. Ч. I (I) (1990–2016) / Управление Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу. – Тюмень, 2020. – 343 с.*

15. *Статистический ежегодник. Ямало-Ненецкий автономный округ: в 2 ч. Ч. II (2017–2019) / Управление Федеральной службы государственной статистики по Тюменской области, Ханты-Мансийскому автономному округу – Югре и Ямало-Ненецкому автономному округу. – Тюмень, 2020. – 267 с.*

**Кутышкин Андрей Валентинович**, д-р техн. наук, профессор Института цифровой экономики, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск; avk\_200761@mail.ru.

*Поступила в редакцию 25 марта 2021 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210210

## MODELING THE DYNAMICS OF GROSS REGIONAL PRODUCT

**A.V. Kutyshkin**, avk\_200761@mail.ru

*Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation*

The gross regional product is a key macroeconomic indicator that characterizes the development of the regional socio-economic system. Modeling the dynamics of this indicator, as the final product of the economic system, also involves the development of models for changing the values of aggregated cost factors associated with its production. One of the directions of using the developed models is the formation of short-term forecasts of the direct values of the gross regional product and the factors of labor and capital costs of the regional economy that determine them. **Aim.** Modeling the dynamics of the value of the gross product of the regional economy of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug on the basis of the one-sector model of R. Solow for the formation of short-term forecasts of the value of this indicator. **Materials and methods.** The one-sector model of economic growth by R. Solow is used, in which the functioning of the regional economy is described by two-factor neoclassical functions with a constant elasticity of substitution of factors of production costs. Production functions are identified using retrospective sequences of indices of gross regional product and cost factors of the regional economy. Short-term forecasting of the gross product of the regional economy is carried out using a production function that provides a better approximation of retrospective data of the time interval of the previous forecasting year. **Results.** Neoclassical two-factor production functions with constant elasticity of substitution of cost factors of the regional economy of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (YNAO) for the period from 2001 to 2018 were constructed. The values of the gross regional product and the average annual number of employed in the Yamal-Nenets economy were calculated for 2017–2019, which were compared with the corresponding data published by the Federal State Statistics Service of the Russian Federation, and the forecast values published by the regional administration. **Conclusion.** It has been established that the used production functions give acceptable estimates of the approximation of the actual values of the gross regional product of the considered regional economy in the considered time interval. Modification of the models for changing the values of cost factors made it possible to increase the accuracy of short-term forecasts, both directly of the values of the gross regional product and the values of factor of labor and capital costs.

*Keywords: regional economy, the gross regional product, modeling the dynamics of cost factors, production functions.*

### References

1. Solou R.A. [Prospects for Growth Theory]. *World Economy and International Relations*, 1966, no. 8, pp. 69–77. (in Russ.)
2. Kolemaev V.A. *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie. Modelirovanie makroekonomiche-*

*skih processov i system* [Economic and mathematical modeling. Modeling of macroeconomic processes and systems]. Moscow, YUNITI-DANA Publ., 2005. 295 p.

3. Demin N.S., Kuleshova E.V. [Management of one-sector economy on a finite time interval in the Solow model]. *Bulletin of the Tomsk State University*, 2003, vol. 84, no. 2, pp. 52–56. (in Russ.)

4. Anisimov A.V., Grigorenko N.L., Lukyanova L.N. [Optimal control problem for a one-sector model of economic growth with mixed constraints]. *Applied Mathematics and Computer Science. Proceedings of the Faculty of CMC, Moscow State University named after M.V. Lomonosov*. Moscow, 2013, pp. 5–21. (in Russ.)

5. Paraev Yu.I., Grekova T.I., Danilyuk E.Yu. [Analytical solution of the problem of optimal control of one-sector economy on a finite time interval]. *Bulletin of the Tomsk State University. Management, computer technology and informatics*, 2011, vol. 17, no. 4, pp. 5–15. (in Russ.)

6. Tikhonov M.S. [Forecasting the revenue side of the budget of the Ryazan region based on the analysis of a one-sector macroeconomic model of the region]. *Izvestiya RANS. Differential Equations*, 2009, no. 14, pp. 132–141. (in Russ.)

7. Voronov A.A. [Research of the economy of the North-West region of the Russian Federation as a nonlinear dynamic system using the Solow model]. *Problems of Economics and Management*, 2014, vol. 35, no. 7, pp. 27–32. (in Russ.)

8. Hajikurbanov D.M., Labutina L.M. [Economic development of an industrial region: an appraisal approach]. *Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov*, 2015, vol. 18, no. 3, pp. 70–74. (in Russ.)

9. Lazareva I.A., Liskina E.Yu. [Construction and identification of a one-sector model of the regional economy, taking into account final consumption and competition for limited resources]. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 36–40. (in Russ.)

10. Kokotkina T.N., Sadovin N.S., Caregorodcev E.I. *Matematicheskie modeli v prognozirovanii razvitiya ekonomiki regiona: monografiya* [Mathematical models in forecasting the development of the regional economy: monograph]. Yoshkar-Ola, LLC “STING” Publ., 2017. 177 p.

11. Drohobytsky I.N. (Ed.) *Ekonomiko-matematicheskoe modelirovanie: uchebnik dlya studentov vuzov* [Economic and mathematical modeling: a textbook for university students]. Moscow, Examination Publ., 2004. 800 p.

12. Bessonov V.A., Voskoboynikov I.B. *Dinamika osnovnykh fondov i investitsiy v rossiyskoy perekhodnoy ekonomike* [The dynamics of fixed assets and investments in the Russian transitional economy]. Moscow, IEPP, 2006. 65 p.

13. Afanasyev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye: ucheb.* [Time series analysis and forecasting: textbook]. 2nd ed. Moscow, Finance and statistics Publ., 2010. 320 p.

14. *Statisticheskii ezhegodnik. Yamalo-Nenetskiy avtonomnyy okrug: v 2 ch. Ch. I (I) (1990–2016)* [Statistical Yearbook. Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: in 2 parts. Part I (I) (1990–2016)]. Office of the Federal State Statistics Service for the Tyumen Region, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Tyumen, 2020. 343 p.

15. *Statisticheskii ezhegodnik. Yamalo-Nenetskiy avtonomnyy okrug: v 2 ch. Ch. II (2017–2019)* [Statistical Yearbook. Yamalo-Nenets Autonomous Okrug: in 2 parts. Part II (2017–2019)]. Office of the Federal State Statistics Service for the Tyumen Region, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra and Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. Tyumen, 2020. 267 p.

Received 25 March 2021

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Кутышкин, А.В. Моделирование динамики валового регионального продукта / А.В. Кутышкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 104–113. DOI: 10.14529/ctcr210210

#### FOR CITATION

Kutyshkin A.V. Modeling the Dynamics of Gross Regional Product. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 104–113. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210210

# MANAGEMENT OF THE STATE AND DEVELOPMENT OF HUMAN RESOURCES OF INDUSTRIAL ENTERPRISE IN ACCORDANCE WITH THE DYNAMICS OF THE INFLUENCE EXTERNAL AND INTERNAL FACTORS

K.A. Korennaya<sup>1</sup>, [kkris221@mail.ru](mailto:kkris221@mail.ru),  
 O.V. Loginovskiy<sup>2</sup>, [loginovskiiiov@susu.ru](mailto:loginovskiiiov@susu.ru),  
 V.V. Zakharov<sup>2</sup>, [zakharovvv@susu.ru](mailto:zakharovvv@susu.ru)

<sup>1</sup> JSC “Kuznetsk Ferroalloys”, Novokuznetsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The specifics of human resource management primarily consider the work with the personnel of enterprises and organizations, and the basic concept that existed earlier said that the human resource and personnel of enterprises and organizations are some expenses that need to be constantly repaid. Now, personnel-human resources are considered as the resources of the enterprise, and this approach is used to increase the understanding of the belonging of employees and more effective use of their competencies in the organization system. Respectively, as resources are one of the most important characteristics of the enterprise and personnel should be attributed to the resources necessary for the sustainable development and functioning of the enterprise. The general concept of human resource management provides for a set of certain beliefs and suggestions that are formed and focused in one company, so you can talk about the corporate culture, about specific factors that are accepted in the company, and are, in turn, also a certain resource. **The aim** of the study is to form an up-to-date approach to improving the efficiency of human resource management at an industrial enterprise. **Materials and methods.** As part of the materials and methods, it is necessary to note the analysis of approaches, methods and models of human resource management presented in the scientific and technical literature, as well as the results of their implementation in the practice of industrial enterprise management. **Results.** The article substantiates the main scientific provisions and the need to form a general strategy for personnel development, which forms employees' self-determination in the organizational structure of the enterprise and the vector of their development, and the management has a clear idea in the development of personnel management decisions. **Conclusion.** A vague formulation, the absence of a personnel development strategy or its inconsistency with the general strategy of the enterprise and the dynamics of the influence of external and internal factors creates some uncertainty, which further leads to the “turnover” of personnel and does not allow achieving the goals set by the management of the enterprise.

*Keywords: personnel, human resources, strategy, personnel development, human resource management, personnel policy, personnel management.*

## Introduction

An extensive scientific and technical literature is devoted to the study of the analysis of the state and development of human resources of enterprises and organizations. [1, 4–8, 11, 14, 19].

In the history of human resources development, personnel management, three main approaches are widely known: economic, organic and humanistic [9, 10, 25, 26].

The economic approach assigns a leading place in personnel management not to managerial, but to purely technical training of workers. This approach is based on: ensuring the unity of the leadership; creating a clear management vertical; separation of analytical and linear production structures of the enterprise; full subordination of the personal interests of the company's employees to the goals and objectives of the enterprise. This approach was most widely used for personnel management of enterprises in the Soviet Union.

Based on the organic approach, the concept of “personnel management” and then the concept of “human resource management” were formed. The organic approach brought this type of management activity far beyond the previously established functions of personnel services, when personnel functions from registration and control expanded and extended to the search and selection of employees, career

planning for leading employees of the enterprise, analysis of activities and advanced training of employees of the enterprise, etc.

The humanistic approach suggested that the personnel services of an industrial enterprise should focus on the management of individuals in the team and the representation of the organization as a kind of “cultural phenomenon”. At the same time, it was proposed to consider culture in the system of ideology, values, laws, etc. In particular, in Japan, organizations began to position themselves as collectives where the spirit of cooperation and mutual assistance reigns, and a lifetime of hiring turns them into an extension of the family.

Among modern works in the field of human resource management, the following can be noted.

In [2], management culture from the standpoint of the concept of “human resources” management is considered as an integral phenomenon that describes the property of a person employed in the field of management, capable of solving problems and tasks arising in the production process and helping an employee in a difficult professional situation. And also in situations requiring managerial influence using knowledge and experience, values, abilities and inclinations.

The authors note [3, 27] that the strategy of human resources development is determined by the factors of the external and internal environment, the specifics of the implementation of the goals and objectives of the enterprise development, its industry affiliation and other conditions. The strategy should be aimed at achieving the required quantitative and qualitative characteristics of the personnel, which will ensure goal orientation and adapt the strategy development algorithm to the industry specifics of the management object.

As shown in [13, 28], the analysis of modern concepts of human resource management allows us to conclude that the focus is on practical aspects, rather than on the philosophy of human resource management. To identify and explain what is happening in practice, modern researchers use the concept of “analytical human resource management”, the main task of which is to build a theory and collect empirical data to account for the behavior of management in the organization of work and management of people in different workplaces, companies, and industries.

However, modern conditions are characterized for domestic companies by constantly growing uncertainty in interaction with suppliers and consumers of products, both in Russian and foreign markets, as well as the possibility of imposing sanctions on the part of Western powers wishing to eliminate their external competitors and other similar features. In addition, the complexities of doing business. At the same time, the effective management of the development of human resources of industrial enterprises in modern realities should be based on the authors' point of view on more important and constructive ideas. As a result, the conditions in which modern domestic industrial enterprises have to work have changed dramatically in recent years. First of all, this concerns the impact of external factors on industrial enterprises, but the state of internal factors characteristic of medium and large industrial enterprises, and various areas of activity, has also undergone significant changes. The authors of this article have devoted a number of scientific works to the study of these issues [12, 15–24, 29, 30].

It is especially important to emphasize the fact that industrial enterprises today have to first of all pay attention not to the factors of direct external influence on the enterprise and its internal development, but first of all to the factors of indirect external influence [22]:

- the needs of the largest buyers of the products of an industrial enterprise on the world market;
- prices for the products produced by the enterprise on international markets;
- exchange rates;
- etc.

It is convincingly shown [19, 22] that in order to work flexibly and effectively in such conditions, industrial enterprises need a new approach to management, which would make it possible to develop enterprises not only during periods of stable development of the world economy, but also during periods of financial and economic instability or global crises caused by various causes.

Thus, any modern large industrial enterprise, on the one hand, should formulate the concept and program of its strategic development, both for the near and long-term prospects. And on the other hand, ensure effective operational management of the industrial enterprise, which allows achieving maximum profit for the company or compliance with the results work other criteria established by the owners [15].

In this regard, the achievement of these goals and objectives of an industrial enterprise cannot but be interrelated with the purposeful, comprehensively justified development of human resources, ensu-

ring their preparation for the competent implementation of the tasks set by the company's management, both of an operational and strategic nature. This, in fact, is the key principle of the formation of an up-to-date approach to the management of human resources of an industrial enterprise.

### **An actual approach to improving the efficiency of human resource management in an industrial enterprise**

The main tasks of human resources management traditionally include the timely development of informed decisions that determine the requirements for the company's human resources potential that is what kind of human resources and in what quantity are need to achieve the goals set by the owners of the enterprise. Moreover, as shown in [22], the classical tasks of human resource management are:

1. Resource planning (development of a plan to meet future human resource needs, consisting of the following stages: assessment of available resources, assessment of future needs for them, development of a program to meet identified needs).
2. Recruitment of personnel (creation of the necessary reserve of candidates for all positions and specialties, from which the company selects the most suitable employees for it).
3. Personnel selection (evaluation of candidates and selection of the best from the created reserve).
4. Career guidance and adaptation of employees to the requirements of a particular enterprise (development of employees' understanding of what the organization expects from it and what kind of work in it gets a well-deserved assessment).
5. Training (and developing training programs) for the job skills required to do the job effectively.
6. Determination of the amount of wages and other remuneration or compensation (creation of a methodology for calculating wages and other payments: bonuses, sick leave payments, maternity leave, etc.).
7. Assessment of labor activity (formation of methods for assessing labor activity and bringing it to the employee).
8. Management training and development plans for their career advancement (development of programs aimed at developing the abilities and increasing the efficiency of the work of management personnel).
9. Promotion, demotion, transfer, dismissal (choice of methods of movement of workers to positions with greater or lesser responsibility, develop their professional experience by working in other positions or areas, and procedures for termination of contract of employment).
10. Training and professional development of employees of the enterprise, career planning, personnel motivation [18, 24].

It should be noted that human resource management is, in fact, a kind of closed business process that is part of the overall process of managing the activities of the enterprise, although human resource management is often organized in most enterprises in its own way.

Unfortunately, even today, the tasks of personnel administration are mainly traditional accounting functions, which include staffing support; personnel accounting; time table accounting; payroll calculation; accounting in the Pension Fund of Russia, the Ministry of Taxes and Duties.

However, successful management of human resources of an enterprise cannot be carried out only through administration. This requires a well-thought-out personnel policy, which is a system of principles, approaches and rules that bring human resources in line with the goals and objectives of the enterprise, its strategy. All work with personnel—the selection of employees, staffing, certification, training, promotion, etc. should be the result of ensuring the implementation of the goals and objectives of the organization, the most optimal implementation of its strategic development.

The personnel policy of the company traditionally includes:

- development of general principles of personnel policy, setting priorities for goals;
- planning the need for labor resources, forming the structure and staff, appointments, creating a reserve, moving;
- creation and support of the personnel information movement system;
- formulation of the principles of allocation of funds, ensuring an effective system of labor incentives;
- providing a development program, career guidance and adaptation of employees, planning individual promotion, professional training and professional development;

- performance evaluation or analysis of the compliance of the personnel policy with the company's strategy, identification of problems in personnel work, assessment of personnel potential and other methods of analyzing the effectiveness of personnel activities.

Effective management of personnel policy cannot be carried out without understanding the essence of the domestic system of industrial and economic management in the country, as well as the strategic goals and objectives of the development of a particular enterprise that largely follow from this. Without studying these issues, any developed strategy for the development of an enterprise will never be adequate to the true, and not “book”, problems of industrial development of any collectives. Unfortunately, many works on the problems of the theory and practice of management of enterprises and groups of enterprises are not very suitable for Russian conditions, since the history of domestic management and the system of industrial management that has developed in its course in Russia is not at all similar to Western or Eastern counterparts. Its specifics are so different from those declared in pro-Western, oriented manuals and monographs on industrial management that the use of the recommendations of the latter can hardly allow the heads of enterprises to achieve the desired results [19].

Personnel management of industrial enterprises should begin with an analysis of the state of affairs, the forecast of development and determination of the desired results of the enterprise, i.e. first of all, a plan-forecast of sales (sales) of products, which should be based on carefully conducted marketing research, take into account long-term contracts and the forecast of market dynamics. On this basis, several variants of the plan are drawn up. These options determine the personal strategy of the head of the enterprise for its development in the future. On this basis, production plans, standards, the utilization of production assets, the policy of interaction with suppliers of raw materials and consumers of products, as well as the need for human resources are then developed.

The system of measures that management can implement largely depends on whether the volume of supply of the company's products will increase, or vice versa, the market is in a state of decline. For example, in the case of a sharp increase in demand for the company's products, the manager should solve the problems associated with the need to put into operation new production facilities, as well as with the search for qualified personnel for the resulting jobs, etc. In the case of a sharp reduction in the sales market, on the contrary, it is necessary either to re-profile production to produce other products, or to preserve fixed assets.

Positive qualities of the labor collective are an additional incentive that contributes to stable personnel dynamics and job satisfaction.

The nature of the personnel policy is also influenced by the management style of the labor collective that has developed in the company. Nevertheless, we can distinguish two initial strategic elements of the personnel policy:

1. Strategic intentions (attracting and retaining responsible, efficient, highly qualified and talented people to the corporation. This is the key task of any company in the field of human resources management, the most important link in long-term personnel processes that provide competitive advantages to the enterprise due to the uniqueness of human potential and a high level of responsibility of all its employees. At the same time, corporate culture generates responsibility, and people's abilities create competitive advantages. Therefore, the HR manager solves, as it were, two strategic tasks: to create a competitive advantage for the company by increasing the level of responsibility of its employees, using the means of managing corporate culture; to provide competitive advantages to the company by increasing the quality of human potential and the growth of professional competence of employees;

2. The strategic directions of the enterprise development are also a component of the system of strategic goals of the corporation. But before choosing these areas, it is necessary to create a clear image of the future enterprise. A structured vision of the future of the enterprise (the share of sales and market positions, the organizational structure, the technologies of the main and auxiliary production, the management style, the dominant organizational cultures, marketing policy, professional and personal characteristics of the personnel potential) should help to build, including a competent personnel policy of the enterprise.

However, to ensure the implementation of these areas in the face of growing competition in the markets of highly qualified labor is a very difficult task. Human resources services, if they are to solve it effectively, should cease to function as bureaucratic structures: they should acquire the features of management and marketing groups.

Human resources services, together with the management of the enterprise, should strive to reduce costs due to both ineffective use of the existing human potential and excessive human resources in the corporation. In addition, HR departments, by their traditional HR style, are themselves a source of unnecessary costs. Establishing effective interaction with the structural divisions of the corporation is a certain guarantee of reducing such costs, especially in the field of optimizing the existing systems of remuneration and labor incentives.

### Conclusion

Thus, the approach to human resource management and personnel incentives for a large industrial enterprise includes the implementation of the following provisions:

– The personnel policy of the enterprise should be aimed at bringing the personnel potential in line with the goals and development strategy of the corporation and fully comply with the personal concept of the vision of the future of the company by the first head.

– The openness or closeness of the personnel policy should be determined depending on the factors of the external environment, corporate culture, etc.

– The type of personnel policy of the enterprise should be directly related to the level of awareness and the degree of influence on the personnel situation of the style and the existing management system of the enterprise.

– In order to form an adequate personnel policy, it is necessary to develop an understanding of the goals, norms and methods of implementing personnel measures. The main mechanism for maintaining an adequate personnel policy should be personnel monitoring.

– When forming a personnel policy, an enterprise or a corporation needs to determine a personnel strategy, strategic intentions and strategic directions of its development, as well as to select professional personnel managers.

### References

1. Armstrong M. *Praktika upravleniya chelovecheskimi resursami* [Practice of human resource management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2009. 328 p.
2. Afonin Yu.A., Galkina O.V. [Management culture as a factor in the transition to a new concept of human resource management]. *Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravleniye* [Azimuth of scientific research: economics and management], 2015, no. 1 (10), pp. 13–16. (in Russ.)
3. Belyaeva T.A., Kozieva I.A., Kuznetsov E.V. [Effective strategic management of human resources of the enterprise]. *Delta Science*, 2016, no. 2, pp. 79–82. (in Russ.)
4. Grachev M.V. *Superkadry: Upravleniye personalom v mezhdunarodnoy korporatsii* [Superframes: Human Resources Management in an International Corporation]. Moscow, Delo LTD Publ., 2006. 208 p.
5. Graham H.T., Bennett R. *Upravleniye chelovecheskimi resursami* [Human Resource Management]. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2006. 180 p.
6. Grechko N.M. *Sovremennyye osobennosti upravleniya trudovymi resursami predpriyatiy promyshlennosti* [Modern features of labor resources management of industrial enterprises]. Nizhny Novgorod, Volgo-Vyatka Academy of Public Administration Publishing House, 2004. 25 p.
7. Dessler G. *Upravleniye personalom* [Personnel Management]. Moscow, BINOM Publ., 2013. 799 p.
8. Donskaya N.A. *Upravleniye personalom promyshlennogo predpriyatiya* [Personnel management of an industrial enterprise]. Moscow, Jupiter Publ., 2005. 204 p.
9. Evenko L.I. [Evolution of human resource management concepts]. *Personnel development strategy*. Nizhny Novgorod, 1996, pp. 33–37. (in Russ.)
10. Egorshin A.P. *Upravleniye personalom* [Personnel Management]. Nizhny Novgorod, NIMB, 1999. 624 p.
11. Zaitsev G.G., Faibushevich S.I. *Upravleniye kadrami na predpriyatii: personal'nyy menedzhment* [Human resources management in the enterprise: personal management]. St. Petersburg, Publishing house SPb FINEK, 2009. 354 p.
12. Zakharov V.V. [Personnel training as a tool to improve the efficiency of the enterprise]. *Investment and innovation management journal*, 2018, no. 1, pp. 44–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/iimj180105

13. Ivanova O.E. [Methodological foundations of the concept of human resource management]. *Azimut nauchnykh issledovaniy: ekonomika i upravleniye* [Azimuth of scientific research: economics and management], 2018, vol. 7, no. 3 (24), pp. 109–112. (in Russ.)

14. Ilyina L.N. *Upravleniye kadrovoy politikoy promyshlennogo predpriyatiya* [Management of personnel policy of an industrial enterprise]. Moscow, Jupiter Publ., 2005. 151 p.

15. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. [Information and resource support for the management of industrial enterprises based on the predictive and adaptive approach]. *Informatsionnyye resursy Rossii* [Information resources of Russia], 2012, no. 2 (126), pp. 16–20. (in Russ.)

16. Korennaya K.A., Loginovsky O.V., Maksimov A.A. [Industrial enterprise group management concept]. *Izvestiya vuzov. Ural'skiy region* [News of universities. Ural region], 2011, no. 2, pp. 27–32. (in Russ.)

17. Korennaya K.A. [The main problems of human resource management]. *Razvitiye informatsionnogo obshchestva i informatsionnoye obespecheniye administrativnoy reformy v sub'yektakh RF: nauchnyye trudy* [Development of the information society and information support of administrative reform in the constituent entities of the Russian Federation: scientific proceedings]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., CSTI Publ., 2009, pp. 248–254. (in Russ.)

18. Korennaya K.A. [The approach, methods and models of human resource management are the most important components of the modern concept of industrial enterprise management]. *Izvestiya vuzov. Ural'skiy region* [News of universities. Ural region], 2012, no. 3, pp. 47–61. (in Russ.)

19. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami v usloviyakh global'noy nestabil'nosti* [Industrial enterprise management in the context of global instability]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., 2013. 403 p.

20. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Korporativnoye upravleniye* [Corporate governance]. Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 624 p.

21. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A. *Upravleniye promyshlennym predpriyatiyem* [Industrial enterprise management]. Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2006. 576 p.

22. Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N. et al. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy* [Management of industrial enterprises: strategies, mechanisms, systems]. Moscow, INFRA-M Publ., 2018. 410 p.

23. Maksimov A.A., Korennaya K.A. [The use of statistical assessments and mathematical models in assessing the performance of personnel]. *Razvitiye informatsionnogo obshchestva i informatsionnoye obespecheniye administrativnoy reformy v sub'yektakh RF: nauchnyye trudy* [Development of the information society and information support of administrative reform in the constituent entities of the Russian Federation: scientific proceedings]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., CSTI Publ., 2009, pp. 240–247. (in Russ.)

24. Maksimov A.A., Korennaya K.A. [Human Resource Management at OJSC Kuznetsk Ferroalloys]. *Metody, modeli i sredstva analiza i obrabotki dannykh v informatsionnykh sistemakh organov ispolnitel'noy vlasti* [Methods, models and tools for analyzing and processing data in information systems of executive authorities]. Chelyabinsk, South Ural St. Univ. Publ., CSTI Publ., 2010, pp. 154–190. (in Russ.)

25. Mikhailov F.B. *Upravleniye personalom: klassicheskiye kontseptsii i novyye podkhody* [Human Resources Management: Classic Concepts and New Approaches]. Kazan, 1997. 136 p.

26. Mordovin S.K. *Upravleniye chelovecheskimi resursami* [Human resource management]. Moscow, INFRA Publ., 2007. 320 p.

27. Smolkin V.P., Volovaya E.V. [Strategic Human Resource Management: Basic Approaches and Concepts]. *Nauchnoye obozreniye* [Scientific Review], 2016, no. 16. pp. 100–105. DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10410 (in Russ.)

28. Shokhnekh A.V., Khasbulatov Sh.A., Dronova E.K. [Innovative methods of strategic human resource management]. *Innovatsionnoye razvitiye ekonomiki* [Innovative development of the economy], 2018, no. 6-3 (48), pp. 73–79. (in Russ.)

29. Zakharov V.V. Improving the Efficiency of Industrial Enterprises through the Mechanisms of Motivation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 168–171. DOI: 10.14529/ctcr160319

30. Zakharov V.V. Tasks Solved in the Analysis of the Enterprise's Labor Resources. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 175–179. DOI: 10.14529/ctcr190217

*Received 10 March 2021*

---

УДК 005.95/96

DOI: 10.14529/ctcr210211

### УПРАВЛЕНИЕ СОСТОЯНИЕМ И РАЗВИТИЕМ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ДИНАМИКОЙ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ

**К.А. Коренная<sup>1</sup>, О.В. Логиновский<sup>2</sup>, В.В. Захаров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> АО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, Россия,

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Специфика управления человеческими ресурсами рассматривает в первую очередь работу с персоналом предприятий и организаций, и основная концепция, которая существовала ранее, говорила о том, что человеческий ресурс и персонал предприятий и организаций – это некоторые расходы, которые необходимо постоянно погашать. На сегодняшний момент персонал – человеческие ресурсы рассматриваются как ресурсы предприятия, и такой подход используется для повышения понимания принадлежности сотрудников и более эффективного использования их компетенций в системе организации. И соответственно, как ресурсы являются одной из важнейших характеристик предприятия, так и персонал следует относить к необходимым для устойчивого развития и функционирования ресурсам предприятия. Общая концепция управления человеческими ресурсами предусматривает набор определенных убеждений и предложений, которые сформированы и сфокусированы в одной компании, таким образом можно говорить о корпоративной культуре, о конкретных факторах, которые приняты в компании и являются в свою очередь также определенным ресурсом. **Целью исследования** является формирование актуального подхода к повышению эффективности управления человеческими ресурсами на промышленном предприятии. **Материалы и методы.** В составе материалов и методов следует отметить анализ подходов, методов и моделей управления человеческими ресурсами, представленных в научно-технической литературе, а также результатов их внедрения в практику управления промышленными предприятиями. **Результаты.** В статье обосновываются основные научные положения и необходимость формирования общей стратегии развития персонала, которая формирует у сотрудников самоопределение в организационной структуре предприятия и вектор их развития, а у руководства – четкое представление в выработке кадровых управленческих решений. **Заключение.** Нечеткая формулировка, отсутствие стратегии развития персонала или ее несоответствие общей стратегии предприятия и динамике влияния внешних и внутренних факторов формирует некую неопределенность, которая приводит в дальнейшем к «текучести» кадров и не позволяет достичь поставленных руководством предприятия целей.

*Ключевые слова:* персонал, человеческие ресурсы, стратегия, развитие персонала, управление человеческими ресурсами, кадровая политика, управление персоналом.

#### *Литература*

1. Армстронг, М. Практика управления человеческими ресурсами / М. Армстронг. – СПб.: Питер, 2009. – 328 с.

2. Афонин, Ю.А. Управленческая культура как фактор перехода к новой концепции управления «человеческим ресурсом» / Ю.А. Афонин, О.В. Галкина // *Азимут научных исследований: экономика и управление.* – 2015. – № 1 (10). – С. 13–16.

3. Беляева, Т.А. Эффективное стратегическое управление человеческими ресурсами предприятия / Т.А. Беляева, И.А. Козьева, Е.В. Кузнецов // *Дельта науки*. – 2016. – № 2. – С. 79–82.
4. Грачев, М.В. Суперкадры: Управление персоналом в международной корпорации / М.В. Грачев. – М.: Дело ЛТД, 2006. – 208 с.
5. Грехем, Х.Т. Управление человеческими ресурсами / Х.Т. Грехем, Р. Беннетт. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2006. – 180 с.
6. Гречко, Н.М. Современные особенности управления трудовыми ресурсами предприятий промышленности / Н.М. Гречко. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вят. акад. гос. службы, 2004. – 25 с.
7. Десслер, Гари. Управление персоналом: пер. с англ. / Г. Десслер. – М.: БИНОМ, 2013. – 799 с.
8. Донская, Н.А. Управление персоналом промышленного предприятия: моногр. / Н.А. Донская. – М.: Юпитер, 2005. – 204 с.
9. Евенко, Л.И. Эволюция концепций управления человеческими ресурсами / Л.И. Евенко // *Стратегия развития персонала: сб.* – Н. Новгород, 1996. – С. 33–37.
10. Егоршин, А.П. Управление персоналом / А.П. Егоршин. – Н. Новгород: НИМБ, 1999. – 624 с.
11. Зайцев, Г.Г. Управление кадрами на предприятии: персональный менеджмент / Г.Г. Зайцев, С.И. Файбушевич. – СПб.: Изд-во СПб ФИНЭК, 2009. – 354 с.
12. Захаров, В.В. Обучение персонала как инструмент повышения эффективности предприятия / В.В. Захаров // *Журнал управление инвестициями и инновациями*. – 2018. – № 1. – С. 44–47. DOI: 10.14529/iimj180105
13. Иванова, О.Э. Методологические основания концепции управления человеческими ресурсами / О.Э. Иванова // *Азимут научных исследований: экономика и управление*. – 2018. – Т. 7, № 3 (24). – С. 109–112.
14. Ильина, Л.Н. Управление кадровой политикой промышленного предприятия / Л.Н. Ильина. – М.: Юпитер, 2005. – 151 с.
15. Коренная, К.А. Информационно-ресурсное обеспечение управления промышленными предприятиями на основе прогнозно-адаптивного подхода / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов // *Информационные ресурсы России*. – 2012. – № 2 (126). – С. 16–20.
16. Коренная, К.А. Концепция управления группой промышленных предприятий / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов // *Известия вузов. Уральский регион*. – 2011. – № 2. – С. 27–32.
17. Коренная, К.А. Основные проблемы управления человеческими ресурсами / К.А. Коренная // *Развитие информационного общества и информационное обеспечение административной реформы в субъектах РФ: науч. тр. / под ред. д.т.н., проф., заслуж. деят. науки РФ О.В. Логиновского*. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ: ЦНТИ, 2009. – С. 248–254.
18. Коренная, К.А. Подход, методы и модели управления трудовыми ресурсами как важнейшие составляющие современной концепции управления промышленным предприятием / К.А. Коренная // *Известия вузов. Уральский регион*. – 2012. – № 3. – С. 47–61.
19. Коренная, К.А. Управление промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности: моногр. / К.А. Коренная, О.В. Логиновский, А.А. Максимов; под ред. д-ра техн. наук проф. А.Л. Шестакова. – Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2013. – 403 с.
20. Логиновский, О.В. Корпоративное управление: науч. изд. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение-1, 2007. – Т. 2. – 624 с.
21. Логиновский, О.В. Управление промышленным предприятием: науч. изд. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – Т. 1. – 576 с.
22. Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр. / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 410 с.
23. Максимов, А.А. Использование статистических оценок и математических моделей в оценке деятельности персонала / А.А. Максимов, К.А. Коренная // *Развитие информационного общества и информационное обеспечение административной реформы в субъектах РФ: науч. тр. / под ред. д.т.н., проф., заслуж. деят. науки РФ О.В. Логиновского*. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ: ЦНТИ, 2009. – С. 240–247.

24. Максимов, А.А. Управление человеческими ресурсами в ОАО «Кузнецкие ферросплавы» / А.А. Максимов, К.А. Коренная // *Методы, модели и средства анализа и обработки данных в информационных системах органов исполнительной власти: науч. тр. / под ред. заслуж. деят. науки РФ, д.т.н., проф. О.В. Логиновского.* – Челябинск; Изд-во ЮУрГУ: ЦНТИ, 2010. – С. 154–190.

25. Михайлов, Ф.Б. Управление персоналом: классические концепции и новые подходы / Ф.Б. Михайлов. – Казань, 1997. – 136 с.

26. Мордовин, С.К. Управление человеческими ресурсами / С.К. Мордовин. – М: ИНФРА, 2007. – 320 с.

27. Смолькин, В.П. Стратегическое управление человеческими ресурсами: основные подходы и понятия / В.П. Смолькин, Е.В. Воловая // *Научное обозрение.* – 2016. – № 16. – С. 100–105. DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10410

28. Шохнех, А.В. Инновационные методы стратегического управления человеческими ресурсами / А.В. Шохнех, Ш.А. Хасбулатов, Е.К. Дронова // *Инновационное развитие экономики.* – 2018. – № 6-3 (48). – С. 73–79.

29. Zakharov, V.V. Improving the Efficiency of Industrial Enterprises through the Mechanisms of Motivation / V.V. Zakharov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 168–171. DOI: 10.14529/ctcr160319

30. Zakharov, V.V. Tasks Solved in the Analysis of the Enterprise's Labor Resources / V.V. Zakharov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 175–179. DOI: 10.14529/ctcr190217

**Коренная Кристина Александровна**, канд. техн. наук, генеральный директор, АО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк; kkris221@mail.ru.

**Логиновский Олег Витальевич**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; loginovskiiiov@susu.ru.

**Захаров Вадим Владимирович**, инженер кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; zakharovvv@susu.ru.

*Поступила в редакцию 10 марта 2021 г.*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Korennyaya, K.A. Management of the State and Development of Human Resources of Industrial Enterprise in Accordance with the Dynamics of the Influence External and Internal Factors / K.A. Korennaya, O.V. Loginovskiy, V.V. Zakharov // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника».* – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 114–122. DOI: 10.14529/ctcr210211

### FOR CITATION

Korennyaya K.A., Loginovskiy O.V., Zakharov V.V. Management of the State and Development of Human Resources of Industrial Enterprise in Accordance with the Dynamics of the Influence External and Internal Factors. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 114–122. DOI: 10.14529/ctcr210211

# Автоматизированные системы управления технологическими процессами

УДК 622.6 + 004.92

DOI: 10.14529/ctcr210212

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОДОМЕТРИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНО-ВЫЕМОЧНОЙ МАШИНЫ ПОД ЗЕМЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

**И.М. Шевелев, А.В. Затонский**

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Березниковский филиал, г. Березники, Россия*

В современной горнодобывающей промышленности актуальной технической задачей является внедрение автоматических систем, обеспечивающих ориентирование и позиционирование горно-выемочных машин при отработке промышленных пластов. Существует несколько основных технологий, применяемых для позиционирования комбайнов под землей, однако сфера их применения ограничена различными горно-геологическими и технологическими факторами. В условиях отработки промышленных пластов ВКМКС подавляющее большинство из них не подходит. **Цель работы:** разработать новый подход к задаче одометрического позиционирования горно-выемочной машины под землей, а также создать имитационную модель, позволяющую с необходимой степенью точности определять текущее и прогнозируемое удаление комбайна от начала выработки в условиях зашумленности измерений. **Материалы и методы.** В качестве технического решения поставленной задачи предлагается применение технологии BLE (Bluetooth Low Energy): iBeacon-маячки будут сбрасываться по ходу движения комбайна, а датчик, прикрепленный сзади бункера-перегрузателя, будет считывать расстояния до маячка. Для имитационного моделирования неопределенности при движении комбайна рассматривалась гипотеза о нормальном распределении скорости движения на участках случайной длины. При моделировании сбрасывания маячка использовалась гипотеза о том, что величина рассеяния маячка при падении является двумерной нормально распределенной случайной величиной. Зашумленные измерения генерировались стохастическим процессом с возрастающими границами разброса при удалении датчика от маячка. В качестве инструмента, обрабатывающего зашумленные измерения, применялся фильтр Калмана. **Результаты.** Создана модель, имитирующая случайные скорости движения комбайна на участках случайной длины, а также смоделирован случайный разброс при скидывании Bluetooth-маячков. Для генерации измерений датчика разработан алгоритм, позволяющий учитывать увеличение зашумленности показаний при удалении от ближайшего сброшенного маячка. Для обработки моделируемых измерений и правильного определения дистанции маячок-датчик использован алгоритм Калмановской фильтрации. **Заключение.** Предлагаемый подход и созданная имитационная модель позволяют с заданной степенью точности определять и прогнозировать расстояние до удаляющегося комбайна при отработке промышленных пластов.

*Ключевые слова:* горно-выемочные машины, подземное позиционирование, одометр, Bluetooth Low Energy, iBeacon, фильтр Калмана.

### Введение

В современной горной промышленности оптимальные режимы работы различных комплексов и механизмов, обеспечивающих необходимую эффективность при добыче полезного ископаемого, не могут быть выполнены без внедрения автоматизированных систем управления. Актуальность автоматизации растет и в калийной отрасли, где точность отработки достаточно небольших промышленных пластов может быть обеспечена только современными программно-техническими средствами, внедряемыми в отработанные годами процессы механизации при проведении выработок [1].

## Автоматизированные системы управления...

Проведение горных выработок при отработке пластов осуществляется посредством добычных комбайновых комплексов (рис. 1), в состав которых входят проходческо-очистной комбайн, бункер-перегрузатель и шахтный самоходный вагон [2].

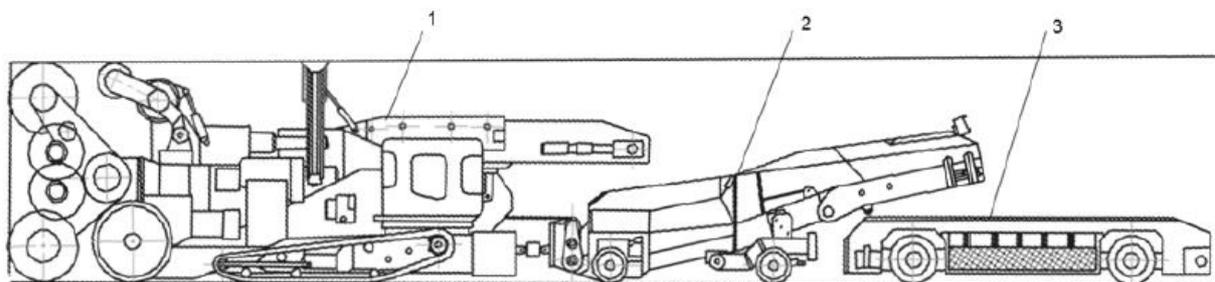


Рис. 1. Комбайновый комплекс: 1 – проходческо-очистной комбайн; 2 – бункер-перегрузатель; 3 – шахтный самоходный вагон  
Fig. 1. Combine complex: 1 – road heading machine; 2 – loading bunker; 3 – mine self-propelled car

Важность соблюдения маркшейдерских указаний при горнопроходческих работах на ВКМКС обуславливается необходимостью оставления целиков и камер заданных проектируемых размеров в целях прежде всего сохранения несущей мощности водозащитной толщи [3].

Таким образом, проблема ориентирования и позиционирования горно-выемочной машины под землей является важной технической задачей, которая может быть решена в том числе и внедрением автоматических систем, обеспечивающих проведение выработок в заданном направлении, с целью обеспечения программного контроля за положением комбайна в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Для решения поставленной задачи необходимы датчики по отклонению ГВМ в горизонтальной и вертикальной плоскости, а также одометрические данные по удалению комбайна от стартовой позиции (предполагается, что крен комбайна влево-вправо отсутствует в связи с надежными данными гироскопа в кабине комбайнера).

В данной работе рассматривается задача моделирования показаний виртуального одометра, а также процесс построения алгоритма, необходимого для позиционирования ГВМ по этим показаниям. При этом учитывается, что одометр будет использоваться как вспомогательный датчик в комбинации с другими датчиками [4, 5], так как из-за движения комбайна в разных плоскостях данных одного одометра для оценки положения будет недостаточно.

Существуют различные технологии, применяемые для ориентации ГВМ под землей [6], однако в условиях отработки промышленных пластов ВКМКС подавляющее большинство из них не подходит. Применение лазерных и оптических систем для ориентации невозможно в связи с низкой видимостью по причине неизбежной запыленности проходимых выработок; тахеометрические системы не могут быть применимы из-за ограничений на использование различного вида транспорта для отбитой горной массы; применение инерциальных систем будет связано с большими погрешностями в связи с высокими вибрационными возмущениями комбайна, вызванными работой исполнительного органа, а также самим перемещением за счет гусеничного хода.

### 1. Предлагаемое техническое решение

В данной работе для решения одометрической задачи предлагается использовать технологию BLE (Bluetooth Low Energy), которая уже давно внедряется для решения различных задач indoor-навигации внутри помещений [7, 8]. Сзади бункера-перегрузателя по центру на высоте  $h$  от почвы камеры будет установлен датчик, принимающий сигнал. Чуть ниже под датчиком будет находиться устройство, сбрасывающее iBeacon-маячок при удалении датчика на заданный шаг  $\Delta$  от предыдущего сброшенного маячка (рис. 2).

При удалении комбайна от последнего сброшенного маячка датчик будет принимать все уменьшающийся уровень сигнала и показывать расстояние между маячком и датчиком (рис. 3). Значения расстояний, соответствующие определенному уровню сигнала, будут являться техническими характеристиками конкретного устройства, настраиваемыми под условия эксплуатации и определяемыми при его калибровке [9].

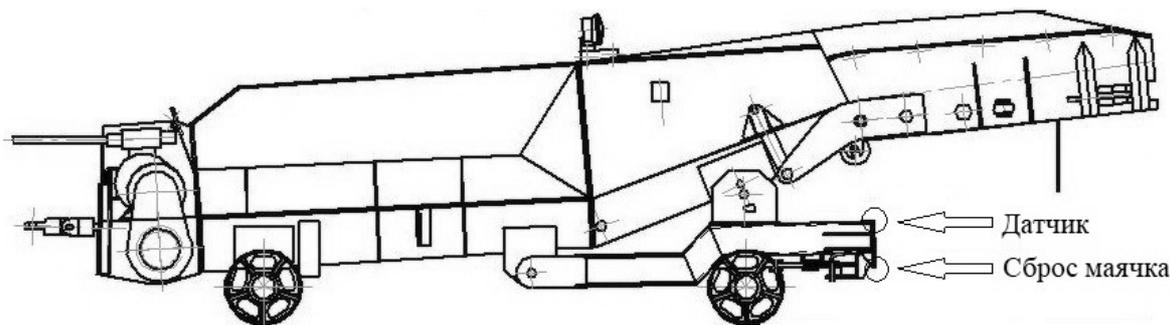


Рис. 2. Расположение датчика и устройства для сбрасывания маячка на бункере-перегрузателе

Fig. 2. Location of the sensor and device for dropping the beacon on the loading bunker on the loading bunker



Рис. 3. Пример сбрасывания маячков по ходу движения комбайна (срез сверху)  
Fig. 3. An example of dropping beacons in the direction of the combine's movement (cut from above)

Для моделирования получаемых датчиком от ближайшего маячка зашумленных наблюдений была построена модель движения комбайна.

## 2. Создание имитационной модели

### 2.1. Моделирование движения комбайна

На первом шаге моделирования было сделано предположение, что процесс проходки всей длины обрабатываемой камеры состоит из нескольких участков, на которых скорость комбайна примерно постоянна. Поэтому камера длиной 200 метров разбивалась на случайное количество отрезков случайной длины  $U$ . При этом принималась гипотеза о том, что случайная величина  $U$  распределена равномерно, так как длина каждого из таких отрезков равновероятна, и имеет плотность распределения:

$$f_U(u) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{если } u \in [a, b]; \\ 0, & \text{если } u \notin [a, b], \end{cases} \quad (1)$$

где значения  $a$  и  $b$  могут быть любыми от 0 до 200 (в работе принималось, например, что  $a = 0$ ,  $b = 20$ ).

Значения  $U_i$  моделировались до тех пор, пока их сумма не превышала длину обрабатываемой камеры:  $\sum_{i=1}^k U_i \leq 200$ . При этом длина последнего участка корректировалась так:

$$U_{k+1} = U_{k+1} - \left( \sum_{i=1}^{k+1} U_i - 200 \right).$$

На следующем шаге моделирования для каждого значения  $U_i$  генерировалось значение  $V_i$  – примерной средней скорости комбайна на данном участке. Была принята гипотеза о том, что  $V$  – случайная величина с нормальным законом распределения и плотностью вероятности [10]:

$$f_V(v) = \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-v_{cp})^2}{2\sigma_v^2}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_v$  – среднеквадратическое отклонение от  $MV = v_{cp}$ .

Из нормативных документов известно, что максимальная скорость комбайна на перегонах равняется 3 м/мин. Однако при отработке горной породы такая скорость не годится, поэтому среднее значение скорости  $v_{cp}$  при отработке было рассчитано по-другому [11, 12]:

$$v_{cp} = \frac{Q}{S \cdot \gamma}, \quad (3)$$

где  $Q$  – средняя производительность комбайна Урал-20П, т/мин;  $S$  – площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – удельная плотность добываемых солевых пород, т/м<sup>3</sup>.

В итоге было получено следующее значение для средней скорости  $v_{cp}$  при отработке промышленных пластов:

$$v_{cp} = \frac{8 \text{ т/мин}}{15,6 \text{ м}^2 \cdot 2,08 \text{ т/м}^3} \approx 0,25 \text{ м/мин} = 0,004 \text{ м/с}.$$

Для расчета  $\sigma_v$  предполагалось, что минимальная скорость и максимальная скорость при отработке пласта примерно равноудалены от  $v_{cp}$ , то есть минимальная скорость близка к нулю, а максимальная близка к 0,01 м/с, тогда согласно правилу «трех сигма»:

$$\sigma_v = \frac{0,01 \text{ м/с} - 0,004 \text{ м/с}}{3} \approx 0,002 \text{ м/с}.$$

Таким образом удалось смоделировать движение комбайна со случайными скоростями на отрезках случайной длины. Посекундный замер расстояния от удаляющегося датчика до начала координат показан на рис. 4.

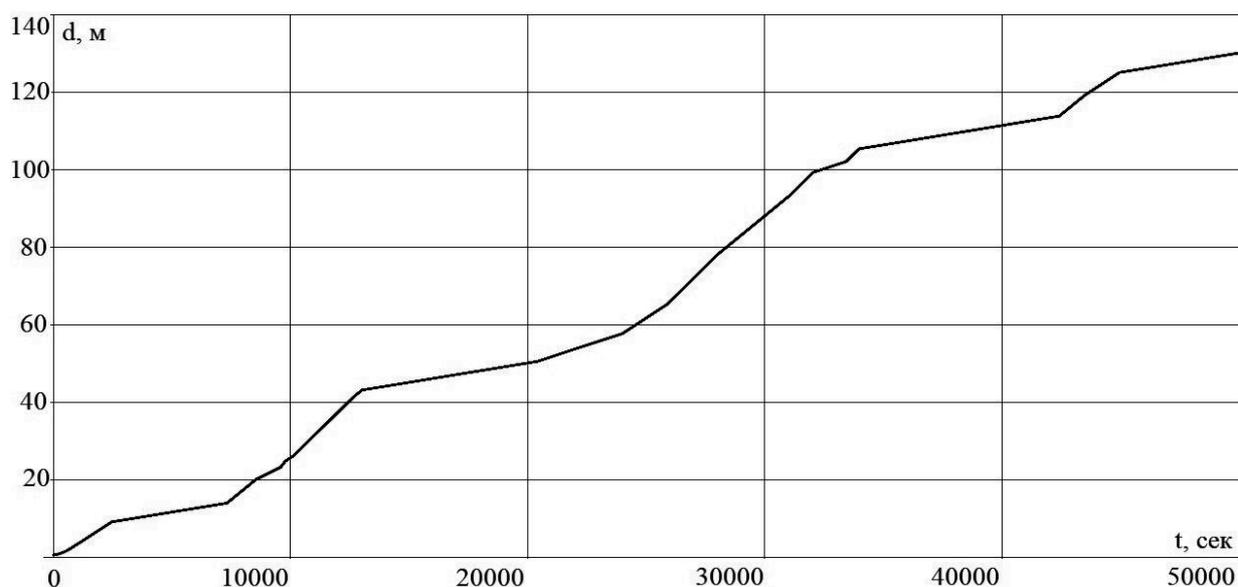


Рис. 4. Посекундный замер расстояния от удаляющегося датчика до начала координат  
Fig. 4. Secondary measurement of the distance from the receding sensor to the origin

**2.2. Моделирование сброса маячка**

Далее моделировалось случайное скидывание маячка. Маячок из-за вибрации комбайна при скидывании случайно отклоняется в стороны по координате  $X$  и  $Y$ . Для моделирования была рассмотрена гипотеза о нормальном распределении такой двумерной случайной величины  $M(X, Y)$  с плотностью распределения:

$$\varphi_M(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} e^{-L(x, y)}, \quad (4)$$

$$\text{где } L(x, y) = \frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \left( \frac{x-a_x}{\sigma_x} \right)^2 - 2\rho \cdot \frac{x-a_x}{\sigma_x} \cdot \frac{y-a_y}{\sigma_y} + \left( \frac{y-a_y}{\sigma_y} \right)^2 \right].$$

При этом считалось, что случайные величины  $X$  и  $Y$  независимы друг от друга (хотя, вообще говоря, это необязательно так, но в данной модели рассматривался именно такой случай), поэтому коэффициент корреляции  $\rho$  между  $X$  и  $Y$  практически будет равен нулю, то есть им можно пренебречь, поэтому уравнение для плотности распределения двумерной случайной величины упрощалось:

$$\varphi_M(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-L(x, y)}, \quad (5)$$

где

$$L(x, y) = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{x-a_x}{\sigma_x} \right)^2 + \left( \frac{y-a_y}{\sigma_y} \right)^2 \right],$$

где  $a_x$  и  $a_y$  – координаты  $x$  и  $y$  устройства сбрасывания маячка в момент сбрасывания;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – среднеквадратические отклонения, характеризующие разброс по  $x$  и  $y$  соответственно; в модели принималось, что  $\sigma_x = \sigma_y = \frac{1-0}{3} = 0,333$  м согласно «правилу трех сигма» для максимального разброса в 1 м.

На рис. 5 показан посекундный замер расстояния от удаляющегося датчика до начала координат (линия 1), а также посекундный замер от удаляющегося датчика до ближайшего сброшенного маячка (линия 2), с учетом того, что шаг сбрасывания равен 15 м.

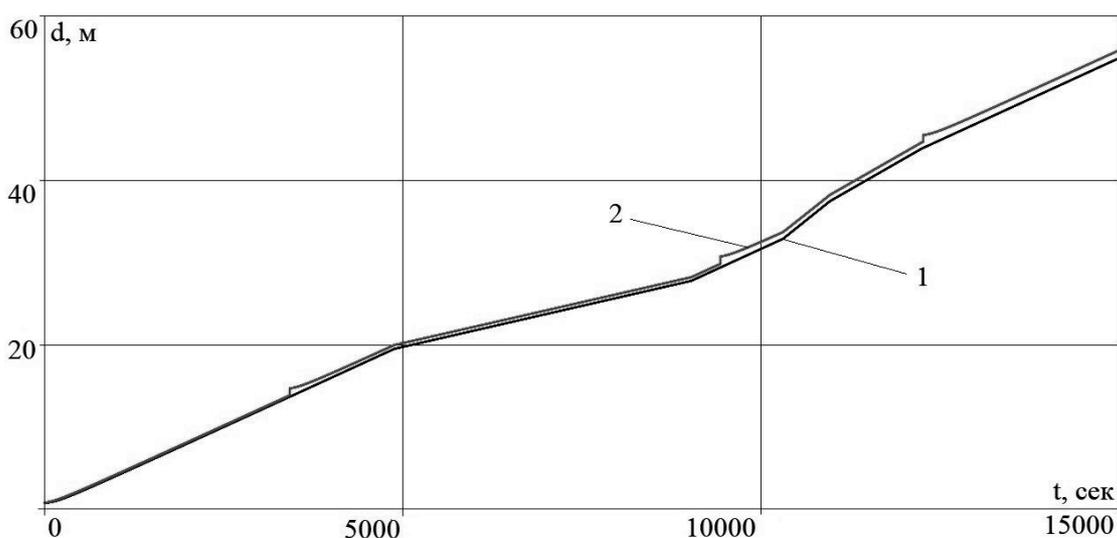


Рис. 5. Посекундный замер расстояния: 1 – от удаляющегося датчика до начала координат; 2 – от удаляющегося датчика до ближайшего сброшенного маячка

Fig. 5. Measuring the distance per second: 1 – from the remote sensor to the origin; 2 – from the remote sensor to the nearest dropped beacon

### 2.3. Моделирование шума датчика

Последующим шагом моделирования было моделирование шума измерений расстояний удаляющегося датчика до ближайшего маячка. Шум показаний датчика моделировался нормально распределенной случайной величиной  $D$  с плотностью распределения:

$$f_D(d) = \frac{1}{\sigma_{\partial_k} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d-\partial_k)^2}{2\sigma_{\partial_k}^2}}, \quad (6)$$

где  $\partial_k$  – расстояние от ближайшего маячка до датчика в  $k$ -й момент времени;  $\sigma_{\partial_k}$  – среднеквадратическое отклонение, характеризующее границы разброса показаний датчика в  $k$ -й момент времени.

При этом при моделировании шума необходимо было учитывать, что границы разброса зашумленных показаний возрастают линейно в зависимости от удаления датчика от маячка [13]. Поэтому было принято, что верхняя граница  $g_2(\partial_k)$  и нижняя границы  $g_1(\partial_k)$  шума зависят от расстояния  $\partial_k$  следующим образом:

$$\begin{cases} g_1(\partial_k) = 0,5\partial_k; \\ g_2(\partial_k) = 1,5\partial_k, \end{cases} \quad (7)$$

что отображено на рис. 6 ( $R_1$  – расстояние от маячка до датчика, средняя линия –  $\partial_k$ , верхняя граница –  $g_2(\partial_k)$ , нижняя граница –  $g_1(\partial_k)$ ), а  $\sigma_{\partial_k}$  в каждый  $k$ -й момент времени рассчитывалось согласно правилу «трех сигма» так:

$$\sigma_{\partial_k} = \frac{[g_2(\partial_k) - g_1(\partial_k)] / 2}{3}, \quad (8)$$

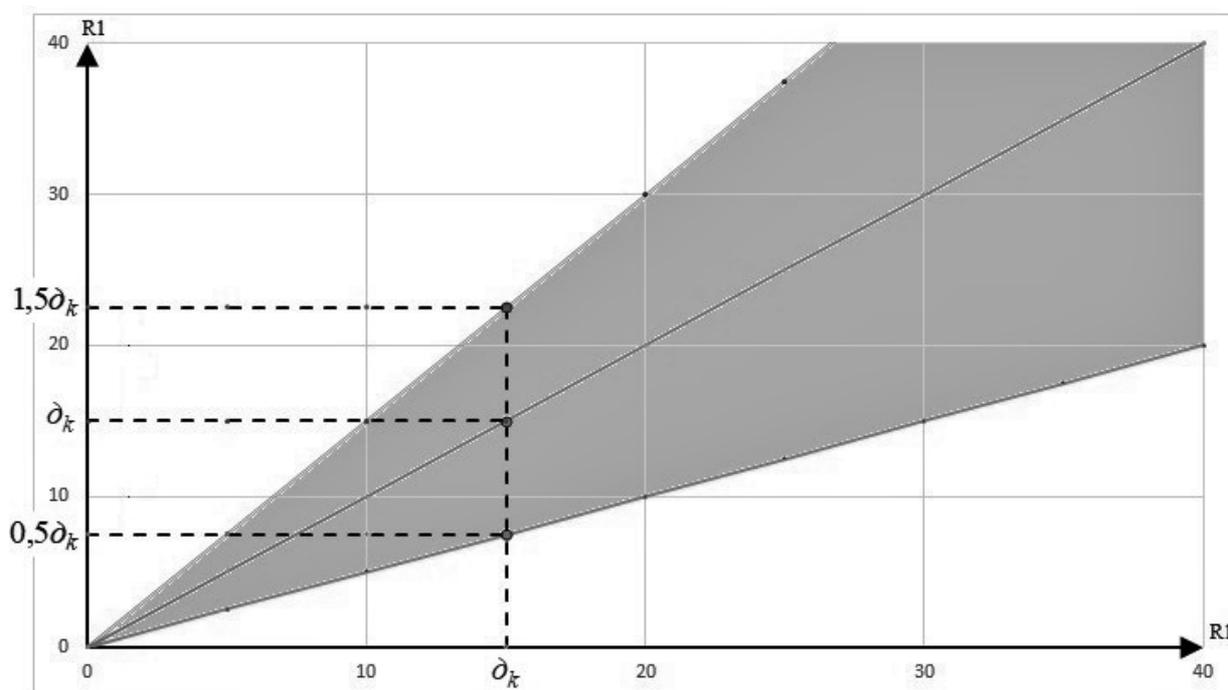


Рис. 6. Возрастание границ разброса измерений при удалении датчика от маячка  
Fig. 6. The increase in the measurement scatter boundaries when the sensor moves away from the beacon

В результате удалось смоделировать зашумленные случайные показания  $d_k$  удаляющегося от ближайшего маячка датчика с шагом скидывания 15 м (рис. 7).

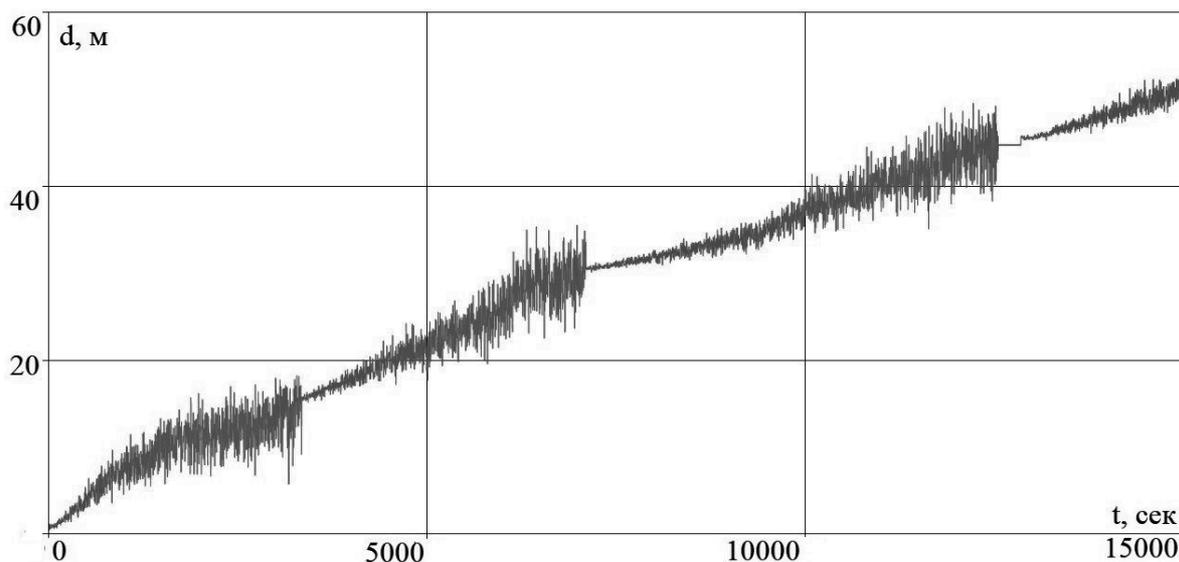


Рис. 7. Зашумленные посекундные замеры расстояния от датчика до ближайшего маячка  
(шаг сбрасывания равен 15 м)

Fig. 7. Noisy per-second measurements of the distance from the sensor to the nearest beacon  
(dropping step is 15 m)

### 3. Обработка результатов измерения

При обработке зашумленных измерений могут быть использованы различные математические инструменты [14]. В данной работе для устранения погрешности получаемых измерений датчика  $d_k$  и получения хорошей точности для посекундной оценки расстояния при удалении датчика от маячка было принято решение использовать фильтр Калмана [15]. Математическая модель процесса, описываемого фильтром, выглядит так:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F} \cdot \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{U}_k + \mathbf{W}_k, \quad (9)$$

где  $\mathbf{X}_k$  – значения вектора состояния системы в момент  $k$ , прогнозируемые фильтром на основании предыдущего вектора значений  $\mathbf{X}_{k-1}$ ; так как для моделирования движения датчика были использованы две переменные: координата  $x_k$  и скорость  $\dot{x}_k$  (координата  $y_k$  в данной модели не рассматривалась, так как предполагалось, что комбайн движется прямо (за отклонения при повороте будут отвечать другие датчики), координата  $z_k$  в данной модели также не рассматривалась, так как предполагалось, что комбайн движется без отклонений в плоскости  $OXY$ ); вектор  $\mathbf{X}_k$  выглядит так:

$$\mathbf{X}_k = \begin{pmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \end{pmatrix};$$

$\mathbf{F}$  – матрица эволюции процесса; так как в качестве модели процесса была взята модель равномерного движения на каждом  $i$ -м участке, матрица эволюции процесса получилась такой:

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$\mathbf{B}$  – матрица управления, которая прикладывается к вектору управляющих воздействий  $\mathbf{U}_k$ ; так как в рассматриваемой модели происходит только наблюдение за показаниями датчика, то данное слагаемое отсутствует;

$\mathbf{W}_k$  – нормальный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей  $\mathbf{Q}$ , который описывает случайный характер эволюции системы:  $\mathbf{W}_k \sim N(0, \mathbf{Q})$ ; при моделировании движения датчика предполагалось, что на  $i$ -м участке комбайн будет двигаться со скоростью  $V_i$ , но из-за неровностей почвы камеры, из-за разной плотности обрабатываемых пород, проскальзывания гусениц комбайна и ряда других случайных факторов скорость

в момент времени  $k$  всегда будет немного отличаться от рассмотренной скорости  $V_i$  на данном  $i$ -м участке; данная случайность при расхождении прогнозируемых показаний от реальных обуславливает необходимость добавления к модели слагаемого  $\mathbf{W}_k$ ; ковариационная матрица  $\mathbf{Q}$  будет определяться следующим образом:

$$\mathbf{Q} = \sigma_v^2 \mathbf{G} \mathbf{G}^T = \begin{pmatrix} \Delta t^2 & \Delta t \\ \Delta t & 1 \end{pmatrix} \cdot \sigma_v^2; \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} \Delta t \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где  $\mathbf{G}$  – столбец из матрицы эволюции системы  $\mathbf{F}$  с наивысшим порядком производной;  $\sigma_v$  – среднее квадратическое отклонение от  $v_{cp}$ .

Процесс прогнозирования алгоритмом Калмановской фильтрации [16–19] подразумевает два этапа: экстраполяции и коррекции. В нашей модели на этапе экстраполяции рассчитывалось значение

$$\begin{pmatrix} x_k \\ \dot{x}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{k-1} \\ \dot{x}_{k-1} \end{pmatrix}.$$

При этом для расчета первого шага предполагалось, что при начале движения комбайн находится в точке с координатой  $x_0 = 0$  м, и имеет скорость  $\dot{x}_0 = 0,004$  м/с в начальный момент времени.

В момент времени  $k$  производится измерение  $d_k$  – расстояния от маячка до датчика. По наблюдаемому значению  $d_k$  рассчитывается координата

$$x_k = \sqrt{d_k^2 - h^2}, \quad (11)$$

где  $h$  – это высота расположения датчика от почвы камеры.

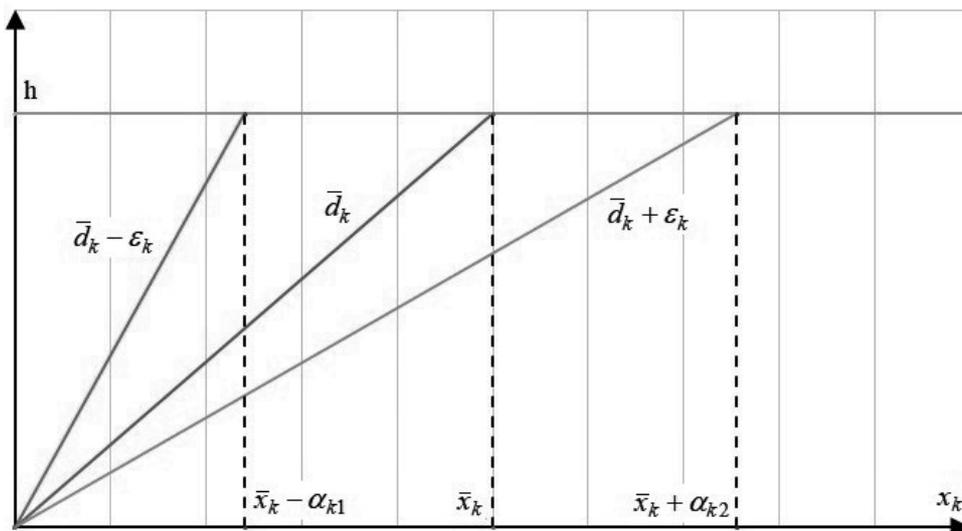
В соответствии с моделью Калмана зашумленный вектор измерений  $\mathbf{X}_k$  и истинное значение вектора измеряемой переменной  $\tilde{\mathbf{X}}_k$  связаны между собой уравнением

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{H} \cdot \tilde{\mathbf{X}}_k + \mathbf{E}_k, \quad (12)$$

где  $\mathbf{H}$  – матрица измерений, связывающая истинный вектор состояния и вектор произведенных измерений;  $\mathbf{E}_k$  – белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей  $\mathbf{R}_k$ ,  $\mathbf{E}_k \sim N(0, \mathbf{R}_k)$ ; в нашем случае из-за того, что датчик один и измеряется только координата, матрица измерений будет такой:  $\mathbf{H} = (1 \ 0)$ , где единица означает, что параметр-координата измеряется, а ноль – что параметр-скорость не измеряется, а в качестве  $\mathbf{R}_k$  можно рассмотреть дисперсию  $\sigma_{\xi_k}^2$  случайного процесса  $\xi_k$ , характеризующего шум одного датчика:  $\xi_k \sim N(0, \sigma_{\xi_k}^2)$ ,  $\mathbf{R}_k = \sigma_{\xi_k}^2$ .

Так как при удалении датчика от маячка разброс измерений возрастает, дисперсия процесса  $\sigma_{\xi_k}^2$  также должна меняться, поэтому для моделирования по Калману необходимо оценить хотя бы предположительно, как будет изменяться  $\sigma_{\xi_k}^2$  при удалении датчика от маячка; в нашем примере предположительно бралось среднее значение скорости  $v_{cp} = 0,004$  м/с и предполагалось, что разброс значений  $\varepsilon$  возрастает согласно правилу, рассмотренному выше (см. рис. 6).

При такой средней скорости для каждого  $\bar{x}_k$  при удалении от последнего сброшенного маячка (с учетом того, что маячок сбрасывается с шагом  $\Delta = 15$  м) можно рассчитать  $\bar{d}_k = \sqrt{\bar{x}_k^2 + h^2}$ , затем рассчитать предполагаемый разброс  $\check{d}_{k1} = \bar{d}_k - \varepsilon_k$  и  $\check{d}_{k2} = \bar{d}_k + \varepsilon_k$  и затем рассчитать  $\check{x}_{k1} = \bar{x}_k - \alpha_{k1} = \sqrt{(\bar{d}_{k1} - \varepsilon_k)^2 - h^2}$  и  $\check{x}_{k2} = \bar{x}_k + \alpha_{k2} = \sqrt{(\bar{d}_{k2} + \varepsilon_k)^2 - h^2}$  (рис. 8), тогда  $\sigma_{\xi_k}^2 = \frac{[\check{x}_{k2} - \check{x}_{k1}]^2}{3}$  (по правилу «трех сигма»).

Рис. 8. Графическая интерпретация расчета  $\sigma_{\xi_k}$ Fig. 8. Graphic interpretation of the calculation of the  $\sigma_{\xi_k}$ 

Также на этапе экстраполяции рассчитывается матрица

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{F} \cdot \mathbf{P}_{k-1} \cdot \mathbf{F}^T + \mathbf{Q}. \quad (13)$$

На нулевом шаге значения матрицы  $\mathbf{P}_0$  задаются в соответствии с тем, чему мы больше доверяем вначале при построении: заданной модели или получаемым измерениям от датчика. В нашей модели сильный разброс значений датчика наблюдается при удалении от маячка, поэтому вначале после сброса маячка мы больше будем доверять датчику, а не модели:

$$\mathbf{P}_0 = \begin{pmatrix} 0,1 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix}.$$

Далее происходит этап коррекции для расчета коэффициента усиления Калмана.

Рассчитываем вектор, характеризующий случайные отклонения полученных на шаге  $k$  значений измеряемой величины от величины, ожидаемой при произведенной экстраполяции:

$$\mathbf{E}_k = \mathbf{X}_k - \mathbf{H} \cdot \tilde{\mathbf{X}}_k. \quad (14)$$

Далее рассчитываем матрицу  $\mathbf{K}_k$ , состоящую из Калмановских коэффициентов усиления:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{S}_k^{-1}, \quad (15)$$

где  $\mathbf{S}_k$  – ковариационная матрица для вектора отклонения (вектора ошибки), рассчитываемая следующим образом:

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}_k \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_k. \quad (16)$$

Далее происходит коррекция полученной экстраполяции вектора  $\mathbf{X}_k$  моделируемой величины:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{X}_k + \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{E}_k. \quad (17)$$

Из скорректированной координаты  $\hat{x}_k$  рассчитывается скорректированное значение расстояния:

$$\hat{d}_k = \sqrt{\hat{x}_k^2 + h^2}. \quad (18)$$

Далее на последнем шаге происходит коррекция матрицы  $\mathbf{P}_k$  оценки вектора состояния системы:

$$\hat{\mathbf{P}}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \cdot \mathbf{H}) \cdot \mathbf{P}_k, \quad (19)$$

где  $\mathbf{I}$  – единичная матрица.

Посекундные результаты зашумленных замеров расстояний от датчика до ближайшего маячка, а также расстояния, обработанные посредством алгоритма Калмановской фильтрации, представлены на рис. 9.

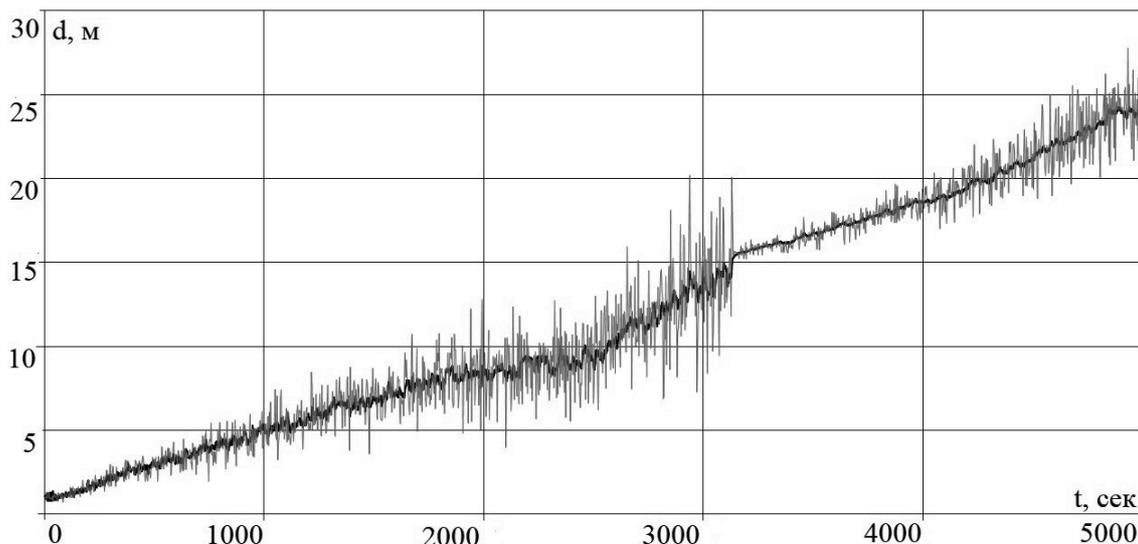


Рис. 9. Обработка измерений алгоритмом Калмановской фильтрации  
 Fig. 9. Processing of measurements by the Kalman filtering algorithm

### Заключение

Подводя итог, можно сказать следующее. Процесс моделирования состоял из нескольких этапов. На первых этапах была создана имитационная модель процесса движения комбайна посредством ее сведения к модели равномерного движения материальной точки, в качестве которой выступал датчик, расположенный на высоте  $h$  от почвы камеры.

Следующим этапом было моделирование сбрасывания маячков и замера расстояний от датчика до последнего маячка сначала без учета зашумленности показаний датчика, а затем с учетом шума. В результате удалось смоделировать зашумленные случайные показания  $d_k$  удаляющегося от ближайшего маячка датчика с шагом скидывания 15 м.

Далее по зашумленным наблюдениям посредством инструмента Калмановской фильтрации удалось определять и прогнозировать расстояние до удаляющегося объекта.

Таким образом, полученные в ходе решения поставленной одометрической задачи результаты дают возможность выбирать различные «адекватные» комбинации параметров с целью минимизации величины  $\beta$ , характеризующей погрешность замеров расстояния:

$$\beta = f(q, \Delta, \eta, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_{d_k}, K), \quad (20)$$

где  $q$  – количество сбрасываемых за шаг маячков;  $\Delta$  – шаг сбрасывания маячков;  $\eta$  – количество измерений за единицу времени;  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – разбросы при сбрасывании маячка;  $\sigma_{d_k}$  – разброс показаний датчика;  $K$  – «настройки» фильтра Калмана.

### Литература

1. Секунцов, А.И. Пути совершенствования комбайновой технологии разработки Верхнекамского калийного месторождения / А. И. Секунцов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2013. – № 2. – С. 23–28.
2. Шишлянников, Д.И. Развитие средств механизированной добычи калийных руд / Д.И. Шишлянников, А.Б. Максимов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 3. – С. 15–21.
3. Соловьев, В.А. Пластовая подготовка выемочных блоков при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей / В.А. Соловьев, А.И. Секунцов, М.В. Скопинов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 4. – С. 56–62.
4. Система позиционирования и идентификации мобильной робототехнической платформы в ограниченном и открытом пространстве / Т.С. Евдокимова, А.А. Синодкин, Л.О. Федосова и др. // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. – 2018. – № 2. – С. 16–25.

5. Голован, А.А. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 1 / А.А. Голован, И.В. Никитин // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. – 2015. – № 2. – С. 69–72.
6. Анализ систем позиционирования микротоннелепроходческих комплексов / А.В. Батюков, А.А. Гуммель, В.С. Пузин и др. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 26–36.
7. Kaluza, M. Analysis of an indoor positioning systems / M. Kaluza, K. Beg, B. Vukelic // Zbornik Veleucilista u Rijeci. – 2017. – Vol. 5, no. 1 – P. 13–32.
8. Фальков, Е. В. Применение маячков Beacon и технологии Bluetooth Low Energy для построения систем навигации в зданиях / Е.В. Фальков, А.Ю. Романов // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2015. – № 18. – С. 62–65.
9. Возможности позиционирования внутри помещений с помощью bluetooth устройств / В.М. Гриняк, А.С. Девятисильный, В.И. Люлько и др. // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 132–143.
10. Клейнен, Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. Вып. 1 / Дж. Клейнен; пер. с англ. Ю.П. Адлера, К.Д. Аргуновой, В.Н. Варыгина, А.М. Талалая; под ред. и с предисл. Ю.П. Адлера и В.Н. Варыгина. – М.: Статистика, 1978. – 221 с.
11. Проходческо-очистные комбайны «Урал» для добычи калийной руды и каменной соли / В.В. Семенов, М.А. Мапшер, В.П. Петров и др. // Горное оборудование и электромеханика. – 2008. – № 8. – С. 17–21.
12. Красников, Ю.Д. Анализ теоретической производительности очистного комбайна при добыче сильвинита / Ю.Д. Красников, Т.П. Щерба // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 1. – С. 159–164.
13. Ionescu, G. Improving distance estimation in object localization with Bluetooth Low Energy / G. Ionescu, C. Martinez de la Osa, M. Deriaz // SENSORCOMM 2014: The eighth international conference on sensor technologies and applications. – 2014. – No. 8 – P. 45–49.
14. Кориков, А.М. Ориентация горных технологических машин на основе микроэлектромеханических систем / А.М. Кориков, Я.Е. Мещеряков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21, № 4. – С. 92–97.
15. Охотин, А.Л. Инерциальная навигация в подземной маркшейдерии / А.Л. Охотин, Е.Н. Беляев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2010. – № 1. – С. 180–182.
16. Kalman, R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems / R.E. Kalman // Journal of Basic Engineering. – 1960. – Vol. 82, no. 1. – P. 35–45.
17. Kalman, R.E. New results in linear filtering and prediction theory / R.E. Kalman, R.S. Bucy // Journal of Basic Engineering. – 1961. – Vol. 83, no. 1. – P. 95–108.
18. Браммер, К. Фильтр Калмана – Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация: пер. с нем. / К. Браммер, Г. Зиффлинг. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 200 с.
19. Foxlin, E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter / E. Foxlin // Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium. – 1996. – P. 185–195.

**Шевелев Илья Михайлович**, старший преподаватель кафедры технологии и комплексной механизации разработки месторождений полезных ископаемых, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; [iliyashevelev@mail.ru](mailto:iliyashevelev@mail.ru).

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; [zhenon@narod.ru](mailto:zhenon@narod.ru).

Поступила в редакцию 31 марта 2021 г.

## SOLUTION OF THE PROBLEM OF ODOMETRIC POSITIONING OF A MINING MACHINE UNDER THE GROUND BY USING A KALMAN FILTER

I.M. Shevelev, [iliyashevelev@mail.ru](mailto:iliyashevelev@mail.ru),  
A.V. Zatonkiy, [zxeon@narod.ru](mailto:zxeon@narod.ru)

Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation

In the modern mining industry, an urgent technical challenge is the introduction of automatic systems that provide orientation and positioning of mining machines during the development of industrial seams. There are several basic technologies used for positioning combines underground, but their scope is limited by various mining, geological and technological factors. In the conditions of industrial development of VKMKS seams, the vast majority of them are not suitable. **Aim.** To develop a new approach to the problem of odometric positioning of a mining machine under the ground, as well as to create a simulation model that allows with the required degree of accuracy to determine the current and predicted distance of the miner from the start of production in conditions of noisy measurements. **Materials and methods.** As a technical solution to the task, the use of BLE (Bluetooth Low Energy) technology is proposed: iBeacon beacons will be dropped in the direction of the combine's movement, and a sensor attached to the rear of the loading bunker will read the distance to the beacon. For simulation modeling of uncertainty during the movement of the combine, the hypothesis of the normal distribution of the speed of movement on sections of random length was considered. When simulating the dropping of the beacon, the hypothesis was used that the scattering value of the beacon upon falling is a two-dimensional normally distributed random variable. Noisy measurements were generated by a stochastic process with increasing scatter boundaries as the sensor moved away from the beacon. The Kalman filter was used as a tool for processing measurement noise. **Results.** A model has been created that simulates random speeds of the combine's movement on sections of random length, and also a random spread when throwing off Bluetooth beacons has been simulated. To generate sensor measurements, an algorithm has been developed that takes into account the increase in the noise level of the readings when moving away from the nearest dropped beacon. To process the simulated measurements and correctly determine the distance of the beacon-sensor, the Kalman filtering algorithm was used. **Conclusion.** The proposed approach and the created simulation model make it possible, with a given degree of accuracy, to determine and predict the distance to the withdrawing shearer when mining industrial seams.

*Keywords:* mining machines, underground positioning, odometer, Bluetooth Low Energy, iBeacon, Kalman filter.

### References

1. Sekuntsov A.I. [Ways to improve the combine technology for the development of the Verkhnekamskoye potash deposit]. *Proceedings of higher educational institutions. Mining Journal*, 2013, no. 2, pp. 23–28. (in Russ.)
2. Shishlyannikov D.I., Maksimov A.B. [Development of means of mechanized mining of potassium ores]. *Proceedings of higher educational institutions. Mining Journal*, 2019, no. 3, pp. 15–21. (in Russ.)
3. Soloviev V.A., Sekuntsov A.I., Skopinov M.V. [Reservoir preparation of mining blocks during the development of the Verkhnekamskoe potash salt deposit]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. 4, pp. 56–62. (in Russ.)
4. Evdokimova T.S., Sinodkin A.A., Fedosova L.O., Turikov M.I. [Positioning and identification system of a mobile robotic platform in a confined and open space]. *Proceedings of NSTU named after R.E. Alekseev*, 2018, no. 2, pp. 16–25. (in Russ.)
5. Golovan A.A., Nikitin I.V. Combined use of strapdown inertial navigation systems and odometers from the standpoint of mechanics of inertial navigation systems. Part 1. *Moscow University Mechanics Bulletin*, 2015, vol. 70, no. 2, pp. 46–49.

6. Batyukov A.V., Gummel A.A., Puzin V.S., Zhivodernikov A.V., Zemlyanoy M.A. [Analysis of positioning systems of microtunnel-boring complexes]. *Proceedings of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science*, 2019, no. 2, pp. 26–36. (in Russ.)
7. Kaluza M., Beg K., Vukelic B. Analysis of an indoor positioning systems. *Zbornik Veleucilista u Rijeci*, 2017, vol. 5, no. 1, pp. 13–32.
8. Falkov E.V., Romanov A.Yu. [Application of «Beacon» beacons and Bluetooth Low Energy technology for building navigation systems in buildings]. *New information technologies in automated systems*, 2015, no. 18, pp. 62–65. (in Russ.)
9. Grinyak V.M., Devyatisilny A.S., Lyulko V.I., Tsybanov P.A. [Possibilities of indoor positioning using bluetooth devices]. *Modeling, optimization and information technology*, 2018, vol. 6, no. 2, pp. 132–143. (in Russ.)
10. Kleijnen J. *Statistical techniques in simulation* (in two parts). Part 1. M. Dekker, Inc. New York, 1974. 221 p.
11. Semenov V.V., Mapcher M.A., Petrov V.P., Morozov S.P. [Heading-and-shearers “Ural” for the extraction of potash ore and rock salt]. *Mining equipment and electromechanics*, 2008, no. 8, pp. 17–21. (in Russ.)
12. Krasnikov Yu.D., Shcherba T.P. [Analysis of the theoretical performance of the shearer in sylvinitic mining]. *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2014, no. 1, pp. 159–164. (in Russ.)
13. Ionescu G., Martinez de la Osa C., Deriaz M. Improving distance estimation in object localization with Bluetooth Low Energy. *SENSORCOMM 2014: The eighth international conference on sensor technologies and applications*, 2014, no. 8, pp. 45–49.
14. Korikov A.M., Meshcheryakov Ya.E. [Orientation of mining technological machines based on microelectromechanical systems]. *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio-electronics*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 92–97. (in Russ.)
15. Okhotin A.L., Belyaev E.N. [Inertial navigation in underground mine surveying]. *Irkutsk State Technical University Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 180–182. (in Russ.)
16. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, no. 1, pp. 35–45.
17. Kalman R.E., Busy R.S. New results in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engineering*, 1961, vol. 83, no. 1, pp. 95–108.
18. Brammer K., Siffing G., Kalman-Bucy-Filter. *Deterministische Beobachtung und Stochastische Filterung*, Methoden der regelungstechnik, R. Oldenburg verlag Munchien Wien, 1975. 232 s.
19. Foxlin E. Inertial head-tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter, *Proceedings of the IEEE 1996 Virtual Reality Annual International Symposium*, 1996, pp. 185–195.

**Received 31 March 2021**

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шевелев, И.М. Решение задачи одометрического позиционирования горно-выемочной машины под землей посредством применения фильтра Калмана / И.М. Шевелев, А.В. Затонский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 123–135. DOI: 10.14529/ctcr210212

#### FOR CITATION

Shevelev I.M., Zatonskiy A.V. Solution of the Problem of Odometric Positioning of a Mining Machine under the Ground by Using a Kalman Filter. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 123–135. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210212

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНЖЕНЕРИИ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МНОГОУРОВНЕВЫХ СИСТЕМ ОРГАНИЗАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ

**В.Е. Белоусов, Д.В. Дорофеев, Е.Н. Зенкова**

*Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия*

В данной работе формулируется задача и предлагается метод реконфигурации систем организационного управления на основе синтеза функциональной структуры, оказывающей влияние на облик всей системы, в значительной мере определяющей порядок ее функционирования, объединяющей в единое целое средства технического и математического, программного и информационного обеспечения. **Цель исследования** заключается в необходимости повышения эффективности управления организационными системами на основе комплексной разработки, внедрения и освоения средств автоматизированного управления ее элементами. **Методы исследования.** Для синтеза подобных структур применяются экспертные системы на основе декларативных языков программирования. В качестве инструмента для определения базы знаний об области реструктуризации структуры управления использовано вычисление выражений и язык логики предикатов, то есть математическая логика первого порядка. Тогда задачу реконфигурации иерархической структуры системы управления можно представить двояко. Во-первых, как задачу определения изменений известной рациональной иерархической структуры, обеспечивающих минимальные потери от возникших функциональных отказов. Во-вторых, в качестве задачи создания новой рациональной структуры, которая обеспечивает оптимальное использование ресурсов, используемых в процессе достижения определенных целей в меняющихся условиях. **Результаты.** В результате исследования на основе закона де Моргана определяются факторы, влияющие на состояние системы организационного управления в целом. Необходимый состав решаемых задач по всей иерархической структуре определяется степенью влияния различных факторов на характеристики структуры управления. **Заключение.** Работа полученной экспертной системы заключается в последовательном выполнении или невыполнении правил и переходе из одного состояния в другое. В случае тупиковой ситуации экспертная система выдает сообщение в виде требований альтернативного изменения тех или иных правил (факторов). Новые правила запоминаются. Таким образом, система знаний наращивается.

*Ключевые слова:* задача, знания, модели, правила, система, состояние, ресурс, элементы, эксперты.

### Введение

Одним из главных направлений решения проблемы повышения эффективности управления организационными системами является комплексная разработка, внедрение и освоение средств автоматизированного управления (АСУ) элементами этих систем.

Анализ развития автоматизированных систем организационного управления позволяет сделать вывод о необходимости улучшения оперативных, технических, экономических характеристик АСУ не только за счет повышения технических параметров вычислительных средств и средств связи, но и за счет организационно-технических мероприятий, связанных с совершенствованием структурного построения таких систем [1–3].

### Постановка задачи

Особую актуальность структурной оптимизации придают современные условия деятельности предприятий, организаций, учреждений, органов государственной власти, которые вынуждают проводить реконфигурацию структур организационных систем. Например, в настоящее время

стоит вопрос в основе которого – комплексная реконфигурация структур управления всех структур сложных систем организационного управления. Важнейшие задачи структурной оптимизации связаны с синтезом функциональной структуры АСУ, оказывающей влияние на облик всей системы, в значительной мере определяющей порядок ее функционирования, объединяющей в единое целое средства технического и математического, программного и информационного обеспечения.

Создание организационной и соответствующей функциональной структуры управления – это определение рациональной иерархической структуры управления, которая позволяет организации наилучшим образом применять ресурсы, используемые в процессе достижения определенных целей [4–6].

Значительные трудности возникают при поиске оптимального решения в области структур системы управления, что связано с наличием большого количества формальных факторов, влияющих на качественные и количественные характеристики структур системы управления. Для оценки степени их влияния необходимо в сочетании с традиционными методами использование методов информационной инженерии [7–10].

Важные характеристики многоуровневой иерархической структуры включают вертикальный разбор, приоритет активности и взаимозависимости, которые позволяют преобразовывать вход в выход. Каждый элемент (контрольный орган) выполняет определенную операцию, любой верхний орган ограничивает деятельность нижних заданным алгоритмом образом, а связи между ними обеспечивают эффективную работу системы управления и контроля в целом.

Следует отметить следующее: родитель системы определяет стратегию поведения потомка для достижения общей цели, связанной с более крупными подсистемами и более медленными аспектами поведения всей системы, поэтому время принятия решений долгое. Определения задач высокого уровня менее структурированы, содержат большую неопределенность и сами по себе представляют сложность квантования; потомок применяет тактические движения системы и определяет ее поведение для ближайшего операционного периода. Время принятия решения определяется с учетом требований регулирования технологического процесса или управления физическим процессом; существование иерархии оправдано при условии предоставления некоторой свободы действий в принятии решений специалистами всех уровней управления; достижение глобальной цели должно превалировать над локальными целями каждого элемента. Это требование обеспечивается интеграцией действий отдельных элементов посредством координации их деятельности элементами систем более высокого уровня, наложением совокупности ограничений, направленных на достижение эффективного функционирования объекта управления в целом.

В качестве инструмента для определения базы знаний об области реструктуризации структуры управления можно использовать вычисление выражений и язык логики предикатов, то есть математическую логику первого порядка.

Для формализации задачи реконфигурации организационной структуры системы управления необходимо ввести следующие обозначения:

$F$  – набор проблем для общего решения,

$|F| = I$ ,  $F_n$  – набор проблем на  $n$ -м уровне системы, тогда

$$F = \bigcup_n F_n, \quad n = \overline{1, N}.$$

В данном случае возможны следующие варианты:

1) некоторые из проблем более низкого уровня могут быть решены задачами более высокого уровня, т. е.

$$F_{n,n-1} = F_n \cap F_{n-1} \neq \emptyset, \quad F_{n,n-1} \subseteq F_{n-1}, \quad \forall n, n = \overline{2, N};$$

2) некоторые (или все) проблемы верхнего уровня могут быть решены задачами более низкого уровня, т. е.

$$F_{n,n-1} = F_n \cap F_{n-1} \neq \emptyset, \quad F_{n,n-1} \subseteq F_{n-1}, \quad \forall n, n = \overline{2, N};$$

3) задачи верхнего уровня не могут быть решены задачами более низкого уровня и наоборот:

$$F_{n,n-1} = F_n \cap F_{n-1} = \emptyset, \quad \forall n, n = \overline{2, N};$$

## Краткие сообщения

4) одно или два, или три условия могут быть выполнены одновременно для разных уровней и подуровней иерархической структуры [11].

Выбор конкретного варианта определяется требованиями к конкретной структуре управления [7, 8, 12].

Для описания взаимосвязей между задачами, входящими в цикл управления, используется матрица:

$$C = \|C_{i' i'}\|, \forall i, i', i, i' = \overline{1, I},$$

где  $C_{i' i'} = \begin{cases} 1, & \text{если для решения } i\text{-й задачи требуется решение } i'\text{-й задачи;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$

Необходимый состав решаемых задач по всей иерархической структуре определяется степенью влияния различных факторов на характеристики структуры управления. Выделение этих факторов из-за большого их количества, сложной взаимосвязи и опосредованности проявлений – задача трудно формализуемая [13]. Ее решение во многом определяется эвристическими правилами эксперта.

Пусть  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_K\}$  – множество факторов, влияющих на решение задач в иерархической структуре,  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_l, \dots, q_L\}$  – множество функций, определяющих характеристики иерархической структуры, где

$$q_l = q_l(t_1^l, t_2^l, \dots, t_k^l, \dots, t_{K_l}^l) \{t_1^l, t_2^l, \dots, t_k^l, \dots, t_{K_l}^l\} \subseteq T, \forall l, l = \overline{1, L}.$$

Тогда возможность решения  $i$ -й задачи в  $m$ -м узле на  $n$ -м уровне иерархической структуры определяется формулой  $P_{nm}^i(T, Q)$ , где  $P_{nm}^i$  – предикат, истинность которого определяется конкретными значениями факторов из множества  $T$  и значениями функций множества  $Q$ .

Для формализации процесса решения задач, входящих в цикл управления, необходимо ввести следующие переменные величины:

$$X_{nm}^i = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-я задача должна решаться в } m\text{-м узле на } n\text{-м уровне;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

Решение  $i$ -й задачи можно определить формулой

$$\bigvee_{n,m} (X_{nm}^i \& P_{nm}^i(T, Q)) \rightarrow \varphi_i(X_{nm}^i),$$

где  $\varphi_i(X_{nm}^i)$  – предикат истинный, если  $i$ -я задача решена.

Здесь необходимо отметить, что

$$\exists q_l (q_l \in Q) \forall i, n, m (t_k^l = X_{nm}^i)$$

либо

$$\forall q_l (q_l \in Q) \forall i, n, m (t_k^l = X_{nm}^i),$$

т. е. характеристики иерархической структуры зависят от варианта размещения задач в этой структуре.

Если предположить, что для решения  $i$ -й задачи требуется решить  $i'$ -е задачи, для которых  $C_{i' i'} = 1$ , то соответствующая формула с учетом преобразований, выполненных по закону де Моргана, будет иметь вид:

$$\&_{i', C_{i' i'}=1} (\varphi_{i'}(X_{nm}^{i'})) = \&_{i', C_{i' i'}=1} \left( \bigvee_{n,m} (X_{nm}^{i'} \& P_{nm}^{i'}(T, Q)) \right) = \bigvee_{i'} C_{i' i'} \& \left( \bigvee_{n,m} (X_{nm}^{i'} \& P_{nm}^{i'}(T, Q)) \right) \rightarrow \varphi_i.$$

Пусть  $\varphi_{i_1}$  – предикат истинный, если задача  $\varphi_{i_1}$ , включающая весь цикл управления, решена.

Тогда ее решение в иерархической структуре определяется формулой

$$\&_{i_2, C_{i_1 i_2}=1} \left[ \&_{i_3, C_{i_2 i_3}=1} \left[ \& \dots \left[ \&_{i, C_{i-1, i}=1} \left( \bigvee_{n,m} (X_{nm}^i \& P_{nm}^i(T, Q)) \right) \right] \right] \right] \rightarrow \varphi_{i_1}. \quad (1)$$

Необходимо отметить, что в качестве одной из функций множество  $Q$  выбирается

$q_i = \sum_n \sum_m X_{nm}^i$ , так как может рассматриваться однозначное выполнение цикла управления, т. е.

$q_i = I, \forall i, i = \overline{1, I}$ , так и с учетом дублирования ( $q_i > 1$  для заданных  $i$ ).

Задачу реконфигурации иерархической структуры системы управления можно представить двояко [14, 15].

Во-первых, как задачу определения изменений известной рациональной иерархической структуры, обеспечивающих минимальные потери от возникших функциональных отказов.

Во-вторых, в качестве задачи создания новой рациональной структуры, которая обеспечивает оптимальное использование ресурсов, используемых в процессе достижения определенных целей в меняющихся условиях.

Предложенное деление условно, но очевидно, что вторая задача значительно сложнее первой, так как требует учета большего числа факторов.

Действительно, пусть изначально задана рациональная иерархическая структура, т. е. известно множество

$$X^* = \{X_{nm}^i, i = \overline{1, I}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}\}, X_{nm}^i = \text{const}, \forall i, n, m.$$

Функциональные отказы иерархической структуры системы управления описываются множеством состояния узлов структуры:

$$W = \{w_{nm}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}\},$$

где  $w_{nm}$  – предикат истинный, если  $m$ -й узел на  $n$ -м уровне исправен.

$$\text{Тогда } \forall n, m \quad \bar{w}_{nm} \rightarrow \left( \sum_i X_{nm}^i = \tilde{I} \right),$$

где  $\tilde{I}$  – число задач, требующих распределения, которое определяется мощностью множества неисправных узлов:

$$|\bar{W}|, \text{ где } \bar{W} = \{\bar{w}_{nm}\}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}.$$

Очевидно, что  $\tilde{I} \leq I$  и  $\tilde{Z} \subseteq Z$ , где  $\tilde{Z}$  – комбинаторное пространство, соответствующее множеству  $\tilde{X} = \{X_{nm}^i, i = \overline{1, \tilde{I}}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}\}$ ,  $Z$  – комбинаторное пространство, соответствующее множеству  $X^*$ .

Таким образом, трудоемкость решения задачи реконфигурации иерархической структуры определяется величиной  $|Z| - |\tilde{Z}|$ .

При  $|Z| - |\tilde{Z}| = 0$  задача реконфигурации совпадает с задачей построения рациональной иерархической структуры.

Для формализации пространства реконфигураций известной рациональной иерархической структуры системы управления в условиях функциональных отказов ее элементов необходимо определить факторы, определяющие состояние системы в целом.

Таким образом, известно множество  $X^*$  и соответствующие параметры рациональной иерархической структуры системы управления – множества  $T^*, Q^*$ , а также заданы допустимые диапазоны изменения параметров  $T_{\text{доп}}, Q_{\text{доп}}$ .

Необходимо определить значения элементов множества  $\tilde{X}$ , которые обеспечивали бы выполнение условия (1) при  $T \subseteq T_{\text{доп}}, Q \subseteq Q_{\text{доп}}$ .

В качестве примера можно привести упрощенный прототип экспертной системы «Реструктуризация иерархических структур систем организационного управления». Данный прототип использует типовые факторы, влияющие на функциональную структуру управления:

- 1)  $n$  – номер уровня;
- 2)  $m$  – номер узла;
- 3)  $i$  – номер задачи;
- 4)  $X_{nm}^i$  – переменная, связывающая решение  $i$ -й задачи с  $m$ -м узлом и  $n$ -м уровнем;

## Краткие сообщения

- 5)  $w_{nm}$  – характеристика  $m$ -го узла на  $n$ -м уровне (исправен/неисправен/возможно исправен);
- 6)  $C_{ii'}$  – величина, устанавливающая причинно-следственную связь между решением  $i$ -й задачи и решением  $i'$ -й задачи;
- 7)  $\rho_i^{\text{авт}}$  = const – величина, характеризующая трудоемкость решения  $i$ -й задачи с учетом автоматизации;
- 8)  $\rho_i^{\text{руч}}$  = const – величина, характеризующая трудоемкость «ручного» решения  $i$ -й задачи;
- 9)  $\alpha_{nm}$  = const – величина, характеризующая производительность  $m$ -го узла на  $n$ -м уровне;
- 10)  $\lambda_{nm} = (\lambda_{nm}^i) \forall i, i = \overline{1, I}$  – булевый вектор, отражающий максимально общий состав задач, возможно решаемых  $m$ -м узлом на  $n$ -м уровне;
- 11)  $\xi_{nm}^{n'm'}$  – величина, характеризующая типовость узлов структуры по задачам (рассчитывается исходя из  $\lambda_{nm}$ );
- 12)  $\xi^*$  – величина порога типовости (задается);
- 13)  $T_{\text{цикла}}$  = const – ограничение на время цикла;
- 14)  $\gamma_i$  = const – важность  $i$ -й задачи (например,  $\gamma_i = 1$ , если  $i$ -я задача существенна в цикле управления и  $\gamma_i = 0$  в противном случае);
- 15)  $\beta_{nm}$  – величина, характеризующая максимальное число узлов подуровня  $n$ -го уровня  $m$ -го узла (как правило, определяется техническими возможностями системы);
- 16)  $v_{nm}$  – важность узлов (предполагается использование взвешенных оценок важности узлов);
- 17)  $X_{nm}$  – предпочтительность передачи задач  $m$ -го узла (на нижний уровень, текущий уровень, верхний уровень).

Основным правилом реконфигурации иерархической структуры для данного примера считается следующее:

$$\sum_n \sum_m X_{nm} = 1, \forall i, i = \overline{1, I},$$

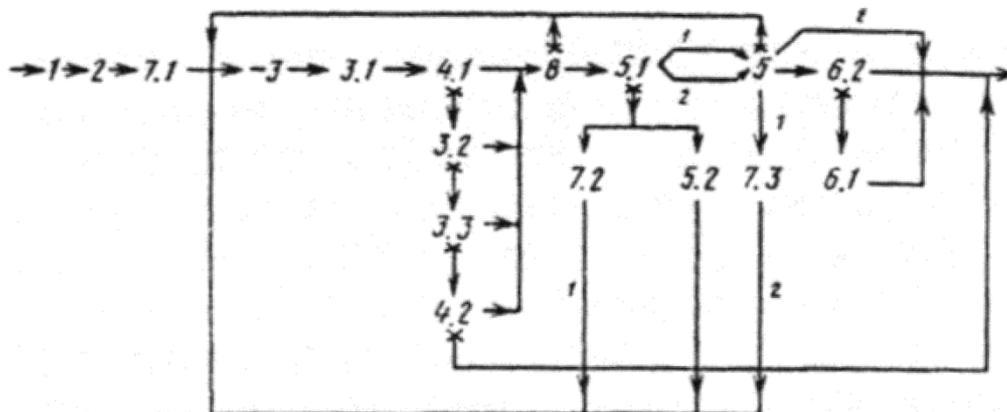
т. е. при неисправности отдельных узлов реконфигурированная иерархическая структура должна решать все задачи исходной структуры.

Остальные правила имеют следующий вид.

1. В первую очередь распределяются задачи неисправного узла  $N$ -го уровня, затем  $(N - 1)$ -го и т. д.
2. В первую очередь распределяются задачи наиболее важного неисправного узла текущего уровня.
3. Подчиненная задача не может быть на один или более уровней выше подчиняющей. Задачи распределяются с учетом предпочтительности:
  - 3.1. В текущий уровень.
  - 3.2. В нижестоящий уровень.
  - 3.3. В вышестоящий уровень.
4. Задачи не могут распределяться в неисправные узлы:
  - 4.1. Распределяются только в исправные узлы.
  - 4.2. Распределяются только в возможно исправные узлы.
5. Задачи распределяются в узлы, производительность которых была бы достаточной для решения задач в заданное время:
  - 5.1. С учетом автоматизации.
  - 5.2. С учетом «ручной» обработки.
6. Задачи распределяются в узлы с учетом их типовости:
  - 6.1. С максимальной типовостью (общностью задач).
  - 6.2. С типовостью, удовлетворяющей порогу типовости.
7. Задачи распределяются в узлы совместно и отдельно:
  - 7.1. В один узел – все задачи.

- 7.2. Распределяются существенные для цикла задачи.
- 7.3. Распределяются несущественные для цикла задачи.
8. Задачи распределяются в узел, для которого число узлов подуровня текущего уровня будет не больше максимально возможного.

Сетевой график выполнения рассмотренных правил представлен на рисунке.



Сетевой график выполнения правил экспертной системы  
Network diagram of execution of rules of expert system

На графике знак «\*» означает невыполнение правила, условия выполнения правил 7.2, 7.3 заданы соответственно маркерами 1, 2.

### Выводы

Работа ЭС заключается в последовательном выполнении или невыполнении правил и переходе из одного состояния в другое. В случае тупиковой ситуации ЭС выдает сообщение в виде требований альтернативного изменения тех или иных правил (факторов). Новые правила запоминаются. Таким образом, система знаний наращивается.

### Литература

1. Бурков, В.Н. Большие системы: моделирование организационных механизмов / В.Н. Бурков, Б.К. Данев, А.К. Еналеев. – М.: Наука, 1989. – 245 с.
2. Белоусов, В.Е. Ресурсно-временной анализ в задачах календарного планирования строительных предприятий / В.Е. Белоусов, С.А. Баркалов, К.А. Нижегородов // Материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «Управление большими системами». – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2019. – Т. 1. – С. 98–101.
3. Губко, М.В. Согласование интересов в матричных структурах управления / М.В. Губко, А.П. Караваяев // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 10. – С. 112–119.
4. Бурков, В.Н. Механизмы функционирования организационных систем / В.Н. Бурков, В.В. Кондратьев. – М.: Наука, 1981. – 301 с.
5. Баркалов, С.А. Механизмы активной экспертизы в задачах комплексного оценивания / С.А. Баркалов, В.Н. Бурков, В.Л. Порядина // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5, № 6. – С. 64–67.
6. Афанасьев, В.Н. Анализ временных рядов и прогнозирование / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 2001. – С. 203–211.
7. Белоусов, В.Е. Алгоритм для оперативного определения состояний объектов в многоуровневых технических системах / В.Е. Белоусов, С.А. Кончаков // Экономика и менеджмент систем управления. – 2015. – № 3.2 (17). – С. 227–232.
8. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Издат. центр «Академия», 2003. – 576 с.
9. Горелик, А.Л. Методы распознавания / А.Л. Горелик, В.А. Скрипкин. – М.: Высшая школа, 2004. – 341 с.

10. Hart, O.D. *Theory of contracts* / O.D. Hart, B. Holmstrom // *Advances in economic theory. 5-th World Congress.* – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987. – P. 71–155.

11. Моделирование системы оценки компетенций в управлении профессорско-преподавательским составом вуза / С.А. Баркалов, В.Е. Белоусов, Н.Ю. Калинина и др. // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018): сб. докл.: в 2 т. Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – Т. 1. – С. 355–358.

12. Белоусов, В.Е. Алгоритм выбора наилучшего варианта проведения натурального эксперимента в многокритериальных задачах моделирования сложных технических объектов / В.Е. Белоусов, Нгуен Вьет Туан // *Системы управления и информационные технологии.* – 2016. – № 1 (63). – С. 55–59.

13. Белоусов, В.Е. Алгоритмы получения упорядоченных правил предпочтения в задачах принятия решений при планировании производственных программ / В.Е. Белоусов, К.И. Нижегород, И.С. Соха // *Научный журнал «Управление строительством».* – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. – № 1 (14). – С. 105–111.

14. Jordan M.I. *Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine* / M.I. Jordan // *The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society.* – Amherst, MA, 1986. – P. 531–546.

15. Вапник, В.Н. Восстановление зависимости по эмпирическим данным / В.Н. Вапник. – М.: Наука, 1979. – 295 с.

**Белоусов Вадим Евгеньевич**, канд. техн. наук, доцент, заведующий базовой кафедрой кибернетики в системах организационного управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; belousov@vgasu.vrn.ru.

**Дорофеев Дмитрий Валериевич**, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; upr\_stroy\_kaf@vgasu.vrn.ru.

**Зенкова Евгения Николаевна**, аспирант кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж; eng@gmail.com.

*Поступила в редакцию 19 января 2021 г.*

---

DOI: 10.14529/ctcr210213

## APPLICATION OF METHODS OF INFORMATION ENGINEERING FOR CHANGE OF STRUCTURE OF MULTILAYER SYSTEMS OF ORGANIZATIONAL MANAGEMENT

**V.E. Belousov**, belousov@vgasu.vrn.ru,

**D.V. Dorofeev**, upr\_stroy\_kaf@vgasu.vrn.ru,

**E.N. Zenkova**, eng@gmail.com

*Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation*

In this work the task is formulated and the method of reconfiguration of systems of organizational management on the basis of synthesis of the functional structure having an impact on an appearance of all system considerably defining an order of its functioning, integrating in a whole of means of technical and mathematical, program and information support is offered. **The research objective** consists in need of increase in effective management of organizational systems on the basis of complex development, implementation and application of funds of automated management of

its elements. Expert systems on the basis of declarative programming languages are applied to synthesis of similar structures. **Research methods.** As the tool for definition of the knowledge base about the field of restructuring of structure of management calculation of expressions and language of a predicate logic, that is a logic theory of first order is used. Then, the problem of reconfiguration of hierarchical structure of management system can be presented doubly. First, as a problem of definition of the changes of the known rational hierarchical structure providing minimum loss from the arisen functional failures. Secondly, as a problem of creation of new rational structure which provides optimum use of the resources used in the course of achievement of definite purposes in the changing conditions. **Results.** As a result of a research, on the basis of de Morgan's law the factors influencing a system status of organizational management in general are defined. The necessary structure of solvable tasks of all hierarchical structure is defined by extent of influence of different factors on characteristics of structure of management. **Conclusion.** Work of the received expert system consists in consecutive execution or failure to follow rules and transition from one status to another. In case of an impasse the expert system gives the report in the form of requirements of alternative change of these or those rules (factors). New rules are remembered. Thus, the system of knowledge is increased.

*Keywords:* task, knowledge, models, rules, system, status, resource, elements, experts.

### References

1. Burkov V.N., Danaev B.K., Enaleev A.K. *Bol'shiye sistemy: modelirovaniye organizatsionnykh mekhanizmov* [Big systems: modeling of organizational mechanisms]. Moscow, Nauka Publ., 1989. 245 p.
2. Belousov V.E., Barkalov S.A., Nizhegorodov K.A. [Resource timing analysis in problems of scheduling of the construction enterprises]. *Materials of the XVI All-Russian school conference of young scientists "Management of big systems"*. Tambov, TGTU Publ., 2019, vol. 1, pp. 98–101. (in Russ.)
3. Gubko M.V., Karavaeva A.P. [Approval of interests in array structures of management]. *Automatic equipment and telemechanics*, 2001, no. 10, pp. 112–119. (in Russ.)
4. Burkov V.N., Kondratyev V.V. [Mechanisms of functioning of organizational systems]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 301 p.
5. Barkalov S.A., Burkov V.N., Poryadina V.L. [Mechanisms of active examination in problems of complex estimation]. *Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2009, vol. 5, no. 6, pp. 64–67. (in Russ.)
6. Afanasyev V.N., Yuzbashev M.M. *Analiz vremennykh ryadov i prognozirovaniye* [Analysis of time series and forecasting]. Moscow, Finance and statistics Publ., 2001, pp. 203–211.
7. Belousov V.E., Konchakov S.A. [Algorithm for operational definition of statuses of objects in multilayer technical systems]. *Economy and management of management systems*, 2015, no. 3.2. (17), pp. 227–232. (in Russ.)
8. Venttsel E.S. *Teoriya veroyatnostey* [Probability theory]. Moscow, Publishing center "Akademiya", 2003. 576 p.
9. Gorelik A.L., Skripkin V.A. *Metody raspoznavaniya* [Recognition methods]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 341 p.
10. Hart O.D., Holmstrom B. Theory of contracts. *Advances in economic theory. 5-th World Congress*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1987, pp. 71–155.
11. Barkalov S.A., Belousov V.E., Kalinina N.Yu., Nasonova T.V., Fomina M.A., Leksashov A.V. [Modeling of a system of assessment of competences of management of the faculty of higher education institution]. *XXI International conference on soft calculations and measurements (SCM-2018), 2 volumes, St. Petersburg, 23–25 May 2018*. St. Petersburg, ETU "LETI" Publ., 2018, vol. 1, pp. 355–358. (in Russ.)
12. Belousov V.E., Nguyen Vyet Tuang [An algorithm of the choice of the best option of carrying out a natural experiment in multicriteria problems of modeling of difficult technical objects]. *Management systems and information technologies*, 2016, no. 1 (63), pp. 55–59. (in Russ.)
13. Belousov V.E., Nizhegorodov K.I., Plough I.S. [Algorithms of obtaining ordered rules of pre-

## Краткие сообщения

---

ference in problems of decision-making when planning production programs]. *Scientific journal "Management of Construction"*. Voronezh, 2019, no. 1 (14), pp. 105–111. (in Russ.)

14. Jordan M.I. Attractor dynamics and parallelism in a connectionist sequential machine. *The Eighth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Amherst, MA, 1986, pp. 531–546.

15. Vapnik V.N. *Vosstanovleniye zavisimosti po empiricheskim dannym* [Recovery of dependence according to empirical data]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 295 p.

*Received 19 January 2021*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Белоусов, В.Е. Применение методов информационной инженерии для изменения структуры многоуровневых систем организационного управления / В.Е. Белоусов, Д.В. Дорофеев, Е.Н. Зенкова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 136–144. DOI: 10.14529/ctcr210213

### FOR CITATION

Belousov V.E., Dorofeev D.V., Zenkova E.N. Application of Methods of Information Engineering for Change of Structure of Multilayer Systems of Organizational Management. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 136–144. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210213

---

## ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ АВИАЦИОННОГО ИЗДЕЛИЯ КАК ОСОБЫЙ КЛАСС ИННОВАЦИЙ

**И.З. Мустаев<sup>1</sup>, В.Ю. Иванов<sup>2</sup>, Г.Г. Куликов<sup>3</sup>, Т.И. Мустаев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

<sup>2</sup> ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение»,  
г. Уфа, Россия

<sup>3</sup> АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Россия

Статья посвящена изложению понятийно-категориального аппарата проектов создания сложных технических изделий нового поколения. Показано, что классификация рассматриваемых проектов создает методологические предпосылки для повышения точности и качества прогнозов времени и ресурсов. Утверждается, что в общем множестве инновационных процессов инновационные проекты создания авиационных изделий нового поколения попадают в самостоятельную подгруппу инновационных проектов создания сложных технических объектов нового поколения. Выделение отдельной подгруппы проектов позволяет формировать для них специфические методы моделирования, анализа, прогноза и управления. **Материалы и методы.** Обоснование проводится в форме логического вывода. Выделены четыре показателя, характеризующие проектные процессы. На основании проведенного анализа особенностей проектов создания авиационных изделий сделан вывод о необходимости уточнения набора критериев для проектов создания сложной техники нового поколения. Для этой группы проектов в дополнение к существующим четырем критериям целей, сроков, ресурсов и организации исполнения проекта предлагается добавлять пятый критерий – критерий неопределенности проекта. **Результат.** Показано, что в совокупности группа из пяти критериев позволяет выделить из всего множества инновационных процессов, связанных с созданием новой техники, подгруппу процессов создания сложной техники нового поколения. Отмечены отличия принятой в работе интерпретации неопределенности от используемой в проектном анализе интерпретации неопределенности как совокупности рисков, сопровождающих проекты. **Заключение.** Сформирован интегральный критерий величины социофизического потенциала, объединяющий критерии целей, сроков, ресурсов, организации и неопределенности инновационных проектов. Приведен пример интерпретации интегрального критерия для случая создания авиационного изделия нового поколения.

*Ключевые слова:* инновация, инновационный проект, авиационный двигатель, авиационное изделие, сложный технический объект.

### Введение

Разработка авиационных агрегатов, элементов и систем управления авиационным двигателем нового поколения сопровождается созданием новых технологий и имеет характер инновационной инженерной и организационной деятельности. Организация деятельности имеет проектную форму, описывается и проводится по правилам и требованиям проектных стандартов. Однако неопределенность, сопровождающая инновационные решения, приводит к тому, что проекты не завершаются в заявленные сроки, когда возникает потребность в формировании компетенций, которые не предусмотрены в проектных документах. Это диктует необходимость дополнительных ресурсов, так что итоговый объем может существенно превышать заявленные цифры.

Уточнение классификации проектируемых объектов с целью достоверного отделения инновационных процессов, связанных с созданием сложных технических изделий нового поколения, является задачей, решение которой создает предпосылки повышения точности прогноза времени и ресурсов. Это повышает эффективность проектов.

### Методология

Принята в узкой интерпретации в роли инноваций рассматривать нововведения, внедряемые на предприятии [1, 2]. Предприятие, приступая к созданию новой техники, рассчитывает на то,

что в результате повысится его конкурентоспособность. Поэтому с системной точки зрения проект создания авиационного изделия может рассматриваться как управляемый инновационный процесс, реализуемый для обеспечения долгосрочной эффективности предприятия, на котором проект реализуется [3]. Известны шесть типов моделей управления инновациями, которые исторически сформировали шесть поколений моделей [4]. Современную модель, по которой создаются авиационные изделия, можно отнести к пятому поколению моделей управления инновациями. Ключевыми для этой модели являются вопросы системной интеграции, гибкости, параллельной обработки больших объемов информации, эффективности взаимодействия с внешними производителями и с контрагентами по цепочке создания стоимости [5–9].

Проект определяется, если заданы: цель, сроки, ресурсы и организация его исполнения [10]. В каждом из этих элементов проект создания авиационного изделия нового поколения имеет нижеперечисленные особенности, выделяющие его из общей массы проектов [11, 12].

1. Авиационное изделие имеет двойственное применение – гражданское и военное.

2. Рассматриваемые проекты характеризуются большой и сверхбольшой длительностью. Длительность жизненного цикла проекта достигает величин, когда временной фактор становится критическим с точки зрения адекватности оценок.

3. Проекты создания авиационных изделий нового поколения характеризуются высокой стоимостью. Для реализации таких проектов требуются, как правило, настолько большие объемы разнообразных ресурсов на всех этапах жизненного цикла, что цена ошибки в оценке ресурсов становится критической с точки зрения предприятия, реализующего его.

4. Проекты создания авиационных изделий нового поколения отличаются повышенной неопределенностью, связанной с тем, что могут потребоваться технологии, разработка которых не предусматривалась на момент начала проекта.

Более подробно изложение особенностей проектов создания авиационных изделий, определяющее выделение отдельного класса инновационных проектов создания сложной техники нового поколения в отдельную подгруппу, сводится к следующему.

1. Создание сложных технических объектов двойного назначения финансируются в основном государством и в интересах государства. По мнению ряда авторов, экономический анализ должен быть модифицирован под специфику объектов [13]. Это предполагает формирование подхода, включающего: изменение критериев эффективности [14], формирование специальных схем защиты инвестиций [15, 16], изменение парадигмы устойчивости с финансовой на организационно-экономическую [17], изменение оценки рисков [18] и другие последствия.

2. Проект является конечным процессом, имеющим четко определенные моменты начала и окончания. Длительность проектов, связанных с разработкой, производством и сопровождением авиационных изделий, достигает нескольких десятков лет. Так, жизненный цикл авиационного двигателя составляет 40–50 лет. На фактический срок окупаемости проекта создания авиационного изделия в значительной степени влияют не прогнозируемые на больших промежутках времени финансово-экономические характеристики предприятия.

В настоящее время методологически неразрешенной является проблема оценки эффективности проектов для военных целей. Реализация на одном и том же предприятии проектов авиационных изделий как для военных, так и для гражданских целей предполагает сопоставление эффективности таких проектов между собой. Формируется противоречие, когда решение вопроса реализации стратегически важного проекта военного назначения предполагает оценку рыночной эффективности такого решения.

Проектное обоснование гражданской продукции опирается на использование показателя чистой приведенной стоимости (NPV) [19]. Величина NPV зависит от оценки коэффициента дисконтирования проекта, который определяется прогнозируемыми проектными рисками. Неизбежная неточность в прогнозировании рисков длительных проектов приводит к неверной величине NPV и, как следствие, к ошибочным трактовкам полученной и упущенной выгоды [20]. Характер инвестиционных решений предприятия изменяется в пользу инновационного проекта в ущерб текущему бизнесу или, наоборот, в пользу обеспечения текущего состояния бизнеса вместо реализации проектов перспективного роста. Здесь необходимо подчеркнуть, что решения затрагивают разнородные активы предприятия – как краткосрочные оборотные, так и долгосрочные внеоборотные [21].

Еще одна особенность принимаемых решений связана с проблемами «начала и хвоста» проекта [22]. Суть сводится к неопределенности в учете проектных затрат и, как следствие, к необоснованному изменению оценки эффективности проекта. Отнесение затрат предприятия на принятый к исполнению проект понижает его эффективность. Игнорирование затрат в проектных сметах повышает их эффективность. Однако, поскольку проектные затраты перекладываются на текущие расходы предприятия, это приводит к понижению конкурентоспособности предприятия, на котором проект реализуется.

В целом можно констатировать, что проектные решения изменяют не только стратегическую инвестиционную картину, но и его текущие финансово-экономические показатели предприятия.

3. Можно отметить, что стоимость программы по созданию истребителя F-35 превышает \$1,3 трлн [23]. Указанная цифра косвенно иллюстрирует стоимость используемых ресурсов и возможную высокую цену ошибки проектных решений.

Ресурсы проекта представляют собой совокупность финансовых и материальных средств, организационных, кадровых, технологических, технических и иных возможностей предприятия, необходимых для осуществления проекта. Инновационный проект не является навсегда определенным статичным явлением с обусловленной ресурсной базой. Глубина изменений ресурсной базы может быть существенной и обуславливать корректировку сроков, качества и других ключевых параметров проекта.

4. Современная точка зрения на процесс проектирования заключается в том, что успех или неудача проекта связываются с полнотой реализации требований, предъявляемых к инновационной проектной деятельности. Считается, что необходимо максимально расширить участие в инновационной проектной деятельности, для чего использовать инструменты, имеющие интегрирующую междисциплинарную природу. В процессе проектирования используется инструментарий, обеспечивающий партнерство и интеграцию специалистов различных областей знаний [24]. Однако существующие методы и инструменты интеграции, ориентированные на использование информационных технологий, дороги и подвержены ошибкам [25]. Проблема поиска приемлемого по цене, надежного и последовательно интерпретируемого способа представления разнородной информации на всех этапах проектирования не решена, управляемость проектов существенно ограничена [26, 27].

Рассмотренные четыре критерия не в полной мере отражают особенности инновационных проектов создания авиационной техники нового поколения. По нашему мнению, их необходимо дополнить пятым критерием повышенной неопределенности.

5. Создание авиационного изделия нового поколения требует проведения объемных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Особенностью таких проектов является необходимость создания технологий, реализуемость которых не гарантирована. Иными словами, приступая к инновационному проекту, команда проекта может не быть уверенной в его реализуемости. Под реализуемостью понимается возможность достижения требуемых физико-технических, технологических, социально-экономических, информационных показателей в требуемые промежутки времени с приемлемыми затратами различных ресурсов. В настоящее время вопросы исследования реализуемости проектов или выводятся за сферу внимания, или упрощаются до реализации вариантного перебора с привлечением в качестве экспертов профильных специалистов. В конечном счете, все сводится к экспертной оценке рисков [28–30]. В качестве методологического обоснования такого подхода используется интерпретация неопределенности как вероятности события, которое возникает в ходе реализации инновационного проекта [31]. Применительно к инновационным проектам создания авиационной техники новых поколений применение вероятностных оценок дает неверные результаты. Новизна и уникальность проектов подразумевает незнание на момент начала проекта того, какие технологии потребуются создать по мере реализации проекта, т. е. неопределенность инновационного проекта может быть проинтерпретирована как невозможность определения полного перечня рисков. Среди неизвестных может быть риск, катастрофический для проекта. Ему должна быть приписана вероятность, равная единице. Всем оставшимся компонентам – вероятность, равная нулю.

Отказ от использования рисков и оценка возможных диапазонов изменения исследуемых величин, например, по схеме [32], имеет ограниченный интерес, поскольку существенно уменьшается точность ответа для анализируемого случая. Использование таких подходов не позволяет учитывать

## Краткие сообщения

индивидуальную специфику авиационного предприятия, на котором инновационный проект предполагается реализовывать. Можно согласиться с тем, что вопрос о том, какова наилучшая мера неопределённости, неясности и неточности, на сегодня остаётся без убедительного ответа [33].

Итак, из приведенного следует, что инновационные проекты создания авиационной техники нового поколения формируют отдельную подгруппу инновационных процессов. Для анализа и управления этими процессами целесообразно разработать подходы, в которых инструменты оценки не предполагают определение рисков.

В качестве одного из таких инструментов предлагается использовать инструментарий социофизических потенциалов [34, 35]. Социофизический потенциал потока  $q = q(t)$  определяется по формуле

$$x_q(t) = \int_{\tau=0}^t q(\tau)\psi(t-\tau)d\tau. \quad (1)$$

Социофизическая функция  $\psi$  имеет следующие свойства:  $|\psi(t)| \rightarrow 0$ , если  $t \rightarrow \pm\infty$ ;  $\psi(0) = 1$ ,  $\|\psi\| = 1$ ; функция потока  $q = q(t)$  интегрируема по времени с квадратом:  $q \in L^2$ .

Потенциал потока активов проекта  $(x_{rs}^{pr}(t))$  и результирующего потока проекта  $(x_{rt}^{pr}(t))$  определяют модель проекта, описываемую формулой

$$x_{rt}^{pr} = f_{pr}(x_{rs}^{pr}). \quad (2)$$

Потенциалы потока активов предприятия  $(x_{rs}^{en}(t))$  и потока выручки предприятия  $(x_{rt}^{en}(t))$  формируют модель предприятия, описываемую формулой

$$x_{rt}^{en} = f_{en}(x_{rs}^{en}). \quad (3)$$

Проект, реализуемый на предприятии, имеет инновационный характер, если выполняется следующее соотношение

$$f'_{pr}(x_{rs}^{pr}) \geq f'_{en}(x_{rs}^{en}). \quad (4)$$

В неравенстве (4) производные определяются формулами:

$$\begin{aligned} f'_{pr}(x) &= \frac{d}{dx} f_{pr}(x), \\ f'_{en}(x) &= \frac{d}{dx} f_{en}(x). \end{aligned} \quad (5)$$

Используем социофизический потенциал, подгруппа инновационных проектов создания сложной техники нового поколения следующим образом: к указанной подгруппе относятся инновационные проекты создания техники, социофизические потенциалы которых превышают некоторую пороговую величину  $L$ . Величина  $L$  определяется только физико-техническими характеристиками проектируемого изделия:

$$L = L(\alpha)_{\alpha=g}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – множество физико-технических переменных, принимающих для проекта создания авиационного изделия целевые значения  $\alpha = g$ .

Величина  $L$  может рассматриваться как переменная, характеризующая группу инновационных проектов создания технических изделий нового поколения;  $g$  – групповой параметр. С учетом (4) формируется итоговая система неравенств:

$$\begin{cases} f'_{pr}(x_{rs}^{pr}) \geq f'_{en}(x_{rs}^{en}); \\ x_{rt}^{pr} \geq L. \end{cases} \quad (7)$$

Система неравенств (7) сопоставляет потенциалы проекта  $x_{rs}^{pr}$  с потенциалами предприятия  $x_{rs}^{en}$ . Из определения можно исключить потенциал инновационного проекта. С точки зрения предприятия, проект создания авиационного изделия может быть отнесен к классу инновационных проектов, если на момент начала проекта  $t = 0$  и на момент окончания проекта  $t = T$  для потенциалов предприятия справедливы соотношения:

$$f'_{en}(x_{rs}^{en})_{t=0} \leq f'_{en}(x_{rs}^{en})_{t=T}. \quad (8)$$

### Результат

На основании изложенного можно сделать вывод, что проекты создания авиационных изделий нового поколения формируют самостоятельную подгруппу инновационных проектов. Выделение отдельной подгруппы проектов позволяет формировать для них специфические методы моделирования, анализа, прогноза и управления.

Групповой переменной является социофизический потенциал проектируемого изделия. Социофизический потенциал должен превышать пороговую величину, определяемую только физико-техническими параметрами проектируемого изделия.

Сформулировано следующее определение проекта создания авиационного изделия как элемента подгруппы в группе инновационных проектов: проект создания авиационного изделия нового поколения – это инновационный проект, реализуемый на авиационном предприятии и направленный на создание изделия с требуемыми техническими характеристиками в требуемые сроки, отличающийся двойственностью использования в гражданских и военных целях, большой длительностью, значительными требуемыми объемами разнообразных ресурсов, предполагающих разработку и использование технологий, не существующих на момент начала проекта.

Строгое математическое определение сводится к следующему. Проект создания авиационного изделия нового поколения – это проект, реализуемый на авиационном предприятии, направленный на создание изделия с требуемыми техническими характеристиками в требуемые сроки, для которого выполняется система неравенств (7).

### Литература

1. Хотяшева, О.М. *Инновационный менеджмент* / О.М. Хотяшева – СПб.: Питер, 2007. – 384 с.
2. Фатхутдинов, Р.А. *Инновационный менеджмент* / Р.А. Фатхутдинов. – СПб.: Питер, 2007. – 448 с.
3. Дармилова, Ж.Д. *Инновационный менеджмент: учеб. пособие для бакалавров* / Ж.Д. Дармилова. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2013. – 168 с.
4. Chesbrough, H. *Open Business Models. The New Imperative for Creating and Profiting from Technology* / H. Chesbrough. – Boston: Harvard Business School Press, 2007. – 227 p.
5. Rothwell, R. *Towards the fifth-generation innovation process* / R. Rothwell // *International marketing review*. – 1994. – No. 11 (1). – P. 7–31.
6. Cooper, R.G. *Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch* / R.G. Cooper. – Cambridge (MA): Perseus Publishing, 2001. – 415 p.
7. Wheelwright, S.C. *Revolutionizing product development: Quantum leaps in speed, efficiency and quality* / S.C. Wheelwright, K.B. Clark // *R & D Management*. – 1994. – Vol. 24 (3). – P. 298.
8. Kodama, F. *Emerging patterns of innovation sources of Japan's technological edge* / F. Kodama. – Harvard Business School, 1995. – 299 p.
9. Твисс, Б. *Управление научно-техническими нововведениями* / Б. Твисс. – М.: Экономика, 1989. – 272 с.
10. *Project Management Institute. A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)*. Newtown Square, PA. ISBN 9781628253900.
11. Курако, Д.В. *Особенности инновационных проектов ракетно-космической отрасли* / Д.В. Курако, М.А. Дроздов, М.А. Рагозина // *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*. – 2018. – Т. 2, № 4 (14). – С. 699–701.
12. Лубянская, Э.Б. *Особенности системы стратегического управления инновационными проектами в условиях цифровой экономики* / Э.Б. Лубянская, Ю.П. Анисимов // *Организатор производства*. – 2019. – Т. 27, № 2. – С. 81–93.
13. Орлов, А.И. *Организационно-экономическое обеспечение инновационной деятельности в ракетно-космической отрасли* / А.И. Орлов // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2014. – № 102. – С. 112–143.
14. Орлов, А.И. *О показателях эффективности научной деятельности* / А.И. Орлов // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2014. – No. 7 (358). – С. 21–29.
15. Хрусталёв, Е.Ю. *Методы и инструментарий выбора механизмов экономической защиты наукоемких производств на примере ракетно-космической промышленности* / Е.Ю. Хрусталёв, А.С. Славянов, И.Е. Сахаров // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2013. – № 30 (333). – С. 2–11.
16. Хрусталёв, Е.Ю. *Финансовые механизмы снижения риска при создании наукоемкой и высокотехнологичной продукции* / Е.Ю. Хрусталёв, И.А. Стрельникова // *Финансы и кредит*. – 2011. – № 7 (439). – С. 13–21.

17. Колобов, А.А. Проектирование интегрированных производственно-корпоративных структур: эффективность, организация, управление / А.А. Колобов, А.И. Орлов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 728 с.

18. Чурсин, А.А. Оценка рисков устойчивого развития высокотехнологичных областей промышленности при внедрении инновационных технологий / А.А. Чурсин, А.А. Русинов, В.А. Волков // Экономика и управление в машиностроении. – 2012. – № 1. – С. 25–29.

19. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999, № ВК 477.

20. Брейли, Р. Принципы корпоративных финансов / Р. Брейли, С. Майерс. – М.: ЗАО «Олимп-бизнес», 1997. – 1120 с.

21. Славянов, А.С. Проблемы оптимизации ресурсного потенциала ракетно-космической промышленности в условиях сокращения бюджетных расходов / А.С. Славянов // Инновации в менеджменте. – 2016. – № 3 (9). – С. 58–69.

22. Смоляк, С.А. О методологии оценки эффективности реальных инвестиционных проектов / С.А. Смоляк // Российский экономический журнал. – 2006. – № 9–10. – С. 63–73.

23. Сайт ТАСС. – <https://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/1136666> (дата обращения: 24.10.2020).

24. Enkel, E. Minimizing market risks through customer integration in new product development: Learning from bad practice / E. Enkel, J. Perez-Freije, O. Gassmann // Creativity and Innovation Management. – 2005. – Vol. 14, no. 4. – P. 425–437.

25. Ray, S.R. Manufacturing Interoperability / S.R. Ray, A.T. Jones // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2006. – Vol. 17, iss. 6. – P. 681–688.

26. Interoperable manufacturing knowledge systems / C. Palmer, Z. Usman, O. Canciglieri Jr. et al. // International journal of production research. – 2017. – Vol. 56, iss. 8. – P. 2733–2752.

27. Kiritsis, D. Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems / D. Kiritsis, A. Bufardi, P. Xirouchakis // Advanced Engineering Informatics. – 2004. – Vol. 17, iss. 3–4. – P. 189–202.

28. Вишняков, А.А. Совершенствование механизма оценки реализуемости инновационных проектов: автореф. дис. ... канд. экон. наук / А.А. Вишняков. – Саратов, 1999. – 24 с.

29. Охезина, Г.М. Методы оценки перспективности и реализуемости процессных инноваций на промышленном предприятии: автореф. дис. ... канд. экон. наук / Г.М. Охезина. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 24 с.

30. Русаков, С.Н. Методика оценки технологической реализуемости производства инновационной продукции двойного назначения / С. Н. Русаков // Экономические и гуманитарные науки. – 2015. – № 4 (279). – С. 45–54.

31. Шарп, У. Инвестиции / У. Шарп, Г. Александер, Д. Бейли. – М.: ИНФРА-М, 2001. – 1028 с.

32. Аралов, О.В. Разработка математической модели оценки финансовой реализуемости плана ОКР по созданию сложных технических систем / О.В. Аралов, Е.В. Сайко // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2011. – № 3. – С. 36–41.

33. Математическое моделирование субъективных суждений в теории измерительно-вычислительных систем / Д.А. Балакин, Б.И. Волков, Т.Г. Еленина и др. // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2014. – Т. 18, № 2. – С. 33–78.

34. Мустаев, И.З. Экономические модели инноватики / И.З. Мустаев. – Уфа: РИК УГАТУ, 2013. – 202 с.

35. Мустаев, И.З. Социофизические модели инноватики / И.З. Мустаев. – Уфа: РИК УГАТУ, 2017. – 174 с.

Мустаев Ирек Закиевич, д-р экон. наук, профессор, заведующий кафедрой управления инновациями, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; fermi\_moustaev@mail.ru.

Иванов Владимир Юрьевич, директор, ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение», г. Уфа; ivanov.vladimir@mail.ru.

Куликов Григорий Геннадьевич, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа; gkgufa@rambler.ru.

Мустаев Тимур Ирекович, магистрант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; tima.mus.1321@gmail.com.

Поступила в редакцию 7 марта 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210214

## THE PROJECT OF CREATION OF AN AVIATION PRODUCT AS A SPECIAL CLASS OF INNOVATION

I.Z. *Mustaev*<sup>1</sup>, fermi\_moustaev@mail.ru,  
V.Yu. *Ivanov*<sup>2</sup>, ivanov.vladimir@mail.ru,  
G.G. *Kulikov*<sup>3</sup>, gkgufa@rambler.ru,  
T.I. *Mustaev*<sup>1</sup>, tima.mus.1321@gmail.com

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

<sup>2</sup> PJSC “UEC-Ufa Engine-Building Production Association”,  
Ufa, Russian Federation,

<sup>3</sup> JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russian Federation

The article is devoted to the presentation of the conceptual and categorical apparatus of projects for the creation of complex technical products of a new generation. It is shown that the classification of the projects under consideration creates methodological prerequisites for increasing the accuracy and quality of forecasts of time and resources. It is asserted that in the general set of innovative processes, innovative projects for creating a new generation of aviation products fall into an independent subgroup of innovative projects for creating complex technical objects of a new generation. Allocation of a separate subgroup of projects allows you to form specific methods of modeling, analysis, forecasting and management for them. **Materials and methods.** Justification is carried out in the form of a logical conclusion. There are four indicators that characterize the design processes. Based on the analysis of the features of the projects for the creation of aircraft products, it was concluded that it is necessary to clarify the set of criteria for projects to create complex equipment of a new generation. For this group of projects, in addition to the existing four criteria of goals, timing, resources and organization of project execution, it is proposed to add a fifth criterion – the criterion of project uncertainty. **Result.** It is shown that in the aggregate a group of five criteria makes it possible to single out from the whole set of innovative processes associated with the creation of new technology, a subgroup of processes for creating complex technology of a new generation. The differences between the interpretation of uncertainty adopted in the work and the interpretation of uncertainty used in the project analysis as a set of risks accompanying projects are noted. **Conclusion.** An integral criterion for the magnitude of sociophysical potential has been formed, combining the criteria of goals, timing, resources, organization and uncertainty of innovative projects. An example of the interpretation of the integral criterion for the case of creating a new generation aircraft product is given.

*Keywords: innovation, innovation project, sociophysical potential, aviation product.*

### References

1. Khotyashева O.M. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovation management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2007. 384 p.
2. Fatkhutdinov R.A. *Innovatsionnyy menedzhment* [Innovation management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2007. 448 p.
3. Darmilova Z.D. *Innovatsionnyy menedzhment: uchebnoye posobiye dlya bakalavrov* [Innovation management: a textbook for bachelors]. Moscow, Publishing and trade corporation “Dashkov and K”, 2013. 168 p.
4. Chesbrough H. *Open Business Models. The New Imperative for Creating and Profiting from Technology*. Boston, Harvard Business School Press, 2007. 227 p.
5. Rothwell R. Towards the fifth-generation innovation process. *International marketing review*, 1994, no. 11 (1), pp. 7–31.
6. Cooper R.G. *Winning at new products. Accelerating the process from idea to launch*. Cambridge (MA), Perseus Publishing, 2001. 415 p.
7. Wheelwright S.C., Clark K.B. Revolutionizing product development: Quantum leaps in speed, efficiency and quality. *R & D Management*, 1994, vol. 24 (3), p. 298.
8. Kodama F. *Emerging patterns of innovation sources of Japan's technological edge*. Harvard Business School, 1995. 299 p.
9. Twiss B. *Upravleniye nauchno-tekhnicheskimi novovvedeniyami* [Management of scientific and technical innovations]. Moscow, Economics Publ., 1989. 272 p.
10. Project Management Institute. *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK guide)*. Newtown Square, PA, ISBN 9781628253900.
11. Kurako D.V., Drozdov M.A., Ragozina M.A. [Features of innovative projects of the rocket and space industry]. *Actual problems of aviation and cosmonautics*, 2018, vol. 2, no. 4 (14), pp. 699–701. (in Russ.)
12. Lubyanskaya E.B., Anisimov Yu.P. [Features of the system of strategic management of innovative projects in the digital economy]. *Production organizer*, 2019, vol. 27, no. 2, pp. 81–93. (in Russ.)
13. Orlov A.I. [Organizational and economic support of innovation activity in the rocket and space industry]. *Political network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*, 2014, no. 102, pp. 112–143. (in Russ.)
14. Orlov A.I. [On indicators of the effectiveness of scientific activity]. *Economic analysis: theory and practice*, 2014, no. 7 (358), pp. 21–29. (in Russ.)
15. Khrustalev E.Yu., Slavyanov A.S., Sakharov I.E. [Methods and tools for choosing mechanisms of economic protection of high-tech industries on the example of the rocket and space industry]. *Economic analysis: theory and practice*, 2013, no. 30 (333), pp. 2–11. (in Russ.)
16. Khrustalev E.Yu., Strelnikova I.A. [Financial mechanisms of risk reduction in the creation of science-intensive and high-tech products]. *Finance and credit*, 2011, no. 7 (439), pp. 13–21. (in Russ.)
17. Kolobov A.A., Orlov A.I. *Proyektirovaniye integrirovannykh proizvodstvenno-korporativnykh struktur: effektivnost', organizatsiya, upravleniye* [Designing integrated production and corporate structures: efficiency, organization, management]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2006. 728 p.
18. Chursin A.A., Rusinov A.A., Volkov V.A. [Assessment of the risks of sustainable development of high-tech areas of industry in the implementation of innovative technologies]. *Economy and management in mechanical engineering*, 2012, no. 1, pp. 25–29. (in Russ.)
19. *Metodicheskiye rekomendatsii po otsenke effektivnosti investitsionnykh projektov* [Methodical recommendations for evaluating the effectiveness of investment projects. Approved by the Ministry of Economy of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, June 21, 1999].
20. Brailey R., Myers S. *Principles of corporate finance*. Moscow, CJSC “Olymp-business”, 1997. 1120 p.
21. Slavyanov A.S. [Problems of optimization of the resource potential of the rocket and space industry in the context of reducing budgetary expenditures]. *Innovations in management*, 2016, no. 3 (9), pp. 58–69. (in Russ.)
22. Smolyak S.A. [On the methodology for assessing the effectiveness of real investment projects]. *Russian economic journal*, 2006, no. 9–10, pp. 63–73. (in Russ.)

23. TASS website. Available at: <https://tass.ru/mezhdunarodnaya-panorama/1136666> (accessed 24.10.2020).
24. Enkel E., Perez-Freije J., Gassmann O. Minimizing market risks through customer integration in new product development: Learning from bad practice. *Creativity and Innovation Management*, 2005, vol. 14, no. 4, pp. 425–437.
25. Ray S.R., Jones A.T. Manufacturing Interoperability. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2006, vol. 17, iss. 6, pp. 681–688.
26. Palmer C., Usman Z., Canciglieri O. Jr., Malucelli A., Young R.I.M. Interoperable manufacturing knowledge systems. *International journal of production research*, 2017, vol. 56, iss. 8, pp. 2733–2752.
27. Kiritsis D., Bufardi A., Xirouchakis P. Research issues on product lifecycle management and information tracking using smart embedded systems. *Advanced Engineering Informatics*, 2004, vol. 17, iss. 3–4, pp. 189–202.
28. Vishnyakov A.A. *Sovershenstvovaniye mekhanizma otsenki realizuyemosti innovatsionnykh proyektov: avtoref. dis. kand. ekon. nauk* [Improving the mechanism for assessing the feasibility of innovative projects. Cand. sci. diss.]. Saratov, 1999. 24 p.
29. Ohezina G.M. *Metody otsenki perspektivnosti i realizuyemosti protsessnykh innovatsiy na promyshlennom predpriyatii: avtoref. dis. kand. ekon. nauk* [Methods for assessing the viability and feasibility of process innovations at an industrial enterprise. Cand. sci. diss.]. Nizhny Novgorod, 2013, 24 p. (in Russ.)
30. Rusakov S.N. [Methodology for assessing the technological feasibility of the production of innovative dual-use products]. *Economic and humanitarian sciences*, 2015, no. 4 (279), pp. 45–54. (in Russ.)
31. Sharpe W., Alexander G., Bailey D. *Investitsii* [Investments]. Moscow, INFRA-M Publ., 2001, 1028 p.
32. Aralov O.V., Sayko E.V. [Development of a mathematical model for assessing the financial feasibility of an OCD plan for the creation of complex technical systems]. *Science and technology of pipeline transport of oil and oil products*, 2011, no. 3, pp. 36–41. (in Russ.)
33. Balakin D.A., Volkov B.I., Yelenina T.G., Kuznetsov A.S., Pytev Yu.P. [Mathematical modeling of subjective judgments in the theory of measuring and computing systems]. *Intelligent systems. Theory and applications*, 2014, vol. 18, no. 2, pp. 33–78. (in Russ.)
34. Mustaev I.Z. *Ekonomicheskiye modeli innovatiki* [Economic models of innovation]. Ufa, RIK UGATU, 2013. 202 p.
35. Mustaev I.Z. *Sotsiofizicheskiye modeli innovatiki* [Sociophysical models of innovation]. Ufa, RIK USATU, 2017. 174 p.

Received 7 March 2021

---

#### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Проект создания авиационного изделия как особый класс инноваций / И.З. Мустаев, В.Ю. Иванов, Г.Г. Куликов, Т.И. Мустаев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 145–153. DOI: 10.14529/ctcr210214

#### FOR CITATION

Mustaev I.Z., Ivanov V.Yu., Kulikov G.G., Mustaev T.I. The Project of Creation of an Aviation Product as a Special Class of Innovation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 145–153. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210214

## ПРИМЕНЕНИЕ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПЕРМСКОГО КРАЯ

*Н.А. Сиротина, А.В. Копотева, А.В. Затонский*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Березниковский филиал, г. Березники, Россия*

Статья посвящена проблеме математического моделирования природно-ресурсного потенциала Пермского края на основе конечно-разностных моделей 1-го и 2-го порядков. Ранее нами было установлено, что при исследовании сложных социально-экономических процессов такие модели позволяют получать более качественные прогнозы по сравнению с традиционно применяемыми моделями линейной множественной регрессии. Высокое качество модели природно-ресурсного потенциала и соответствующих прогнозов является одним из необходимых условий эффективного управления природными богатствами региона с целью обеспечения его устойчивого экономического развития. **Цель работы.** Целью данного исследования являлось построение на основании статистических данных за период с 2001 по 2018 г. конечно-разностных моделей комплексного показателя природно-ресурсного потенциала и оценка их прогностических свойств на примере Пермского края. **Материалы и методы.** В качестве базы сравнения использовалась модель множественной линейной регрессии. Комплексный показатель природно-ресурсного потенциала региона рассчитывался как взвешенная сумма частных критериев, характеризующих природные богатства региона. Конечно, разностные модели первого и второго порядка получены путем добавления в модель множественной линейной регрессии авторегрессионных слагаемых первого и второго порядков соответственно. Оценка неизвестных параметров уравнений выполнена на основании модифицированного метода наименьших квадратов, сохраняющего знаки коэффициентов при факторах такими же, как в исходной линейной модели. При этом отбор объясняющих факторов и оценка качества моделей осуществлялись исходя из точности полученных по ним прогнозных значений изучаемого показателя. **Результаты исследования.** В связи с изменениями в методике формирования статистических данных, определяющих составляющие и факторы природно-ресурсного потенциала, процедура построения конечно-разностных моделей была выполнена для трех различных временных интервалов: 2001–2018, 2001–2008 и 2008–2018. Число расчетных прогнозных значений составило 18, причем лишь в 4 из 18 случаев (22,2 %) их качество оказалось хуже, чем у прогнозов с использованием линейной множественной модели. **Обсуждение и заключение.** Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенная модификация множественной линейной модели регрессии с добавлением авторегрессионных слагаемых позволяет повысить качество прогнозирования комплексного показателя природно-ресурсного потенциала региона и, следовательно, принимать более эффективные решения при управлении его уровнем.

*Ключевые слова: математическое моделирование, прогнозирование, конечно-разностная модель, природно-ресурсный потенциал региона, Пермский край.*

### **Введение**

Устойчивое экономическое развитие региона напрямую зависит от имеющихся в нем природных ресурсов, от их качества и продуктивности использования. Для повышения эффективности принятия управленческих решений по использованию региональных природных ресурсов, комплексно характеризующихся показателем природно-ресурсного потенциала (ПРП), широко применимы различные методы прогнозирования, основанные на данных открытой статистики. При этом наиболее распространенные методы корреляционного и регрессионного анализа не всегда дают удовлетворительные результаты в экономических исследованиях по причине сложности соответствующих объектов и наличия неявных нелинейных зависимостей между количественными показателями, их характеризующими. В результате коэффициенты полученных таким методом моделей могут оказаться не интерпретируемыми, а сами модели не обеспечивают должно-

го качества прогнозирования. В связи с этим возникает необходимость модификации классических методов для получения более приемлемых с прикладной точки зрения результатов при исследовании социально-экономических систем.

## 1. Обзор литературы

Обзор актуальных исследований по данной тематике показал их преимущественно экономический характер, кроме того, большинство отечественных работ по данной тематике достаточно старые. Работ, значимых с точки зрения математического моделирования ПРП, в открытом доступе найти не удалось. В частности, ряд авторов разрабатывают вопрос моделирования потоков инвестиций с целью эффективного использования и освоения ПРП на примере различных стран и регионов: Таджикистана [1], Африки [2], Китая [3]. Для характеристики ПРП и его элементов широко распространено использование геоинформационно-аналитических систем. В частности, авторы [4] произвели комплексную оценку природного богатства Пермского края, а в [5] рассматривается возможность применения ГИС для управления природными ресурсами различных типов на территории Индии.

ГИС используются и для моделирования отдельных составляющих ПРП. В [6] авторы используют ГИС в комплексе с рядом иных методов для обнаружения и исследования запасов подземных вод в Египте, в [7] ГИС-системы применяются для моделирования и прогнозирования наводнений в Китае.

Достаточно распространено как в отечественных, так и в зарубежных источниках математическое моделирование отдельных элементов природно-ресурсного потенциала. Одним из возможных подходов к оценке эффективности использования ресурсов является построение оптимизационных математических моделей, например в [8] приводятся результаты моделирования добычи природного газа на региональном и мировом уровне. Такой подход предполагает наличие адекватного математического критерия, подлежащего оптимизации, а также системы ограничений, а при их отсутствии данный метод практически неприменим. Исследование [9] посвящено краткому обзору существующих оптимизационных динамических моделей невозобновляемых природных ресурсов. При этом рассматриваются детерминированные модели отдельных ресурсов, что не позволяет напрямую использовать их для случая двух и более их видов, что характерно для большинства регионов. Кроме того, используемый аппарат классической теории оптимального управления требует от исследователя достаточно высокого уровня математической подготовки и может приводить к некорректным результатам применительно к стохастическим экономическим объектам. В работе [10] разработана многокритериальная многофакторная нечеткая модель частично целочисленного программирования для оптимизации распределения сельскохозяйственных водных и земельных ресурсов в условиях неопределенности. Подобное сочетание методов весьма эффективно для решения слабо формализуемых задач, однако требует разработки как специфического математического инструментария, так и программного обеспечения. Это существенно усложняет процесс нахождения решения, растягивает его во времени и требует достаточно высокой квалификации разработчиков соответствующей системы поддержки принятия решения. В целом оптимизационные модели предполагают наличие оптимизируемой функции, т. е. качественного описания объекта в математической форме, в отсутствие такого описания являются неприменимыми.

В работе [11] разработана нелинейная математическая модель управления морскими природными ресурсами в форме системы нелинейных дифференциальных уравнений и выполнено ее исследование в рамках теории устойчивости динамических систем. Применение данного подхода возможно в случае, когда исследуемая система может быть адекватно описана системой обыкновенных дифференциальных уравнений. В [12] авторы применяют детерминированную и стохастическую модели влияния осадков на лесные ресурсы для определения наличия и устойчивости равновесного состояния системы в зависимости от ее параметров и характеристик случайной составляющей. В [13] автором изложена динамическая математическая модель и способ оценки состояния экономики региона с заданным перечнем производств, ресурсов и т. д. в форме системы дифференциальных уравнений. В целом детерминированные факторные модели в большей степени подходят для технических и физических систем, а поведение сложных социально-экономических систем не всегда адекватно описывают.

Авторы в [14] рассматривают возможность применения балансовых моделей для анализа потребления водных ресурсов. Данный подход не позволяет адекватно характеризовать сложные динамические стохастические объекты, поскольку балансовые модели как правило являются статическими детерминированными.

Еще один распространенный подход к управлению природными ресурсами – моделирование с целью минимизации воздействия на окружающую среду. В [15] предпринята попытка оценки эффективности мероприятий по восстановлению окружающей природной среды в рамках постановки и решения задачи линейного программирования. Авторы в [16] исследуют вопросы моделирования в сфере истощения запасов природных ресурсов и вовлечения ресурсов техногенных месторождений в хозяйственный оборот. В работе [17] авторы изложили способ математического моделирования управления ресурсами и отходами с использованием комплексного подхода.

Достаточно активно в публикациях различных авторов рассматриваются задачи управления процессами отдельных производств, которые эксплуатируют природные ресурсы. Так, в [18] предложены варианты оптимизации управления аграрным сектором, в частности, земельными ресурсами, производством растениеводческой и животноводческой продукции на основании моделей математического программирования со случайными параметрами. В [19] авторами предпринята попытка определения наиболее рационального способа использования энергетических природных и техногенных ресурсов в агротехнологиях на базе энергетической модели преобразования энергии организмами. В [20] приводится экономико-математическая модель управления производственно-экономической деятельностью сельскохозяйственного предприятия, имеющего специализацию животноводство, являющаяся моделью условной минимизации целевой функции затрат в условиях ограниченных ресурсов. Авторы в [21] анализируют использование водных ресурсов на основе модели экологического следа. Такие исследования, как правило, посвящены конкретным производствам и соответствующим ресурсам, что не позволяет использовать их для управления совокупностью ресурсов в рамках региона.

### 2. Материалы и методы

Таким образом, несмотря на многообразие методов, ни один из них не является универсальным. Применимость методов зависит от имеющихся в распоряжении исследователя данных. Это означает, что метод, примененный в одном случае, может оказаться неприменимым в другом. Кроме того, вопрос математического моделирования ПРП на уровне региона вообще и Пермского края в частности разработан недостаточно, а выбор метода есть субъективный выбор исследователя. Соответственно разработка метода, подходящего для целей моделирования и прогнозирования ПРП, позволяющего управлять его уровнем с целью обеспечения устойчивого развития и эффективного использования природных богатств региона, является интересной задачей с теоретической и прикладной точки зрения. Его реализация предполагает:

- 1) выбор предпочтительного математического метода моделирования; в данной работе рассматривается модификация ЛММ в силу ее простоты, распространенности и использования открытых статистических данных в качестве информационной базы;
- 2) сбор статистических данных по Пермскому краю, характеризующих составляющие и факторы, определяющие ПРП;
- 3) построение математического критерия ПРП;
- 4) моделирование и прогнозирование ПРП Пермского края на основании модифицированной модели множественной линейной регрессии;
- 5) выработку системы рекомендаций для ЛПР по повышению эффективности краткосрочного управления ПРП.

В рамках данной работы реализуется построение формальной модели природно-ресурсного потенциала (ПРП) на примере Пермского края и обосновываются ее лучшие прогнозные свойства в краткосрочном периоде. С этой целью выделяются факторы, значимые для ПРП Пермского края, производится оценка неизвестных коэффициентов предложенной модели ПРП, осуществляется прогнозирование ПРП на основе классического и разработанного методов, проверка лучших прогностических возможностей предложенного метода.

Под природно-ресурсным потенциалом следует понимать совокупность природных условий и запас природных ресурсов, которые могут быть использованы в хозяйственной деятельности

при данном уровне развития техники, технологии и экономических отношений. В частности, под природно-ресурсным потенциалом региона понимается совокупная способность всего многообразия естественных ресурсов и условий территории обеспечивать жизнедеятельность населения и удовлетворять потребности общественного производства на конкретном этапе исторического развития.

Обобщенный критерий ПРП рассчитывается в виде взвешенной суммы отдельных составляющих ПРП [22]  $Y(t_k) = \alpha_1 \cdot Y_1(t_k) + \alpha_2 \cdot Y_2(t_k) + \dots + \alpha_n \cdot Y_n(t_k)$ , где  $t_k$  – момент времени в пределах изучаемого временного интервала  $k=1, 2, \dots, K$ . Для определения значений весовых коэффициентов  $\alpha_i, i=1, 2, \dots, n$  частные критерии  $Y_i(t_k), i=1, 2, \dots, n, k=1, 2, \dots, K$  упорядочиваются по степени важности для уровня ПРП (ранжируются), т. е. каждому частному критерию присваивается ранг  $R_i \in \{1, 2, \dots, n\}, i=1, 2, \dots, n$ ; тогда  $\alpha_i = 1/R_i$ . Поскольку сложные социально-экономические системы достаточно инертны и, следовательно, меняются медленно, то ранги  $R_i$  подбираются таким образом, чтобы обеспечить наиболее плавную динамику сводного показателя ПРП, т. е. минимизируют сумму квадратов разностей его текущего и предшествующего значений:

$$\alpha_i, i=1, 2, \dots, n: S = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot (Y(t_{k+1}) - Y(t_k))^2 \rightarrow \min. \quad (1)$$

Дополнительным преимуществом такого метода ранжирования частных критериев является исключение субъективности при упорядочении их человеком. Расчет весовых коэффициентов  $\alpha_i, i=1, 2, \dots, n$  целесообразно производить по нормированным данным для исключения влияния размерностей частных критериев.

Наличие обобщенного критерия ПРП позволяет сконструировать его линейную множественную регрессионную модель вида

$$Y_{\text{расч}}(t_k) = a + c_1 \cdot X_1(t_k) + c_2 \cdot X_2(t_k) + \dots + c_p \cdot X_p(t_k) = a + \sum_{j=1}^m c_j \cdot X_j(t_k), \quad (2)$$

где  $Y_{\text{расч}}(t_k)$  – расчетное значение моделируемой величины в момент времени  $t_k$ ;

$a$  – постоянная линейной многофакторной модели, определяющая уровень моделируемой величины при нулевых значениях факторов;

$X_j(t_k)$  – значения факторов, определяющих значение моделируемой величины, в момент времени  $t_k, j=1, 2, \dots, m$ ;

$c_i$  – коэффициенты линейной множественной модели, показывающие, на сколько изменится моделируемая величина при увеличении соответствующего фактора  $X_i$  на 1.

Управление ПРП осуществляется посредством варьирования определяющих его уровень факторов  $X_j(t_k), j=1, 2, \dots, m$ . При этом каждый регион обладает собственными составляющими ПРП  $Y_i(t_k)$  и набором определяющих их значения (а значит, и уровень собственно ПРП) показателей  $X_j(t_k)$ . Формальный отбор существенных факторов в уравнение (2) осуществляется на основании анализа матрицы парных коэффициентов корреляции. При этом в модель отбирают такие объясняющие переменные, которые тесно связаны с объясняемой величиной, и слабо – друг с другом [23]. Кроме того, возможно построение модели (2) с помощью пошаговых процедур регрессии, когда факторы добавляются в уравнение или исключаются из него до тех пор, пока происходит увеличение исправленного коэффициента детерминации соответствующих уравнений. Однако, как утверждают многие авторы [24, 25] и показывает практика, формальные процедуры отбора объясняющих переменных не всегда эффективны при моделировании социально-экономических процессов. Это проявляется в неудовлетворительном качестве получаемых уравнений и прогнозов на их основании. В таких случаях приходится выполнять и корреляционный, и качественный анализы и отбирать наиболее значимые факторы с точки зрения природы моделируемого объекта с учетом результатов анализа матрицы парных коэффициентов корреляции.

## Краткие сообщения

При изучении динамики показателя естественным является предположение о зависимости его значения в текущий момент времени от значений в предыдущие моменты времени. Для учета такого влияния используются авторегрессионные модели различных порядков, причем порядок модели соответствует максимальному временному лагу. Тогда модификации классической модели множественной линейной регрессии, содержащие авторегрессионные слагаемые первого и второго порядков, примут вид:

$$Y_{\text{расч}}(t_k) = a + b \cdot Y(t_{k-1}) + \sum_{j=1}^m c_j \cdot X_j(t_k); \quad (3)$$

$$Y_{\text{расч}}(t_k) = a + b \cdot Y(t_{k-1}) + d \cdot Y(t_{k-2}) + \sum_{j=1}^m c_j \cdot X_j(t_k), \quad (4)$$

где  $b$  – параметр, показывающий, на сколько изменится моделируемая величина  $Y(t_k)$  при увеличении значения изучаемой величины в момент времени, предшествующий данному  $Y(t_{k-1})$ , на единицу;

$d$  – параметр, показывающий, на сколько изменится моделируемая величина  $Y(t_k)$  при увеличении значения изучаемой величины в момент времени  $t_{k-2}$   $Y(t_{k-2})$  на единицу.

Заметим, что уравнения (3) и (4) могут быть получены путем замены в регрессионно-дифференциальных моделях первой и второй производных изучаемого показателя их конечно-разностными аналогами [26]. Это дает основание называть уравнения (3) и (4) конечно-разностными моделями первого и второго порядков соответственно.

Проверка качества регрессионных моделей традиционно ограничивается их статистическими характеристиками – значимостью уравнения и его параметров, а также уровнем коэффициента детерминации, характеризующего аппроксимационные свойства соответствующих уравнений. Однако, поскольку добавление в регрессионную модель дополнительных факторов автоматически увеличивает качество аппроксимации, а авторегрессионные слагаемые являются, по сути, добавочными факторами, в нашем исследовании качество регрессионных уравнений оценивается на основании их прогностических свойств. Их оценка для КРМ ПРП выполняется на основании следующего алгоритма:

– рассчитывается относительная погрешность прогноза с использованием ЛММ как отношение разности фактического и модельного значений изучаемого показателя к его фактическому уровню, выраженное в процентах;

– рассчитывается относительная погрешность прогноза с использованием КРМ как отношение разности фактического и модельного значений изучаемого показателя к его фактическому уровню, выраженное в процентах;

– показатель качества прогнозирования с использованием КРМ рассчитывается как частное от деления относительной погрешности прогнозирования КРМ на относительную погрешность прогнозирования ЛММ, умноженное на 100 %.

Таким образом, процедура построения КРМ ПРП Пермского края является итеративной и осуществляется следующим образом:

1) производится анализ матрицы парных коэффициентов корреляции с целью формального исключения тесно взаимосвязанных факторов (устранение мультиколлинеарности);

2) производится качественный анализ оставшихся факторов и проверяется, не исключены ли наиболее значимые с экономической точки зрения факторы из модели и достаточно ли оставшихся факторов для адекватного описания ПРП;

3) оцениваются неизвестные параметры моделей ЛММ (2) и КРМ (3), (4) по укороченным на 1 и 2 значения временным рядам  $Y(t_k)$  и  $X_j(t_k)$ ,  $j=1, 2, \dots, m$ ,  $k=1, 2, \dots, K-1$  ( $K-2$ ); при этом знаки коэффициентов при факторах  $c_j$ ,  $j=1, 2, \dots, m$  в (3) и (4) совпадают с их знаками в (2) для обеспечения экономической интерпретируемости их значений;

4) рассчитываются прогнозные значения ПРП на основании уравнений (2)–(4) для временных периодов  $K-1$  и  $K$  и сравниваются соответствующие относительные погрешности моделирования ЛММ и КРМ на основании предложенного выше алгоритма;

5) делается вывод о качестве прогнозирования КРМ, если оно неудовлетворительно, возвращаемся к шагу 1, т. е. пересматриваются корреляционный и качественный анализы факторов и модели перестраиваются с новым их набором.

### 3. Результаты исследования

Для каждого региона составляющие ПРП и факторы, его характеризующие, определяются исходя из его географических особенностей и доступности статистических данных. В случае Пермского края соответствующие показатели представлены в табл. 1.

Критерии и факторы ПРП Пермского края

Таблица 1

Natural resource potential criteria and factors for the Perm region

Table 1

№	Обозначение	Наименование
1	$Y_1$	Добыча нефти, включая газовый конденсат, тыс. т
2	$Y_2$	Добыча природного и попутного газов, млн м <sup>3</sup>
3	$Y_3$	Производство удобрений минеральных или химических (в пересчете на 100 % питательных веществ), тыс. т
4	$Y_4$	Производство продукции сельского хозяйства, млн руб.
5	$Y_5$	Производство деловой древесины, тыс. плотных м <sup>3</sup>
6	$X_1$	Посевные площади сельскохозяйственных культур, тыс. га
7	$X_2$	Среднегодовая численность занятых в экономике, тыс. чел.
8	$X_3$	Инвестиции в основной капитал предприятий, млн руб.
9	$X_4$	Внесение удобрений минеральные удобрения, тыс. т
10	$X_5$	Внесение удобрений органические удобрения, тыс. т
11	$X_6$	Стоимость основных фондов на конец года, млн руб.
12	$X_7$	Лесовосстановление, тыс. га
13	$X_8$	Число предприятий и организаций на конец года
14	$X_9$	Цена нефти Brent (среднегодовое значение), USD за баррель
15	$X_{10}$	Экспорт продукции ТЭК, млн USD

Необходимые статистические данные по Пермскому краю содержатся в различных источниках федерального и регионального уровней: Федеральная служба государственной статистики, территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Пермскому краю, Лесной план Пермского края на 2018–2027 гг., Стратегия социально-экономического развития Пермского края до 2026 г., государственная программа Пермского края «Воспроизводство и использование природных ресурсов». Для исследования были собраны статистические данные о соответствующих показателях (см. табл. 1) за период с 2001 по 2018 г. На их основании был сформирован комплексный критерий ПРП Пермского края как взвешенная сумма частных критериев в виде  $Y = Y_1 / 5 + Y_2 / 4 + Y_3 / 2 + Y_4 / 3 + Y_5 / 1$ .

Отметим, что в связи с внедрением стандарта СНС 2008 (системы национальных счетов 2008) данные в рамках временных рядов оказываются несопоставимым, в связи с чем моделирование производилось на временных интервалах 2001–2008 и 2008–2018. Оценка параметров уравнений (2)–(4) для различных наборов объясняющих факторов и расчет относительных погрешностей прогнозирования выполнены средствами Visual Basic for Applications MS Excel. На основании произведенных расчетов исходя из минимума относительных погрешностей прогнозирования выбирались наиболее качественные модели.

При моделировании ПРП Пермского края не удалось подобрать универсальный набор факторов, адекватно описывающий его динамику на протяжении рассмотренных временных интервалов (табл. 2). Так, при моделировании в период с 2001 по 2018 г. (рис. 1) удалось построить уравнения с приемлемым качеством прогнозирования, включающие факторы  $X_1, X_3, X_4, X_7, X_{10}$ . Для периода моделирования 2001–2008 (рис. 2) значимыми оказались факторы  $X_4, X_5, X_6, X_7, X_9, X_{10}$ , а для периода моделирования 2008–2018 (рис. 3) – факторы  $X_1, X_2, X_4, X_6, X_7, X_8, X_9, X_{10}$ . При этом

## Краткие сообщения

погрешности прогнозирования с использованием КРМ, как правило, существенно ниже, чем с использованием ЛММ (табл. 3).

При прогнозировании на 1 год вперед обе конечно-разностные модели показали лучшие результаты на всех трех рассмотренных временных отрезках. Лучший результат прогнозирования оказался у КРМ-2 на отрезке 2001–2008 – 3,34 % от уровня погрешности ЛММ. Также весьма неплох КРМ-2 прогноз на отрезке 2001–2018 – 6,46 % от уровня погрешности прогнозирования ЛММ. Несколько хуже результат на отрезке 2008–2018 – 65,55 % от уровня погрешности прогнозирования ЛММ для КРМ-1 и 68,73 % для КРМ-2; тем не менее даже здесь удастся улучшить качество прогноза более чем на треть.

Значения коэффициентов ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 ПРП Пермского края

Таблица 2

Table 2

Multiple linear, 1-st and 2-nd type finite difference models coefficients for Perm region

Параметр	ЛММ			КРМ-1			КРМ-2		
	2001–2008	2008–2018	2001–2018	2001–2008	2008–2018	2001–2018	2001–2008	2008–2018	2001–2018
$a$	-1,859	-1,638	0,312	-1,027	-2,679	0,295	-1,202	-3,086	0,313
$b$	–	–	–	0,032	0,686	0,667	-0,133	0,871	0,580
$c_1$	–	1,742	-0,429	–	4,594	-0,361	–	5,561	-0,386
$c_2$	–	-0,576	–	–	-2,894	–	–	-3,678	–
$c_3$	–	–	0,424	–	–	0,000	–	–	0,000
$c_4$	0,938	0,173	0,068	0,795	0,000	0,000	0,937	0,000	0,000
$c_5$	0,311	–	–	0,000	–	–	0,072	–	–
$c_6$	3,905	1,901	–	1,573	2,095	–	1,634	2,098	–
$c_7$	0,549	-0,678	0,199	0,525	-1,876	0,064	0,593	-2,318	0,071
$c_8$	–	1,352	–	–	2,532	–	–	2,998	–
$c_9$	-1,635	0,926	–	0,000	3,009	–	0,000	3,696	–
$c_{10}$	1,125	0,363	0,136	0,660	0,291	0,022	0,763	0,270	0,027
$d$	–	–	–	–	–	–	0,279	0,129	0,063

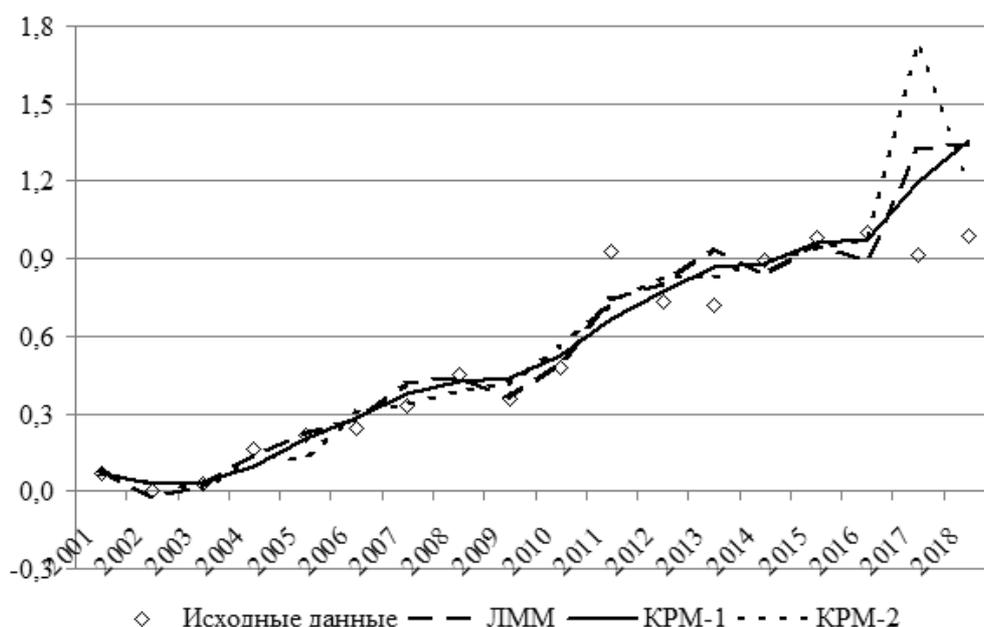


Рис. 1. Модели ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 ПРП Пермского края в период с 2001 по 2018 г.

Fig. 1. Multiple linear, 1-st and 2-nd type finite difference models for Perm region in 2001–2018

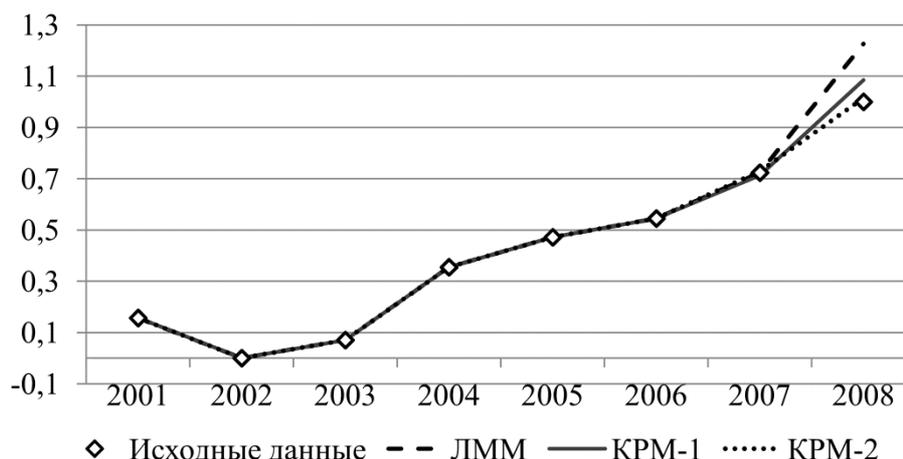


Рис. 2. Модели ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 НРП Пермского края в период с 2001 по 2008 г.  
Fig. 2. Multiple linear, 1-st and 2-nd type finite difference models for Perm region in 2001–2008

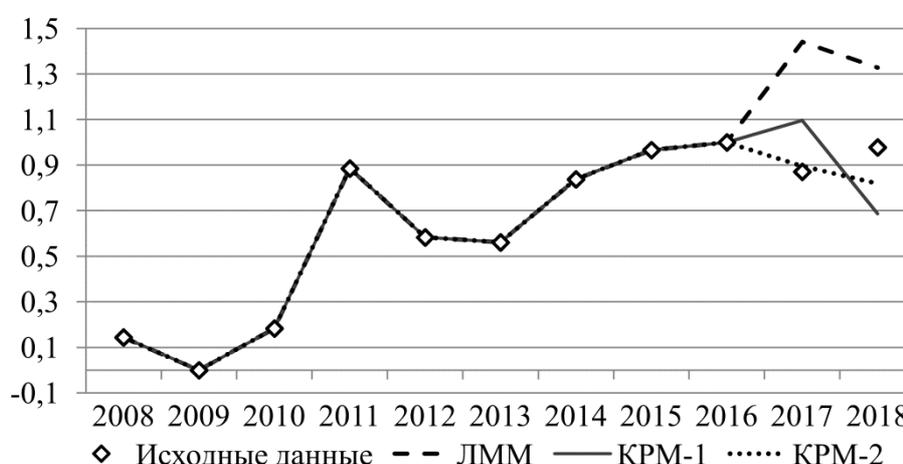


Рис. 3. Модели ЛММ, КРМ-1 и КРМ-2 НРП Пермского края в период с 2008 по 2018 г.  
Fig. 3. Multiple linear, 1-st and 2-nd type finite difference models for Perm region in 2008–2018

Погрешности прогнозирования НРП Пермского края

Таблица 3

Perm region natural resource potential forecasting errors

Table 3

Временной интервал	Модель	Постпрогноз 1 год	Постпрогноз 2 года	
			1 год	2 год
2001–2008	ЛММ	100	100	100
	КРМ-1	35,58	4982,77	37,54
	КРМ-2	3,34	2474,45	6,28
2008–2018	КРМ-1	65,55	-29,77	83,21
	КРМ-2	68,73	-16,29	45,52
2001–2018	КРМ-1	30,30	68,68	103,79
	КРМ-2	6,46	199,05	56,51

При прогнозировании на 2 года вперед целесообразно рассмотреть качество прогнозов на 1 и 2 года. Прогнозы КРМ на 1 год обладают лучшим качеством по сравнению с ЛММ лишь в половине случаев:

- на временном интервале 2008–2018 прогнозы КРМ-1 и КРМ-2 на 1 год существенно лучше ЛММ-прогноза;
- на временном интервале 2001–2018 прогноз КРМ-1 на 1 год более чем на треть лучше ЛММ-прогноза;

## Краткие сообщения

– на временном интервале 2001–2008 прогнозы КРМ-1 и КРМ-2 на 1 год намного хуже ЛММ-прогноза;

– на временном интервале 2001–2018 прогноз КРМ-2 на 1 год вдвое хуже ЛММ-прогноза.

Это означает, что использование КРМ, построенных для прогнозирования на 2 года вперед, для прогнозирования на 1 год вперед не всегда нецелесообразно.

Прогнозы КРМ на 2 года обладают лучшим качеством по сравнению с ЛММ в 5 из 6 случаев:

– на временном интервале 2001–2008 прогнозы КРМ-1 и КРМ-2 на 2 года существенно лучше ЛММ-прогноза; при этом прогноз КРМ-2 позволяет добиться погрешности прогнозирования на уровне 6,28 % от погрешности прогнозирования ЛММ;

– на временном интервале 2008–2018 прогнозы КРМ-1 и КРМ-2 на 2 года лучше ЛММ-прогноза; при этом прогноз КРМ-2 позволяет сократить погрешность прогнозирования более чем вдвое по сравнению с погрешностью прогнозирования ЛММ;

– на временном интервале 2001–2018 прогноз КРМ-1 на 2 года несколько хуже (на 3,79 %) ЛММ-прогноза; при этом прогноз КРМ-2 позволяет сократить погрешность прогнозирования более чем вдвое по сравнению с погрешностью прогнозирования ЛММ.

### Обсуждение и заключение

Таким образом, краткосрочное прогнозирование ПРП Пермского края с использованием КРМ позволяет добиваться существенно лучшего качества по сравнению с классическими линейными моделями. С учетом логичности добавления авторегрессионных слагаемых в множественную линейную модель, естественности интерпретации коэффициентов при них, а также простоты процедуры оценки параметров КРМ существенно улучшение их прогностических свойств по сравнению с ЛММ. Можно с уверенностью заключить, что их использование для моделирования и прогнозирования ПРП имеет большой научный и прикладной потенциал.

### Литература

1. Ходиев, Д.А. Моделирование и прогнозирование привлечения инвестиций для освоения природно-ресурсного потенциала региона / Д.А. Ходиев, Ф.А. Хофизов // *Вестник Таджикского национального университета*. – 2018. – № 6. – С. 30–36.

2. *Investment risk and natural resource potential in “Belt & Road Initiative” countries: A multi-criteria decision-making approach* / J. Hussain, K. Zhou, S. Guo, A. Khan // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 723, 137981. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137981

3. *The politics of natural resource investments and rights in Africa: A theoretical approach* / L. Buur, R. Pedersen., M. Nystrand et al. // *The Extractive Industries and Society*. – 2020. – Vol. 7. – P. 918–930.

4. Красильников, П.А. Геоинформационное обеспечение экономической оценки природно-ресурсного потенциала территорий Пермского края / П.А. Красильников // *Экономика региона*. – 2009. – № 1. – С. 143–151.

5. Kumar, N. *Applications of Remote Sensing and GIS in Natural Resource Management* / N. Kumar, S.S. Yamac, A. Velmurugan // *Journal of the Andaman Science Association*. – 2015. – Vol. 20 (1). – P. 1–6.

6. *Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt* / S. Abuzied, M. Kaiser, E. Shendi, M. Abdel-Fattah // *Geothermics*. – 2020. – Vol. 88, 101893.

7. *GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China* / D. Zhang, X. Shi, H. Xu, Q. Jing // *Environmental Impact Assessment Review*. – 2020. – Vol. 83, 106397.

8. Горячев, А.А. Моделирование добычи в мировых и региональных оптимизационных газовых моделях / А.А. Горячев // *Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом*. – 2015. – № 6. – С. 51–58.

9. Кузнецов, Ю.А. Математическое моделирование оптимального использования невозобновимых природных ресурсов / Ю.А. Кузнецов, А.В. Семенов, М.Н. Власова // *Экономический анализ: теория и практика*. – 2012. – № 32. – С. 45–57.

10. *Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty* / M. Li, Q. Fu, P.V. Singh et al. // *Agricultural systems*. – 2020. – Vol. 178, 102685.

11. Biswas, M.H. *Mathematical Modeling Applied to Sustainable Management of Marine Resources* / M.H. Biswas, M.R. Hossain, M.K. Mondal // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 194. – P. 337–344.
12. Lata, K. *The influence of forestry resources on rainfall: A deterministic and stochastic model* / K. Lata, A.K. Misra // *Applied Mathematical Modelling*. – 2020. – Vol. 81. – P. 673–689.
13. Курьшев, Н. И. *Модель и способ оценки эколого-экономического состояния регионов* / Н.И. Курьшев // *Вестник кибернетики*. – 2005. – № 4. – С. 149–158.
14. Кудрявцева, О.В. *Математические модели анализа потребления природных ресурсов* / О.В. Кудрявцева // *Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика*. – 2007. – № 3. – С. 67–87.
15. Бурцев, С. В. *Экономико-математическая модель оценки эффективности мероприятий по восстановлению окружающей природной среды закрываемых угольных предприятий* / С.В. Бурцев // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2012. – № 1. – С. 357–359.
16. Потравный, И.М. *Модели истощения природных ресурсов и оценки прошлого ущерба от загрязнения окружающей среды* / И.М. Потравный, А.Л. Новоселова, Е.М. Алныкина // *Плехановский научный бюллетень*. – 2015. – № 2. – С. 53–78.
17. Соловьева, Н.В. *Комплексный подход к моделированию управления ресурсами и отходами в системе «природа – техносфера» с целью минимизации воздействия на окружающую среду* / Н.В. Соловьева, М.Ю. Худошина // *Безопасность жизнедеятельности*. – 2012. – № 2. – С. 33–40.
18. Бузина, Т.С. *Модели управления процессами аграрного производства в условиях неполной информации* / Т.С. Бузина, М.Н. Полковская // *Вестник ИРГСХА*. – 2016. – № 74. – С. 101–109.
19. Свентицкий, А.Г. *Эксергетическая модель рационального использования энергетических природных и техногенных ресурсов в агротехнологиях* / А.Г. Свентицкий, И.И. Свентицкий // *Вестник ВИЭСХ*. – 2016. – № 3. – С. 97–99.
20. Майорова, М.А. *Экономико-математические модели в управлении производственно - экономической деятельностью сельскохозяйственных предприятий* / М.А. Майорова // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2014. – № 4. – С. 109.
21. *Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China* / H. Wang, J. Huang, H. Zhou, C. Deng // *Journal of Environmental Management*. – 2020. – Vol. 262, 110331.
22. Сиротина, Н. А. *Оценка вклада горнодобывающей отрасли в природно-ресурсный потенциал региона* / Н.А. Сиротина, А.В. Копотева, А.В. Затонский // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2020. – № 8. – С. 163–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-163-178
23. Кремер, Н.Ш. *Эконометрика: учеб. для вузов* / Н.Ш. Кремер. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002. – 311 с.
24. Доугерти, К. *Введение в эконометрику: учеб.* / К. Доугерти. – 2-е изд. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 432 с.
25. Елисеева, И.И. *Эконометрика* / И.И. Елисеева, С.В. Курьшева – М.: Финансы и статистика, 2007. – 576 с.
26. Волков, Е.А. *Численные методы* / Е.А. Волков – М.: Лань, 2008. – 256 с.

**Сиротина Наталья Александровна**, старший преподаватель кафедры общенаучных дисциплин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; nsirotna117@mail.ru.

**Копотева Анна Владимировна**, канд. техн. наук, доцент кафедры общенаучных дисциплин, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; kopoteva\_av@mail.ru.

**Затонский Андрей Владимирович**, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Березниковский филиал, г. Березники; zhenon@narod.ru.

*Поступила в редакцию 30 марта 2021 г.*

## FINITE-DIFFERENCE MODELS APPLICATION FOR SHORT-TERM FORECASTING OF THE NATURAL RESOURCE POTENTIAL OF THE PERM REGION

*N.A. Sirotnina*, [nsirotnina117@mail.ru](mailto:nsirotnina117@mail.ru),  
*A.V. Kopoteva*, [kopoteva\\_av@mail.ru](mailto:kopoteva_av@mail.ru),  
*A.V. Zatonkiy*, [z xenon@narod.ru](mailto:z xenon@narod.ru)

*Perm National Research Polytechnic University, Berezniki Branch, Berezniki, Russian Federation*

The article is about a problem of mathematical modeling of the natural resource potential of the Perm Territory by 1st and 2nd order finite-difference models. Such models can obtain better forecasts of complex socio-economic processes in comparison with the traditionally used linear multiple regression models. A high quality model of the natural resource potential with forecast possibilities is one of the necessary conditions for the effective management of the natural resources of the region in order to ensure its sustainable economic development. **Purpose of work.** Aim of this work is work construction of finite-difference models of a natural resource potential complex indicators and an assessment of their prognostic properties. **Materials and methods.** Our research is based on Perm region statistical data for the period from 2001 to 2018. A multiple linear regression model is used as a comparison base. The natural resource potential complex indicator is calculated as a weighted sum of particular criteria characterizing the natural resources of the region. First and second order finite difference models are obtained by adding autoregressive terms of the first and second orders, respectively, to the multiple linear regression model. An estimation of the unknown parameters of the equations is carried out by a modified least squares method, which preserves the signs of the coefficients with the factors the same as in the original linear model. At the same time, the selection of explanatory factors and the assessment of the quality of the models are carried out based on the accuracy of the predicted values of the studied indicator. **The results of the study.** Components and factors of the natural resource potential is obtained, and a procedure for constructing finite-difference models is performed for three different time intervals: 2001–2018, 2001–2008, and 2008–2018. These intervals are chosen because changes in the methodology for generating statistical data nearly 2008. **Discussion and conclusions.** The number of calculated predicted values was 18, and only in 4 out of 18 cases (22,2%) their quality is worse than forecasts obtained by the linear multiple model. So proposed modification of the multiple linear regression model with the addition of autoregressive terms makes it possible to improve the forecasting quality of the complex indicator of the natural resource potential of the region and, therefore, to make more effective decisions when managing its level.

*Keywords:* mathematical modeling, forecasting, finite difference model, natural resource potential of the region, Perm region.

### References

1. Khodiyev D.A., Khofizov F.A. [Modeling and forecasting of investment attraction for the development of the natural resource potential of the region]. *Bulletin of the Tajik National University*, 2018, no. 6, pp. 30–36. (in Russ.)
2. Hussain J., Zhou K., Guo S., Khan A. Investment risk and natural resource potential in “Belt & Road Initiative” countries: A multi-criteria decision-making approach. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 723, 137981. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137981
3. Buur L., Pedersen R., Nystrand M., Macuane J., Jacob T. The politics of natural resource investments and rights in Africa: A theoretical. *The Extractive Industries and Society*, 2020, vol. 7, pp. 918–930.
4. Krasil'nikov P. A. [Geoinformation support for the economic assessment of the natural resource potential of the Perm Krai territories]. *Economy of the region*, 2009, no. 1, pp. 143–151. (in Russ.)

5. Kumar N., Yamas S.S., Velmurugan A. Applications of Remote Sensing and GIS in Natural Resource Management. *Journal of the Andaman Science Association*, 2015, vol. 20 (1), pp. 1–6.
6. Abuzied S., Kaiser M., Shendi E., Abdel-Fattah M. Multi-criteria decision support for geothermal resources exploration based on remote sensing, GIS and geophysical techniques along the Gulf of Suez coastal area, Egypt. *Geothermics*, 2020, vol. 88, 101893.
7. Zhang D., Shi X., Xu H., Jing Q. GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China. *Environmental Impact Assessment Review*, 2020, vol. 83, 106397.
8. Goryachev A.A. [Production modeling in global and regional gas optimization models]. *Problems of the economy and management of the oil and gas complex*, 2015, no. 6, pp. 51–58. (in Russ.)
9. Kuznetsov Yu.A., Semenov A.V., Vlasova M.N. [Mathematical modeling of optimal use of non-renewable natural resources]. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika* [Economic analysis: theory and practice], 2012, no. 32, pp. 45–57. (in Russ.)
10. Li M., Fu Q., Singh P.V., Liu D., Li T. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: A multi-objective non-linear optimization model under uncertainty. *Agricultural systems*, 2020, vol. 178, 102685.
11. Biswas M.H., Hossain M.R., Mondal M.K. Mathematical Modeling Applied to Sustainable Management of Marine Resources. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 194, pp. 337–344.
12. Lata K., Misra A.K. The influence of forestry resources on rainfall: A deterministic and stochastic model. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, vol. 81, pp. 673–689.
13. Kuryshv N.I. [Model and method for assessing the ecological and economic state of regions]. *Bulletin of Cybernetics*, 2005, no. 4, pp. 149–158. (in Russ.)
14. Kudryavtseva O.V. [Mathematical models for analyzing the consumption of natural resources]. *Bulletin of the Moscow University. Series 6: Economics*, 2007, no. 3, pp. 67–87. (in Russ.)
15. Burtsev S.V. [Economic and mathematical model for evaluating the effectiveness of measures to restore the natural environment of closed coal enterprises]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2012, no. 1, pp. 357–359. (in Russ.)
16. Potravnyy I.M., Novoselova A.L., Alnykina E.M. [Models of natural resource depletion and estimates of past pollution damage]. *Plekhanovskiy nauchnyy byulleten'* [Plekhanov Scientific Bulletin], 2015, no. 2, pp. 53–78. (in Russ.)
17. Solov'yeva N.V., Khudoshina M.Yu. [Integrated approach to resource and waste management modeling in the “nature-technosphere” system in order to minimize the impact on the environment]. *Life safety*, 2012, no. 2, pp. 33–40. (in Russ.)
18. Buzina T.S., Polkovskaya M.N. [Models of management of agricultural production processes in conditions of incomplete information]. *Bulletin of the IRGSHA*, 2016, no. 74, pp. 101–109. (in Russ.)
19. Sventitskiy A.G., Sventitskiy I.I. [Exergetic model of rational use of energy natural and man-made resources in agricultural technologies]. *Bulletin of RESEC*, 2016, no. 3, pp. 97–99. (in Russ.)
20. Mayorova M.A. [Economic and mathematical models in the management of production and economic activities of agricultural enterprises]. *Online journal of Science Studies*, 2014, no. 4, p. 109. (in Russ.)
21. Wang H., Huang J., Zhou H., Deng C. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China. *Journal of Environmental Management*, 2020, vol. 262, 110331.
22. Sirotnina, N.A., Kopoteva A.V., Zatonskiy A.V. [Assessment of the contribution of the mining industry to the natural resource potential of the region]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2020, no. 8, pp. 163–178. (in Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-163-178
23. Kremer N.Sh. *Ekonometrika: uchebnik dlya vuzov* [Econometrics: Textbook for universities]. Moscow, UNITY-DANA Publ., 2002. 311 p.

## Краткие сообщения

---

24. Dougerti K. *Vvedeniye v ekonometriku: uchebnik* [Introduction to Econometrics: Textbook]. 2nd ed. Moscow, INFRA-M Publ., 2007. 432 p.
25. Eliseyeva, I.I. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2007. 576 p.
26. Volkov E.A. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Lan' Publ., 2008. 256 p.

*Received 30 March 2021*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Сиротина, Н.А. Применение конечно-разностных моделей для краткосрочного прогнозирования природно-ресурсного потенциала Пермского края / Н.А. Сиротина, А.В. Копотева, А.В. Загонский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 154–166. DOI: 10.14529/ctcr210215

### FOR CITATION

Sirotina N.A., Kopoteva A.V., Zatonkiy A.V. Finite-Difference Models Application for Short-Term Forecasting of the Natural Resource Potential of the Perm Region. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 154–166. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210215

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ БАЗИС СТРАТЕГИЧЕСКОГО И ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОСТИ

**К.А. Коренная**

*АО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, Россия*

Проблемы стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями в современных условиях глобальной нестабильности не могут эффективно решаться, так же как и в недалеком прошлом. Необходимы новые подходы, методы и модели, которые бы учитывали сложности управления промышленными предприятиями в современных условиях ведения бизнеса. **Цель исследования.** Необходимо создание нового адаптивного подхода к стратегическому и оперативному управлению промышленными предприятиями, который бы позволил учесть ускоряющуюся динамику международных рынков, а также влияющих на предприятие факторов косвенного и прямого воздействия, которые главным образом и определяют его возможности к адаптации. **Материалы и методы.** Представлены основные положения концептуального базиса стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями, а также комплекс математических моделей для реализации этого процесса. **Результаты.** Сформулированные в статье материалы по подготовке и принятию управленческих решений позволяют собственникам и руководителям промышленных предприятий оценить все стороны этого процесса во взаимосвязи и сформировать, в сущности, новую парадигму функционирования промышленных предприятий в условиях военно-политической и социально-экономической нестабильности в мире, а также введения разнообразных санкций со стороны западных стран по отношению к российским промышленным предприятиям. При этом становится возможным осуществлять учет факторов прямого и косвенного воздействия на промышленные предприятия, которые в последние годы приобрели особо важное значение. **Заключение.** Представленный в данной статье подход к формированию концептуального базиса стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями является, в сущности, новым и актуальным, позволяющим акционерам компаний формировать перспективные стратегии развития промышленных предприятий во взаимосвязи с процедурами оперативного управления текущей деятельностью предприятий. Таким образом, подготовку и принятие решений по управлению промышленными предприятиями как на стратегическом, так и на оперативном уровне становится возможным осуществлять на основе целостного алгоритма, базирующегося на разработанном автором комплексе моделей и методов стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями.

*Ключевые слова: адаптивный подход, концепция, стратегическое и оперативное управление, математические модели.*

### Введение

Концептуальные основы стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями менялись на протяжении всего периода с тех пор, как производственные компании более или менее в сложившемся виде начали осуществлять свою деятельность. Рассматривая разнообразные научные школы и подходы к управлению предприятиями и организациями, можно заметить, что в прошлом вопросам стратегического управления промышленными предприятиями отводилась гораздо меньшая роль, чем вопросам управления оперативного. Со временем значимость стратегического управления постоянно возрастала и к настоящему времени формированию стратегии развития промышленных предприятий и корпораций отводится едва ли не большая роль, чем управлению оперативному.

Целью функционирования любого промышленного предприятия, осуществляющего выпуск продукции для продажи на рынках как внутреннего, так и международного масштаба, в сущности, является желание собственников этого предприятия получить наибольшую прибыль. Само собой разумеется, что получение такой прибыли может достигаться на протяжении относительно

небольших временных отрезков от нескольких месяцев до нескольких лет, без дополнительных вложений в развитие этого промышленного предприятия. В противном случае промышленное предприятие может потерять свою конкурентоспособность, так как продукция его конкурентов станет более ликвидной. Поэтому на сегодняшний день ни одно промышленное предприятие не может себе позволить пренебречь вопросами своего стратегического управления и обеспечения конкурентоспособности своей продукции на отечественном и мировом рынках. Таким образом, концептуальный базис стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями должен быть сформирован с учетом представленных соображений и включать в себя методологически целостный алгоритм подготовки и принятия управленческих решений, связанных как с формированием стратегии управления промышленным предприятием, так и оперативного управления его работой.

### **1. Основные положения по формированию стратегии и тактики управления промышленными предприятиями в условиях глобальной нестабильности**

Если еще в совсем недавнем прошлом управление промышленными предприятиями могло осуществляться на основе теоретических разработок конца XX – начала XI в., подробно описанных в научно-технической литературе [1–6, 11–13], то в связи с событиями недавнего времени – усиление военно-политической, социальной и экономической напряженности в мире, рост нестабильности, вызванной различного рода санкциями стран Запада по отношению к российским промышленным предприятиям и др. факторы, – на сегодняшний день для сохранения своей конкурентоспособности отечественным компаниям необходимы новые адекватные подходы, методы и математические модели стратегического и оперативного управления. Авторам данной статьи такие разработки удалось осуществить. Создан новый адаптивный подход к стратегическому и оперативному управлению промышленными предприятиями [8, 9, 14]. Сущность данного адаптивного подхода к стратегическому и оперативному управлению промышленными предприятиями состоит в том, что вся подготовка и принятие управленческих решений по формированию стратегии и тактики управления промышленными предприятиями основывается на учете динамично меняющихся ситуаций, факторов внешней среды, воздействующих на предприятия. При этом особое внимание уделяется факторам косвенного воздействия на промышленные предприятия, так как они в условиях глобальной нестабильности влияют на работу промышленных предприятий более значительно, чем внешние факторы прямого воздействия. При оперативном управлении промышленными предприятиями должна быть учтена также все более ускоряющаяся динамика положения дел на международных и внутренних рынках готовой продукции, что может быть сделано только с использованием разработанного авторами прогнозно-адаптивного подхода [10]. Подобный подход позволяет посредством получения краткосрочных (иногда даже ежедневных) прогнозов ситуаций на мировых рынках корректировать планы производства продукции предприятий, отвечающих запросам этих рынков.

Таким образом, современный подход к стратегическому развитию и оперативному управлению промышленными предприятиями должен обеспечивать взаимосвязь этих двух, иногда кажущихся на первый взгляд отличных друг от друга процессов. Тем не менее именно в процессе управления промышленными предприятиями создается прибыль и становится понятным, какие стратегические аспекты наиболее важны для компании в ее конкурентной борьбе на международных рынках как в ближайшем, так и в отдаленном будущем.

Поскольку промышленные предприятия должны совершенствовать свои производственные, управленческие, информационные и иные технологии, то средства на это не могут быть получены иначе как из тех доходов, которые промышленное предприятие достигает в процессе своей текущей производственной деятельности [15–17]. Капитальные вложения на эти технологии и планируемые эксплуатационные затраты на них не должны выходить за рамки тех возможностей, которые собственники промышленного предприятия могут выделить на эти цели из прибыли компании.

С другой стороны, промышленные предприятия обязаны совершенствовать имеющиеся у них технологии охраны и защиты окружающей среды, и эти средства также могут быть взяты только из прибыли, получаемой промышленным предприятием.

Поэтому в своих стратегических расчетах собственники и руководители промышленных предприятий должны четко определить, какие средства могут быть израсходованы на техниче-

ское перевооружение промышленного предприятия, а какие – на защиту окружающей среды от его выбросов. Это соотношение, в сущности, определяет основной стратегический императив каждого конкретного промышленного предприятия. При этом совершенствование технологий на промышленных предприятиях должно осуществляться более или менее комплексно. Если использовать для этой цели адаптивный подход, то управление развитием промышленных предприятий и корпораций должно учитывать, что все имеющиеся на предприятии технологии (производственные, информационные, экономические, управленческие и иные) не могут развиваться без какого-либо учета взаимосвязей между собой. Гипертрофированное развитие какой-либо одной из технологий на предприятии, несмотря на различные затраты, связанные с этим развитием, может не дать существенного экономического эффекта и даже в отдельных случаях может привести к отрицательному результату. Например, неразумно заниматься цифровизацией производств, в то время как логистика и экономика компании, а также система подготовки и принятия управленческих решений остаются на допотопном уровне. А поскольку при этом решаются, как правило, многокритериальные задачи, то тогда необходимо воспользоваться принципом Парето, согласно которому оптимизация по каждому следующему критерию не должна ухудшать состояние объекта (или компании), достигнутое при оптимизации по предшествующим критериям. Управление развитием технологий компании должно осуществляться абсолютно аналогично. В этом случае затраты, которые будут нести промышленные предприятия на развитие соответствующих технологий, будут давать более эффективные результаты и не заставят руководителей компаний сожалеть о том, что они, понеся серьезные затраты на развитие отдельных технологий, не получили желаемого выигрыша для компании в целом. Эти соображения также полностью соответствуют известному постулату о том, что глобальный оптимум системы не может быть равен сумме ее локальных оптимумов.

На основе представленного подхода сформирована методология стратегического и оперативного управления производственными компаниями, базирующаяся на комплексах соответствующих методов и математических моделях.

## **2. Сведения о комплексе математических моделей стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями**

К числу моделей в области стратегического управления промышленными предприятиями относятся [8, 9, 14]:

- интегральная оценка деятельности промышленного предприятия;
- управление материальными ресурсами промышленного предприятия при обеспечении его экономических и экологических приоритетов;
- оптимизация доставки грузов от производителей сырья;
- развитие промышленного предприятия на новых территориях;
- повышение эффективности управления человеческими ресурсами на предприятиях за счет совершенствования систем оплаты труда и стимулирования работников;
- формирование производственного плана промышленного предприятия по выпуску продукции;
- планирование профилактического обслуживания основных производственных фондов промышленного предприятия и др.

Процесс оперативного управления промышленным предприятием целесообразно осуществлять с использованием модели, разработанной в рамках прогнозно-адаптивного подхода [8, 9, 14]. Описание данной модели, адаптированной для предприятий по производству ферросплавов, приведено в [10].

Указанная адаптивная модель дополняется также математической моделью определения продажной (отпускной) цены продукции, гарантирующей безубыточность основного вида деятельности промышленного предприятия с заданной вероятностью [7].

### **Заключение**

Рассмотренный в данной статье подход к формированию концептуального базиса стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями дает возможность собственникам и руководителям этих предприятий представить процессы создания перспективных

стратегий их развития во взаимосвязи с решением задач в рамках текущей деятельности компаний.

Таким образом, подготовка и принятие решений по управлению промышленными предприятиями как на стратегическом, так и на оперативном уровне становится возможным осуществлять на основе целостного алгоритма, базирующегося на разработанном автором комплексе моделей и методов стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями.

### Литература

1. Аакер, Д. *Стратегическое рыночное управление: пер. с англ.* / Д. Аакер. – СПб.: Питер, 2002. – 544 с.
2. Акофф, Раассел Л. *Планирование будущего корпорации* / Раассел Л. Акофф. – М.: Сирин, 2002. – 256 с.
3. Бир, С. *Мозг фирмы: пер. с англ.* / С. Бир. – М.: Либроком, 2009. – 416 с.
4. *Стратегические приоритеты машиностроительного комплекса: инновационное развитие предприятий: моногр.* / М. А. Бражникова, Е.Г. Сафронов, М.А. Мельников, Ю.Г. Лебедева; под ред. М.А. Бражникова, Е.Г. Сафронова – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2015. – 212 с.
5. Брыкалов, С.М. *Стратегическое управление промышленными предприятиями атомной отрасли на основе многоуровневого подхода: моногр.* / С.М. Брыкалов, Ф.Ф. Юрлов. – М.: Ваши полиграфический партнер, 2014. – 293 с.
6. Ириков, В.А. *Стратегическое управление для инновационного предприятия: учеб. пособие* / В.А. Ириков. – М.: МФТИ, 2016. – 106 с.
7. Коренная, К.А. *Разработка модели реализации продукции промышленного предприятия, обеспечивающей безубыточность* / К.А. Коренная // *Экономика и менеджмент систем управления.* – 2015. – № 2 (16). – С. 40–46.
8. Логиновский, О.В. *Управление промышленными предприятиями: стратегии, механизмы, системы: моногр.* / О.В. Логиновский, А.А. Максимов, В.Н. Бурков и др.]; под ред. О.В. Логиновского, А.А. Максимова. – М.: Инфра-М, 2018. – 410 с.
9. *Эффективное управление организационными и производственными структурами* / О.В. Логиновский, А.В. Голлай, О.И. Дранко и др.; под ред. О.В. Логиновского. – М.: Инфра-М, 2020. – 456 с.
10. Максимов, А.А. *Адаптивное управление промышленной корпорацией в условиях неопределенности (на примере ферросплавных производств)* / А.А. Максимов, К.А. Коренная, О.В. Логиновский // *Проблемы теории и практики управления.* – 2012. – № 9–10. – С. 145–150.
11. *The mechanisms of smart management for industrial enterprises* / V.N. Burkov, O.V. Loginovskiy, O.I. Dranko, A.V. Hollay // *Applied mathematics and management issues.* – 2020. – No. 1. – P. 59–73.
12. *Introduction to theory of control in organizations* / V. Burkov, M. Goubko, N. Korgin, D. Novikov. – Boca Raton: CRC Press, 2015. – 346 p.
13. *Burkov, V.N. Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems* / V.N. Burkov, D.A. Novikov, A.V. Shchepkin. – Berlin: Springer, 2015. – 174 p.
14. *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations* / K.A. Korennaya, O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.V. Zimin; ed. A.L. Shestakov. – Kostanay: KSU, 2014. 230 p.
15. *Loginovskiy, O.V. Supercomputing technologies as drive for development of enterprise information systems and digital economy* / O.V. Loginovskiy, A.L. Shestakov, A.A. Shinkarev // *Supercomputing Frontiers and Innovations.* – 2020. – No. 7 (1). – P. 55–70.
16. *Loginovskiy, O.V. Mathematical models for decision-making on strategic management of industrial enterprise in conditions of instability* / O.V. Loginovskiy, O.I. Dranko, A.V. Hollay // *CEUR Workshop Proceedings (Leipzig).* – 2018. – P. 1–12.
17. *Modern Information Technologies and the Need for Improving the Quality of Organizational and Corporate Structures' Management* / A.L. Shestakov, O.V. Loginovskiy, A.A. Maksimov, A.V. Hollay // *Proceedings – 2020 Global Smart Industry Conference, GloSIC-2020.* – 2020. – P. 127–131.

Коренная Кристина Александровна, канд. техн. наук, генеральный директор, АО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк; kkris221@mail.ru.

Поступила в редакцию 18 апреля 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210216

## THE CONCEPTUAL BASIS OF STRATEGIC AND OPERATIONAL MANAGEMENT OF INDUSTRIAL ENTERPRISES IN CONDITIONS OF INSTABILITY

K.A. Korennaya, kkris221@mail.ru

JSC “Kuznetsk Ferroalloys”, Novokuznetsk, Russian Federation

The problems of strategic and operational management of industrial enterprises in modern conditions of global instability cannot be effectively solved, as in the recent past. New approaches, methods and models are needed that would take into account the complexities of managing industrial enterprises in modern business conditions. **Purpose of the study.** It is necessary to create a new adaptive approach to the strategic and operational management of industrial enterprises, which would take into account the accelerating dynamics of international markets, as well as the factors of indirect and direct impact on the enterprise, which mainly determine its adaptability. **Materials and methods.** The main provisions of the conceptual basis of strategic and operational management of industrial enterprises, as well as a set of mathematical models for the implementation of this process are presented. **Results.** The materials formulated in the article on the preparation and adoption of managerial decisions allow the owners and managers of industrial enterprises to assess all aspects of this process in interrelation and form, in essence, a new paradigm for the functioning of industrial enterprises in conditions of military-political and socio-economic instability in the world, as well as the introduction various sanctions on the part of Western countries in relation to Russian industrial enterprises. At the same time, it becomes possible to take into account the factors of direct and indirect impact on industrial enterprises, which have become especially important in recent years. **Conclusion.** The approach presented in this article to the formation of the conceptual basis of strategic and operational management of industrial enterprises is, in essence, new and relevant, allowing company shareholders to form promising strategies for the development of industrial enterprises in conjunction with the procedures for operational management of the current activities of enterprises. Thus, the preparation and adoption of decisions on the management of industrial enterprises, both at the strategic and operational levels, becomes possible to carry out on the basis of a holistic algorithm based on the complex of models and methods of strategic and operational management of industrial enterprises developed by the author.

*Keywords: adaptive approach, concept, strategic and operational management, mathematical models.*

### References

1. Aaker D. *Strategicheskoye rynochnoye upravleniye* [Strategic Market Management]. St. Petersburg, Peter Publ., 2002. 544 p.
2. Ackoff Russell L. *Planirovaniye budushchego korporatsii* [Planning the Future of the Corporation]. Moscow, Sirin Publ., 2002. 256 p.
3. Beer S. *Mozg firmy* [Brain of the Firm]. Moscow, Librokom Publ., 2009. 416 p.
4. Brazhnikov M.A., Safronov E.G., Melnikov M.A., Lebedev Yu.G. *Strategicheskkiye priority mashinostroitel'nogo kompleksa: innovatsionnoye razvitiye predpriyatiy* [Strategic Priorities of the Machine-Building Complex: Innovative Development of Enterprises]. Moscow, Publishing and Trade Corporation “Dashkov and K”, 2015. 212 p.

## Краткие сообщения

---

5. Brykalov S.M., Yurlov F.F. *Strategicheskoye upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami atomnoy otrasli na osnove mnogourovnevnogo podkhoda* [Strategic management of industrial enterprises of the nuclear industry on the basis of a multilevel approach]. Moscow, Your polygraphic partner, 2014. 293 p.

6. Irikov V.A. *Strategicheskoye upravleniye dlya innovatsionnogo predpriyatiya* [Strategic Management for an Innovative Enterprise]. Moscow, MFTI, 2016. 106 p.

7. Korennaya K.A. [Development of a Model for the Sale of Products of an Industrial Enterprise, Providing Break-Even]. *Economics and management of control systems*, 2015, no. 2 (16), pp. 40–46. (in Russ.)

8. Loginovsky O.V., Maksimov A.A., Burkov V.N., Burkova I.V., Gelrud Ya.D., Korennaya K.A., Shestakov A.L. *Upravleniye promyshlennymi predpriyatiyami: strategii, mekhanizmy, sistemy: monografiya* [Management of Industrial Enterprises: Strategies, Mechanisms, Systems]. Moscow, Infra-M Publ., 2018. 410 p.

9. Loginovsky O.V., Hollay A.V., Dranko O.I., Shestakov A.L., ShinKarev A.A. *Effektivnoye upravleniye organizatsionnymi i proizvodstvennymi strukturami* [Effective Management of Organizational and Production Structures]. Moscow, Infra-M Publ., 2020. 456 p.

10. Maksimov A.A., Korennaya K.A., Loginovskiy O.V. [Adaptive Management of an Industrial Corporation in Conditions of Uncertainty (on the Example of Ferroalloy Production)]. *Problems of Management Theory and Practice*, 2012, no. 9–10, pp. 145–150. (in Russ.)

11. Burkov V.N., Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. [The Mechanisms of Smart Management for Industrial Enterprises]. *Applied Mathematics and Management Issues*, 2020, no. 1, pp. 59–73.

12. Burkov V., Goubko M., Korgin N., Novikov D. *Introduction to Theory of Control in Organizations*. Boca Raton, CRC Press, 2015. 346 p.

13. Burkov V.N., Novikov D.A., Shchepkin A.V. *Control Mechanisms for Ecological-Economic Systems*. Berlin, Springer, 2015. 174 p.

14. Korennaya K.A., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Zimin A.V. *Global Economic Instability and Management of Industrial Organisations*. Kostanay, KSU, 2014. 230 p.

15. Loginovskiy O.V., Shestakov A.L., Shinkarev A.A. *Supercomputing Technologies as Drive for Development of Enterprise Information Systems and Digital Economy*. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2020, no. 7 (1), pp. 55–70.

16. Loginovskiy O.V., Dranko O.I., Hollay A.V. *Mathematical models for decision-making on strategic management of industrial enterprise in conditions of instability*. *CEUR Workshop Proceedings (Leipzig)*, 2018, pp. 1–12.

17. Shestakov A.L., Loginovskiy O.V., Maksimov A.A., Hollay A.V. *Modern Information Technologies and the Need for Improving the Quality of Organizational and Corporate Structures' Management*. *Proceedings – 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC-2020)*, 2020, pp. 127–131.

*Received 18 April 2021*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Коренная, К.А. Концептуальный базис стратегического и оперативного управления промышленными предприятиями в условиях нестабильности / К.А. Коренная // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 167–172. DOI: 10.14529/ctcr210216

### FOR CITATION

Korennaya K.A. The conceptual basis of strategic and operational management of industrial enterprises in conditions of instability. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 167–172. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210216

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

1. **Тематика.** В журнале публикуются статьи по следующим научным направлениям: управление в различных отраслях техники, а также в административной, коммерческой и финансовой сферах; математическое, алгоритмическое, программное и аппаратное обеспечение компьютерных технологий, в том числе компьютерных комплексов, систем и сетей; измерительные системы, приборостроение, радиоэлектроника и связь.

2. **Структура статьи.** Статья содержит УДК, название (не более 12–15 слов), список авторов, аннотацию (200–250 слов), список ключевых слов, введение, основной текст (структурированный по разделам), заключение (обсуждение результатов), литературу (в порядке цитирования, по ГОСТ 7.1–2003). В конце статьи следуют элементы на английском языке: название, аннотация, список ключевых слов, литература (references). Бумажная версия статьи подписывается всеми авторами.

3. **Параметры набора.** Размеры полей: левое – 3 см, правое – 3 см, верхнее и нижнее – по 3 см. Текст статьи набирать шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Выравнивание абзацев – по ширине. Отступ первой строки абзаца – 0,7 см. Междустрочный интервал – полуторный. Включить режим автоматического переноса слов. Все кавычки должны быть угловыми («»). Все символы «тире» должны быть среднего размера («–»), а не «-»). Ключевые элементы статьи – шапка, заголовки разделов – следует выделять полужирным. Знак деления целой и десятичной части числа – запятая. Между числом и единицей измерения должен стоять неразрывный пробел (Ctrl + Shift + Пробел).

4. **Формулы.** Набираются в редакторе формул MathType либо Microsoft Equation с отступом 0,7 см от левого края. Размер обычных символов – 11 пт, размеры индексов первого порядка – 71 %, индексов второго порядка – 58 %. Номер формулы размещается за пределами формулы, непосредственно после нее, в круглых скобках.

5. **Рисунки и таблицы.** Рисунки имеют разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруются и имеют названия (Рис. 1. Здесь следует название рисунка). Таблицы нумеруются и имеют названия (Таблица 1. Здесь следует название таблицы).

6. **Адрес редакционной коллегии.** 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, корп. 3б, 4-й этаж – Высшая школа электроники и компьютерных наук, отв. секретарю д.т.н., доц. Голлаю А.В. Адрес электронной почты ответственного секретаря журнала: gollaiav@susu.ru.

7. **Подробные требования к оформлению.** Полную версию требований к оформлению статей и пример оформления можно загрузить с сайта журнала <http://vestnik.susu.ru/ctcr>.

8. Плата за публикацию рукописей не взимается.

## СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Журнал «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника» основан в 2001 году.

Учредитель – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)».

Главный редактор – д.т.н., проф. Шестаков Александр Леонидович.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-57366 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по следующим научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям) (технические науки); 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки); 05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах (технические науки).

Подписной индекс 29008 в объединенном каталоге «Пресса России».

Периодичность выхода – 4 номера в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ВЕСТНИК  
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА  
Серия  
«КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
УПРАВЛЕНИЕ, РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»  
2021. Том 21, № 2

16+

Редактор *С.И. Уварова*  
Компьютерная верстка *С.В. Буновой*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 30.04.2021. Дата выхода в свет 11.05.2021. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 20,46. Тираж 500 экз. Заказ 102/177. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.