

ISSN 2078-9181

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
Отделение нанотехнологий и информационных технологий

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН

# ТРУДЫ СПИИРАН

[proceedings.spiiras.nw.ru](http://proceedings.spiiras.nw.ru)



ВЫПУСК 1(44)



Санкт-Петербург  
2016

18+

# Труды СПИИРАН

Выпуск № 1(44), 2016

Научный, научно-образовательный, междисциплинарный журнал с базовой специализацией в области информатики, автоматизации и прикладной математики

Журнал основан в 2002 году

## Учредитель и издатель

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук  
(СПИИРАН)

## Главный редактор

Р.М. Юсупов, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С-Петербург, РФ

## Редакционная коллегия

**А.А. Ашимов**, академик национальной академии наук Республики Казахстан д-р техн. наук, проф., Алматы, Казахстан

**С.Н. Баранов**, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Н.П. Веселкин**, академик РАН, д-р мед. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.И. Городецкий**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**О.Ю. Гусихин**, Ph.D., Диаборн, США

**В. Делич**, д-р техн. наук, проф., Нови-Сад, Сербия

**А.Б. Долгий**, Dr. Habil., проф., Сент-Этьен, Франция

**М. Железны**, Ph.D., доцент, Пльзень, Чешская республика

**Д.А. Иванов**, д-р экон. наук, проф., Берлин, Германия

**И.А. Каляев**, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, Таганрог, РФ

**Г.А. Леонов**, член-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**К.П. Марков**, Ph.D., доцент, Аизу, Япония

**Ю.А. Меркурьев**, академик Латвийской академии наук, Dr. Habil., проф., Рига, Латвия

**Р.В. Мещеряков**, д-р техн. наук, профессор, Томск, РФ

**Н.А. Молдовян**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.Е. Павловский**, д-р физ.-мат. наук, профессор, Москва, РФ

**А.А. Петровский**, д-р техн. наук, проф., Минск, Беларусь

**В.А. Путилов**, д-р техн. наук, проф., Апатиты, РФ

**В.Х. Пшихопов**, д-р техн. наук, профессор, Таганрог, РФ

**А.Л. Ронжин** (зам. главного редактора), д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**А.И. Рудской**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В. Сгурев**, академик Болгарской академии наук, д-р техн. наук, проф., София, Болгария

**В.А. Скормин**, Ph.D., проф., Бингемптон, США

**А.В. Смирнов**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Б.Я. Советов**, академик РАО, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**В.А. Сойфер**, член-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Самара, РФ

**Б.В. Соколов**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Л.В. Уткин**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**А.Л. Фрадков**, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Н.В. Хованов**, д-р физ.-мат. наук, проф., С.-Петербург, РФ

**Л.Б. Шереметов**, д-р техн. наук, Мехико, Мексика

**А.В. Язенин**, д-р техн. наук, профессор, Тверь, РФ

## Адрес редакции

191718, Санкт-Петербург, 14-я линия, д. 39,

e-mail: [publ@iias.spb.su](mailto:publ@iias.spb.su), сайт: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

Подписано к печати 15.02.2016. Формат 60х90 1/16. Усл. печ. л. 14,0. Заказ № 58. Тираж 150 экз., цена свободная  
Отпечатано в Редакционно-издательском центре ГУАП, 190000, Санкт-Петербург, Б. Морская, д. 67

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций,  
свидетельство ПИ № ФС77-41695 от 19 августа 2010 г.  
Подписной индекс 29393 по каталогу «Почта России»

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук»

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, 2015

Разрешается воспроизведение в прессе, а также сообщение в эфир или по кабелю опубликованных в составе печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН» статей по текущим экономическим, политическим, социальным и религиозным вопросам с обязательным указанием имени автора статьи и печатного периодического издания-журнала «Труды СПИИРАН»

# SPIIRAS Proceedings

Issue № 1(44), 2016

Scientific, educational, and interdisciplinary journal primarily specialized  
in computer science, automation, and applied mathematics

Trudy SPIIRAN ♦ Founded in 2002 ♦ Труды СПИИРАН

---

## Founder and Publisher

Federal State Budget Institution of Science

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences  
(SPIIRAS)

---

## Editor-in-Chief

R.M. Yusupov, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia

---

## Editorial Board Members

**A.A. Ashimov**, Prof., Dr. Sci., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan  
**S.N. Baranov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**N.P. Veselkin**, Prof., Dr. Sci., Academician of RAS, St. Petersburg, Russia  
**V.I. Gorodetski**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**O.Yu. Gusikhin**, Ph. D., Dearborn, USA  
**V. Delic**, Prof., Dr. Sci., Novi Sad, Serbia  
**A. Dolgui**, Prof., Dr. Habil., St. Etienne, France  
**M. Zelezny**, Assoc. Prof., Ph.D., Plzen, Czech Republic  
**I.A. Kalyaev**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, Taganrog, Russia  
**D.A. Ivanov**, Prof., Dr. Habil., Berlin, Germany  
**G.A. Leonov**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia  
**K.P. Markov**, Assoc. Prof., Ph.D., Aizu, Japan  
**Yu.A. Merkuriev**, Prof., Dr. Habil., Academician of the Latvian Academy of Sciences, Riga, Latvia  
**R.V. Meshcheryakov**, Prof., Dr. Sci., Tomsk, Russia  
**N.A. Moldovian**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**V.E. Pavlovskiy**, Prof., Dr. Sci., Moscow, Russia  
**A.A. Petrovsky**, Prof., Dr. Sci., Minsk, Belarus

**V.A. Putilov**, Prof., Dr. Sci., Apatity, Russia  
**V.K. Pshikhopov**, Prof., Dr. Sci., Taganrog, Russia  
**A.L. Ronzhin** (Deputy Editor-in-Chief), Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**A.I. Rudskoi**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, St. Petersburg, Russia  
**V. Sgurev**, Prof., Dr. Sci., Academician of the Bulgarian academy of sciences, Sofia, Bulgaria  
**V. Skormin**, Prof., Ph.D., Binghamton, USA  
**A.V. Smirnov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**B.Ya. Sovetov**, Prof., Dr. Sci., Academician of RAE, St. Petersburg, Russia  
**V.A. Soyfer**, Prof., Dr. Sci., Corr. Member of RAS, Samara, Russia  
**B.V. Sokolov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**L.V. Utkin**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**A.L. Fradkov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**N.V. Hovanov**, Prof., Dr. Sci., St. Petersburg, Russia  
**L.B. Sheremetov**, Assoc. Prof., Dr. Sci., Mexico, Mexico  
**A.V. Yazenin**, Prof., Dr. Sci. Tver, Russia

---

## Editorial Board's address

14-th line VO, 39, SPIIRAS, St. Petersburg, 199178, Russia,

e-mail: [publ@iias.spb.su](mailto:publ@iias.spb.su), web: <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru/>

---

Signed to print 15.02.2016

Printed in Publishing center GUAP, 67, B. Morskaya, St. Petersburg, 190000, Russia

---

The journal is registered in Russian Federal Agency for Communications and Mass-Media Supervision, certificate ПИ № ФС77-41695 dated August 19, 2010 r.

Subscription Index 29393, Russian Post Catalog

© Federal State Budget Institution of Science

St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, 2015

## СОДЕРЖАНИЕ

### ***Алгоритмы и программные средства***

Хомоненко А.Д., Логашев С.В., Краснов С.А. АВТОМАТИЧЕСКАЯ РУБРИКАЦИЯ ДОКУМЕНТОВ С ПОМОЩЬЮ ЛАТЕНТНО-СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И АЛГОРИТМА НЕЧЁТКОГО ВЫВОДА МАМДАНИ Титов А.И.	5
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ АППРОКСИМАЦИИ ПРИ ОЦЕНКЕ ТРУДОЕМКОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ Пустовалова Н.В., Авдеенко Т.В.	20
ПОСТРОЕНИЕ СОГЛАСОВАННОЙ МОДЕЛИ ТРЕБОВАНИЙ ДЛЯ ПРОЦЕССА ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ	31

### ***Информационная безопасность***

Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Закиева Е.Ш., Журавлева Н.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ Гнидко К.О.	50
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО ПОВЕДЕНИЯ В Р-АДИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	65

### ***Методы управления и обработки информации***

Волков В.Ф., Ковалев А.П., Потрясаев С.А., Салухов В.И. АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ Иванько Д.В., Карпов А.А.	83
АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КАМЕР ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ Дроздов В.Н., Абдуллин А.А.	98
ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С НУЛЯМИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ Доронина Ю.В., Рябовая В.О.	114
МЕТОД МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ Солдатенко С.А., Юсупов Р.М.	133
О ВЫБОРЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	153

### ***Теоретическая и прикладная математика***

Котов Ю.А. ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ БУКВЕННЫХ БИГРАММ В РУССКОЯЗЫЧНОМ ТЕКСТЕ Микони С.В.	181
АКСИОМАТИКА МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА КОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВ	198

## CONTENTS

### ***Algorithms and Software***

Khomonenko A.D., Logashev S.V., Krasnov S.A.  
AUTOMATIC CATEGORIZATION OF DOCUMENTS USING LATENT SEMANTIC ANALYSIS  
AND FUZZY INFERENCE ALGORITHM OF MAMDANI 5

Titov A.I.  
SOFTWARE DEVELOPMENT EFFORT ESTIMATION USING A NEURO NETWORK  
APPROXIMATION APPROACH 20

Pustovalova N.V., Avdeenko T.V.  
BUILDING A HARMONIZED MODEL OF REQUIREMENTS FOR SOFTWARE  
DEVELOPMENT PROCESS 31

### ***Information Security***

Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Zhuravleva N.A.  
MODELING OF PROCESSES OF FORMATION AND MANAGEMENT OF SOCIAL TENSION  
Gnidko K.O. 50

MODELING OF INDIVIDUAL AND GROUP BEHAVIOR IN P-ADIC COORDINATE SYSTEMS  
IN ORDER TO SOLVE INFORMATION SECURITY PROBLEMS 65

### ***Methods of Information Processing and Management***

Volkov V.F., Kovalev A.P., Potryasaev S.A., Salukhov V.I.  
ALGORITHM OF SOURCES MANAGEMENT IN DEPLOYING OF INFORMATION SUPPORT  
SYSTEMS FOR COMPLICATED TECHNICAL COMPLEXES 83

Ivanko D.V., Karpov A.A.  
AN ANALYSIS OF PERSPECTIVES FOR USING HIGH-SPEED CAMERAS IN PROCESSING  
DYNAMIC VIDEO INFORMATION 98

Drozдов V.N., Abdullin A.A.  
CONTROL PROBLEMS OF OBJECTS WITH ZEROS OF THE TRANSFER FUNCTION 114

Doronina J.V., Ryabovaya V.O.  
METHOD FOR MODERNIZING INFORMATION SYSTEMS FOR ENVIRONMENTAL  
MONITORING BASED ON THEIR FUNCTIONALITY 133

Soldatenko S.A., Yusupov R.M.  
TOWARD THE SELECTION OF CONTROL PARAMETERS IN MODELS OF THE PURPOSEFUL  
WEATHER AND CLIMATE MODIFICATION 153

### ***Theoretical and Applied Mathematics***

Kotov Yu.A.  
DETERMINATE IDENTIFICATION OF RUSSIAN TEXT LETTER BIGRAMS 181

Mikoni S.V.  
AXIOMS OF MULTICRITERIA OPTIMIZATION METHODS ON A FINITE SET OF  
ALTERNATIVES 198

А.Д. ХОМОНЕНКО, С.В. ЛОГАСHEV, С.А. КРАСНОВ  
**АВТОМАТИЧЕСКАЯ РУБРИКАЦИЯ ДОКУМЕНТОВ С  
ПОМОЩЬЮ ЛАТЕНТНО-СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И  
АЛГОРИТМА НЕЧЁТКОГО ВЫВОДА МАМДАНИ**

---

*Хомоненко А.Д., Логашев С.В., Краснов С.А. Автоматическая рубрикация документов с помощью латентно-семантического анализа и алгоритма нечёткого вывода Мамдани.*

**Аннотация.** Предлагается подход к автоматической рубрикации текстовых документов на основе совместного применения метода латентно-семантического анализа (ЛСА) и алгоритма нечёткого вывода Мамдани. Метод ЛСА используется для смыслового анализа информации в системах электронного документооборота путем выявления семантических зависимостей между терминами документов и получения коэффициента соответствия сравниваемых векторов.

Предлагается база правил для алгоритма нечёткого вывода Мамдани, реализующего автоматическую рубрикацию документов по множеству заданных тематик с возможностью автоматизированного контроля за распределением документов не соответствующим заданным тематикам или имеющим сходство сразу по нескольким тематическим категориям на основе результатов латентно-семантического анализа.

**Ключевые слова:** рубрикация документов, нечеткий вывод, латентно-семантический анализ, база правил, алгоритм нечёткого вывода Мамдани.

*Khomonenko A.D. Logashev S.V., Krasnov S.A. Automatic Categorization of Documents Using Latent Semantic Analysis and Fuzzy Inference Algorithm of Mamdani.*

**Abstract.** We propose an approach to the automatic categorization of text documents based on the joint application of the method of latent semantic analysis (LSA) and fuzzy inference Mamdani algorithm. Method LSA is used for the semantic analysis of information in electronic document management systems by identifying semantic relationships between terms of documents and receipt of the compliance rate of the compared vectors. The rule base is proposed for fuzzy inference algorithm of Mamdani implementing the automatic rubrication of documents for a variety of given topics enabling automated monitoring of the distribution of documents not relevant to the specified topics, or having similarities in several thematic categories on the basis of the results of latent semantic analysis.

**Keywords:** rubrication of documents; fuzzy inference; latent semantic analysis; the rule base; a fuzzy inference Mamdani algorithm.

---

**1. Введение.** Целью работы является выработка подхода к решению задачи автоматической рубрикации документов по заданным тематическим рубрикам [1, 2]. Для этого предлагается использовать совместно метод латентно-семантического анализа и алгоритм нечёткого вывода Мамдани, что определяет новизну предлагаемого подхода.

Для решения задачи автоматической рубрикации документов используются методы семантического анализа и автоматического разделения поступающей информации по заданным рубрикам.

В последние годы в задачах автоматической рубрикации, все больше внимания привлекают современные подходы к семантическому анализу, обеспечивающие лучшее качество [3–6].

Выявление семантической структуры при помощи латентно-семантического анализа выполняется алгоритмически и не требует ручного составления словарей. Однако результатом применения метода ЛСА является численное значение вероятности совпадения сравниваемых документов, что не позволяет полностью автоматически рубрицировать документ. В частности, широко используемые классические методы (основанные на базах знаний или машинном обучении) позволяют рубрицировать текстовые документы с рядом ошибок.

Для повышения точности решения рассматриваемой задачи, предлагается использовать методы и алгоритмы нечеткого вывода, т.к. в решении задачи автоматической рубрикации документов имеется нечеткость значений анализируемых параметров.

В основе реализации методов нечеткого вывода лежит теория нечетких множеств и основанная на ней нечеткая логика. В статье предлагается модель рубрикации документов, основанная на алгоритме нечеткого вывода. Для реализации построенной модели использовалась среда MATLAB и специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox [7]. Широкая область использования и корректность результатов позволяют применить математический аппарат нечеткого вывода при моделировании сложных процессов в области автоматической рубрикации [8, 9].

Применение метода нечёткого вывода позволяет создать метод автоматической рубрикации документов с возможностью автоматизированного принятия решения по полисемантическим документам и повысить уровень автоматизации процесса рубрикации документов.

**2. Применение метода ЛСА для установления степени близости документов.** Метод латентно-семантического анализа позволяет автоматически проанализировать содержимое текстовой информации, содержащейся в документах, и выявлять скрытые семантические (смысловые) связи между документами [10].

Исходной информацией для ЛСА является матрица  $A$  терм-документ, которая описывает используемый для обучения системы набор документов. Элементы этой матрицы содержат частоты использования каждого термина в каждом документе [5, 6].

Следующим шагом является разложение полученной матрицы терм-документ. Согласно теореме о сингулярном разложении, любая вещественная прямоугольная матрица  $A$  может быть разложена в произведение трёх матриц [11, 12, 13]:

$$A = VWU^T \quad (1)$$

На последнем этапе необходимо рассчитать степень соответствия векторов (документов), обычно для этого используется математическая операция скалярного произведения векторов.

В качестве примера рассмотрим обучающую выборку документов  $D$ , которая автоматически разделена методом ЛСА [5, 14] на две различные группы документов da1-da5 и db1-db3 (таблицы 1 и 2).

В группе da1-da5 речь идёт об указах председателя Правительства Российской Федерации. В группе db1-db3 речь идёт о федеральных законах. Документ db4 — исходный документ для проведения рубрицирования.

Таблица 1. Состав документов группы a

Группа a:	
1.	<i>Указ Председателя правительства Российской Федерации от 26 августа 2010 г. N 1110 г. Москва "Об установлении ежемесячной надбавки за важность выполняемых задач специалистам физической подготовки"</i>
2.	<i>Указ Председателя правительства Российской Федерации от 30 сентября 2010 г. N 1280 г. Москва "О предоставлении госслужащим жилых помещений по договору социального найма и служебных помещений"</i>
3.	<i>Указ Председателя правительства от 26 августа 2010 г. N 1115 г. Москва "Об установлении ежемесячной надбавки госслужащим, проходящим военную службу по контракту, за квалификационный уровень физической подготовленности."</i>
4.	<i>Указ Председателя правительства Российской Федерации от 24 апреля 2010 г. N 100 г. Москва "Об утверждении Инструкции об условиях и порядке приема в учреждения высшего профессионального образования"</i>
5.	<i>Указ Председателя правительства Российской Федерации от 29 марта 2010 г. N 299 г. Москва «О Порядке проведения в Правительстве Российской Федерации под руководством председателя антикоррупционной экспертизы нормативных правовых актов».</i>

Таблица 2. Состав документов группы b

Группа b:	
1.	<i>Дмитрий Медведев подписал Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «О федеральном бюджете на 2010 год и на плановый период».</i>
2.	<i>Президент подписал Федеральный конституционный закон «О внесении изменений в Федеральный конституционный закон «О Конституционном Суде Российской Федерации».</i>
3.	<i>Дмитрий Медведев подписал Федеральный закон «О внесении изменений в статьи 14 и 15 Федерального закона «О политических партиях».</i>
4.	<i>Дмитрий Медведев подписал распоряжение о проведении Международного общественного форума «Роль народной дипломатии в развитии международного гуманитарного физического сотрудничества, и права военнослужащих».</i>

Результаты распределения групп документов представлены в таблице 3. Для оценки соответствия документов группам рассмотрим максимальные полученные значения элементов матриц полученных с помощью скалярного произведения векторов, далее по тексту косинусоидальная мера близости [5], которая позволяет получить коэффициент сходства между различными векторами (рисунок 1).

Таблица 3. Значения аппроксимирующей матрицы X

	a1	a2	a3	a4	a5	b1	b2	b3	b4
a1		6.665	9.276	6.623	11.315	0.748	1.078	1.363	1.152
a2			7.943	5.697	9.728	0.359	0.642	0.908	0.926
a3				7.864	13.448	1.536	1.929	2.219	1.515
a4					9.731	-0.393	-0.110	0.212	0.756
a5						-0.348	0.135	0.660	1.362
b1							16.662	15.406	3.746
b2								15.443	3.710
b3									3.551
b4									

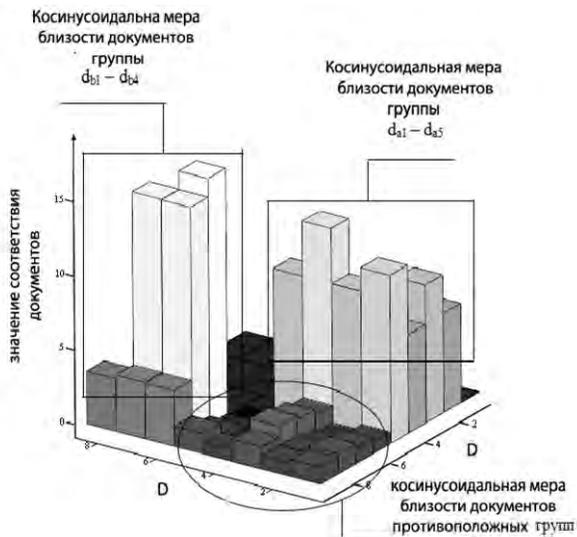


Рис. 1. Гистограмма значений аппроксимирующей матрицы X

Результатом применения метода ЛСА при сравнении документа b4 с остальными документами выборки является таблица значений. Она содержит значения входных переменных для алгоритма Мамдани (таблица 4).

Таблица 4. Исходные данные для нечёткого вывода

Название функции	Значение функции
b4-a1	1.152
b4-a2	0.926
b4-a3	1.515
b4-a4	0.756
b4-a5	1.362
b4-b1	3.746
b4-b2	3,710
b4-b3	3.551

Рассмотрим решение задачи автоматической рубрикации по результатам, полученным методом ЛСА, с помощью алгоритма нечеткого вывода Мамдани. С этой целью, прежде всего, сформируем соответствующую базу правил.

**3. База правил для рубрикации документов с помощью алгоритма Мамдани.** Рубрикация рассматриваемого текста проводится по значениям столбца аппроксимирующей матрицы  $X$ . В качестве текущего рубрицируемого документа возьмём документ  $b_4$ . Введём 8 нечетких лингвистических переменных  $V_4$ -A1,  $V_4$ -A2,  $V_4$ -A3,  $V_4$ -A4,  $V_4$ -A5,  $V_4$ -B1,  $V_4$ -B2,  $V_4$ -B3. Каждая переменная получает соответствующее значение из матрицы  $X$ . Результат работы — значения лингвистических переменных, формируемых на основании уровня соответствия текущего документа к группам  $A$  и  $B$ .

Лингвистическая переменная определяется как кортеж:

$\langle ?, T, X, G, M \rangle$ , где:

? — наименование или название лингвистической переменной;

$T$  — базовое терм-множество лингвистической переменной или множество ее значений (термов);

$X$  — область определения (универсум) нечетких переменных, которые входят в определение лингвистической переменной ?;

$G$  — синтаксическая процедура, описывающая процесс образования новых термов;

$M$  — семантическая процедура образования новых термов.

Определим терм-множества входных лингвистических переменных:

1)  $\{V_4$ -A1 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $A_1$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

2)  $\{V_4$ -A2 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $A_2$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

3)  $\{V_4$ -A3 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $A_3$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

4)  $\{V_4$ -A4 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $A_4$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

5)  $\{V_4$ -A5 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $A_5$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

6)  $\{V_4$ -B1 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $B_1$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

7)  $\{V_4$ -B2 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $B_2$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

8)  $\{V_4$ -B3 = Уровень соответствия документа  $V_4$  документу  $B_3$ ,  
 $T = \{\text{низкий, средний, высокий}\}, X=[0;17]\}$ ;

А так же определим терм-множества выходных лингвистических переменных:

9) {Группа\_А = Уровень соответствия документа В<sub>4</sub> группе А, Т = {низкий\_уровень\_соответствия, эксперт, высокий\_уровень\_соответствия}, X=[0;1]}.

10) {Группа\_В = Уровень соответствия документа В<sub>4</sub> группе В, Т = {низкий\_уровень\_соответствия, эксперт, высокий\_уровень\_соответствия}, X=[0;1]}.

В редакторе MATLAB Fuzzy Logic Toolbox задаются функции принадлежности всех входных и выходной лингвистической переменных. Значения функций принадлежности определяются, учитывая мнения экспертов.

После создания лингвистических переменных, опираясь на знания экспертов, сформируем базу правил системы нечеткого вывода следующего вида:

1. If (В4-А1 is средний) and (В4-А2 is средний) and (В4-А3 is низкий) and (В4-А4 is низкий) and (В4-А5 is низкий) and (В4-В1 is низкий) and (В4-В2 is низкий) and (В4-В3 is низкий) then (Группа\_А is низкий\_уровень\_соответствия) (Группа\_В is низкий\_уровень\_соответствия)

2. If (В4-А1 is высокий) and (В4-А2 is высокий) and (В4-А3 is высокий) and (В4-А4 is высокий) and (В4-А5 is высокий) and (В4-В1 is низкий) and (В4-В2 is низкий) and (В4-В3 is низкий) then (Группа\_А is высокий\_уровень\_соответствия) (Группа\_В is низкий\_уровень\_соответствия)

3. If (В4-А1 is низкий) and (В4-А2 is низкий) and (В4-А3 is низкий) and (В4-А4 is низкий) and (В4-А5 is низкий) and (В4-В1 is высокий) and (В4-В2 is высокий) and (В4-В3 is высокий) then (Группа\_А is низкий\_уровень\_соответствия) (Группа\_В is высокий\_уровень\_соответствия)

4. If (В4-А1 is средний) and (В4-А2 is средний) and (В4-А3 is средний) and (В4-А4 is средний) and (В4-А5 is средний) and (В4-В1 is средний) and (В4-В2 is средний) and (В4-В3 is средний) then (Группа\_А is эксперт) (Группа\_В is эксперт)

5. If (В4-А1 is высокий) and (В4-А2 is высокий) and (В4-А3 is высокий) and (В4-А4 is высокий) and (В4-А5 is высокий) and (В4-В1 is высокий) and (В4-В2 is высокий) and (В4-В3 is высокий) then

(Группа А is высокий\_уровень\_соответствия) (Группа В is высокий\_уровень\_соответствия)

...

19. If (B4-B1 is высокий) and (B4-B2 is высокий) and (B4-B3 is средний) then (Группа В is высокий\_уровень\_соответствия)

Каждая входная переменная получает значение, образованное после применения ЛСА для документа b4 и остальных рассматриваемых документов (рисунок 2).

Из рисунка 2 видно, что после применения алгоритма нечёткого вывода Мамдани выходные значения результирующих функций примут значения: Группа\_А=0.157; Группа\_В=0.2.

Из приведённых ниже графиков принадлежности лингвистических переменных Группа\_А и Группа\_В видно, что значения переменных обеих функций соответствуют лингвистическому терму «низкий\_уровень\_соответствия». Значение этого терма является результатом работы алгоритма нечёткого вывода. Документ не отнесён ни к одной из групп.

Если значения входных функций примут значения, указанные в таблице 5, то результирующие значения функций алгоритма нечёткого вывода изменятся и примут вид, показанный на рисунке 3.

Таблица 5. Исходные данные для алгоритма нечёткого вывода

Название функции	Значение функции
b4-a1	4.1
b4-a2	13.5
b4-a3	14.9
b4-a4	8.5
b4-a5	8.5
b4-b1	8.5
b4-b2	8.5
b4-b3	3.8

В приведенном примере Группа\_А=0.8, Группа\_В=0.498. Эти значения соответствуют лексическим термам Группа\_А=«высокий\_уровень\_соответствия», Группа\_В=«эксперт». В этом случае полисемантический документ автоматически относится к группе документов А, а возможность его записи в группу В определяется оператором.

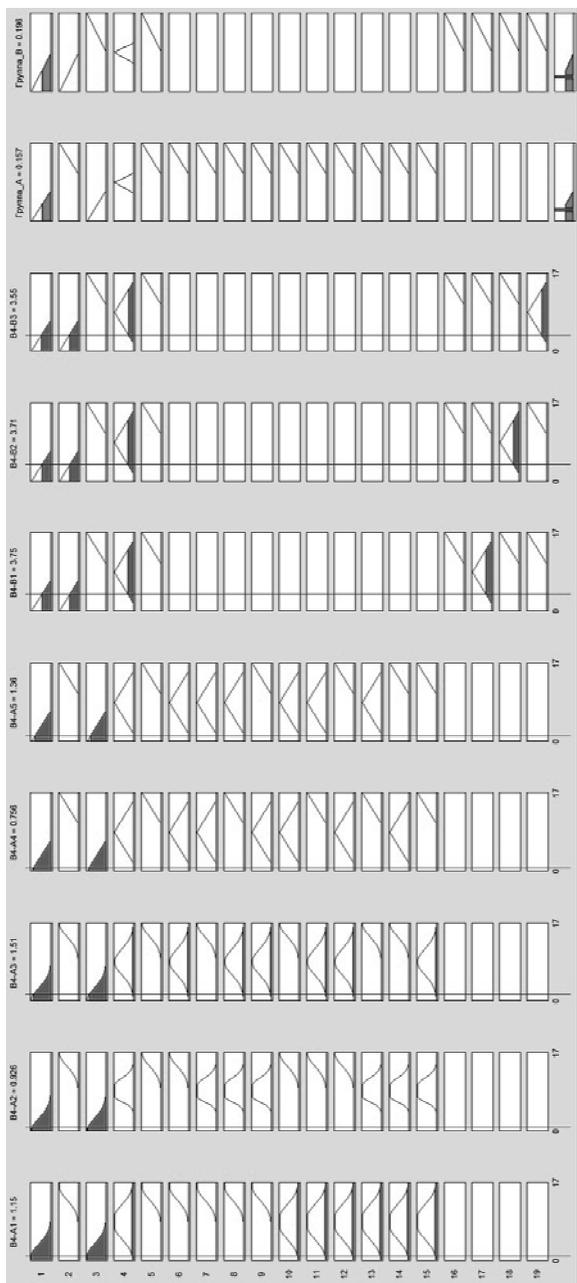


Рис. 2. Состав правил и вид решения при несоответствии документов

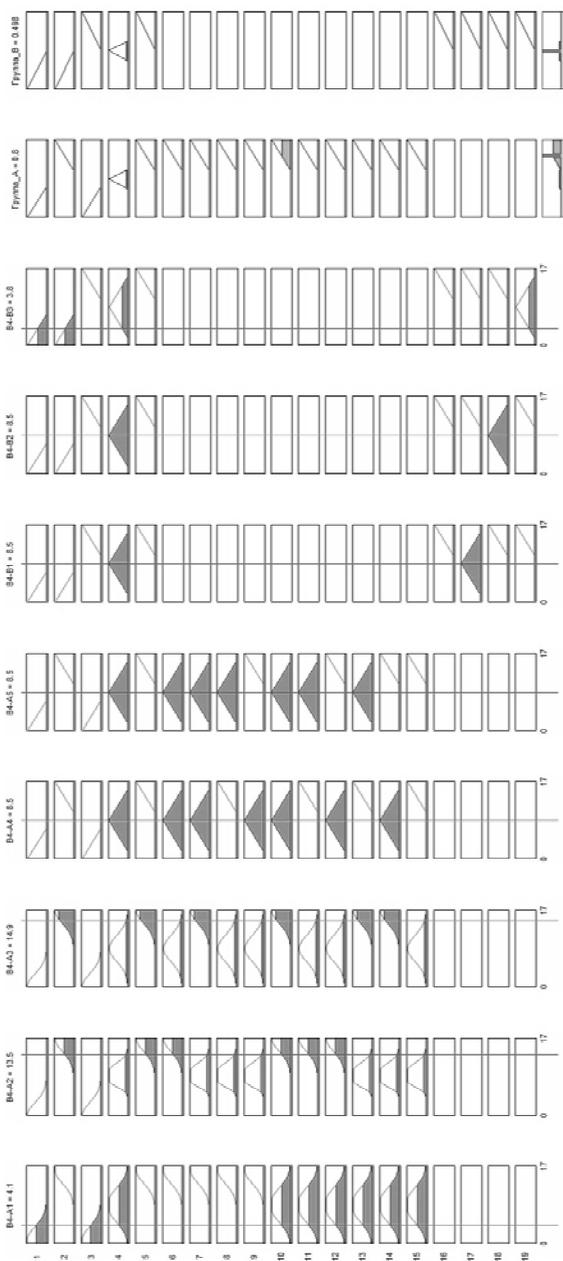


Рис. 3. Состав правил и вид решения при соответствии документов

**4. Заключение.** В настоящей статье предложен метод автоматической рубрикации текстовых документов на основе совместного применения метода латентно-семантического анализа (ЛСА) и алгоритма нечёткого вывода Мамдани.

Использование метода ЛСА и алгоритма нечёткого вывода с предложенной базой правил для алгоритма нечёткого вывода Мамдани позволяет автоматически принимать решение по рубрикации текстовых документов, что позволяет снизить временные затраты на рубрикацию. При этом не возрастает количество семантических ошибок рубрикации вследствие применения метода ЛСА с использованием набора ключевых слов. В ситуациях, когда возможно появление ошибок, система рубрикации предлагает оператору рубрицировать документ.

Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении оценивания оперативности и эффективности применения предложенного подхода, например, на основе вероятностных моделей, таких как [15]. Кроме того, в направлении обоснования выбора алгоритма нечеткого вывода [16-18] по соотношению трудоемкости и точности получаемых решений.

### Литература

1. *Агеев М.С., Добров Б.В., Лукашевич Н.В.* Автоматическая рубрикация текстов: методы и проблемы // Учебные записки Казанского государственного университета. Физико-математические науки. 2008. Вып. 150. № 4. С. 25–40.
2. *Гареев А. Ф.* Автоматическое тематическое рубрицирование сообщений средств массовой информации на основе применения технологии нейронных сетей // Информационные технологии. 1999. № 5. С. 26–33.
3. *Papka R., Allan J.* Document classification using multiword features // Proceedings of the A CM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM-98). New York. ACM Press. 1998. pp. 124–131.
4. *Manning C.D., Raghavan P., Schütze H.* An Introduction to Information Retrieval Draft. Online edition // Cambridge University Press. 2009. 544 p.
5. *Хомоненко А.Д., Краснов С.А.* Применение метода латентно-семантического анализа для автоматической рубрикации документов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2012. № 2(31). С. 124–132.
6. *Бубнов В.П. и др.* Модели информационных систем: учеб. пособие // М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2015. 188 с.
7. *Mamdani E.H.* Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic Systems // Fuzzy Sets and Systems. 1977. vol. 26. pp. 1182–1191.
8. *Войцеховский С.В., Хомоненко А.Д.* Выявление вредоносных программных воздействий на основе нечеткого вывода // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2011. № 3. С. 81–91.
9. *Хомоненко А.Д., Войцеховский С.В., Логашев С.В., Дашонок В.Л.* Устранение семантических противоречий в eLibrary.ru на основе нечёткого вывода // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2015. № 1. С. 24–33.

10. *Хомоненко А.Д., Дашонок В.Л., Краснов С.А.* Выявление противоречий в семантически близкой информации на основе латентно-семантического анализа // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2014. № 2. С. 73–84.
11. *Foltz P.W.* Using latent semantic indexing for information filtering // In ACM Conference on Office Information Systems (COIS). 1990. pp. 40–47.
12. *Dumais S.* Latent semantic indexing: TREC-3 report // In Proc. of the Third Text REtrieval Conference. 1995. pp. 219–230.
13. *Landauer T., Foltz P. and Laham D.* An introduction to Latent Semantic Analysis // Discourse processes. 1998. vol. 25. no. 2–3. С. 259–284.
14. *Кураленок И.Е., Некрестьянов И.С.* Автоматическая классификация документов на основе латентно-семантического анализа // Труды первой всероссийской научно-методической конференции “Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции”. СПб. 1999. С. 89–96.
15. *Хомоненко А.Д., Краснов С.А., Еремин А.С.* Оценка оперативности автоматической рубрикации документов с помощью модели нестационарной системы обслуживания с эрланговским распределением длительности интервалов между запросами // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2012. № 3. С. 14–21.
16. *Takagi T., Sugeno M.* Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. 1985. vol. 15. no. 1. pp. 116–132.
17. *Леоненков А.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH // СПб: БХВ-Петербург. 2003. 736 с.
18. *Штовба С.Д.* Проектирование нечётких систем средствами MATLAB // М.: Горячая линия-Телеком. 2007. 288 с.

## References

1. Ageev M.S., Dobrov B.V., Lukashevich N.V. [Automatic categorization of texts: methods and problems.] *Uchebnye zapiski Kazanskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki – Scientific notes of the Kazan State University. Physics and mathematics.* 2008. Issue 150. vol. 4. pp. 25–40. (In Russ.).
  2. Gareev A. F. [Thematic automatically classifying messages of the media through the use of neural network technology.]. *Informacionnye tehnologii – Information Technology.* 1999. vol. 5. pp. 26–33. (In Russ.).
  3. Papka R., Allan J. Document classification using multiword features. Proceedings of the ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM-98). New York. ACM Press. 1998. pp. 124–131.
  4. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. An Introduction to Information Retrieval Draft. Online edition. Cambridge University Press. 2009. 544 p.
  5. Khomonenko A.D., Krasnov S.A. [Application of the method of latent semantic analysis for automatic categorization of documents]. *Izvestija Peterburgskogo universiteta putej soobshhenija – Proceedings of St. Petersburg State University of Communication.* 2012. vol. 2(31). pp. 124–132. (In Russ.).
  6. Bubnov V.P. *Modeli informacionnyh sistem: ucheb. posobie* [Models of information systems: proc. Manual]. Moscow: FGBOU «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniju na zheleznodorozhnom transporte». 2015. 188 p. (In Russ.).
  7. Mamdani E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic Systems. *Fuzzy Sets and Systems.* 1977. vol. 26. pp. 1182–1191.
  8. Vojcehovskij S.V., Khomonenko A.D. [The revealing of harmful program influences on the basis of fuzzy inference] *Problemy informacionnoj bezopasnosti.*
- 16 SPIIRAS Proceedings. 2016. Issue 1(44). ISSN 2078-9181 (print), ISSN 2078-9599 (online)  
www.proceedings.spiiras.nw.ru

- Komp'yuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems.* 2011. vol. 3. pp. 81–91. (In Russ.).
9. Khomonenko A.D., Vojchevskij S.V., Logashev S.V., Dashonok V.L. [Resolving semantic inconsistencies in elibrary.ru on the basis of fuzzy inference]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems.* 2015. vol 1. pp. 24–33. (In Russ.).
  10. Khomonenko A.D., Dashonok V.L., Krasnov S.A. [The identification of contradictions in semantically close information based on latent semantic analysis]. *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems.* 2014. vol. 2. pp. 73–84. (In Russ.).
  11. Foltz P.W. Using latent semantic indexing for information filtering. In ACM Conference on Office Information Systems (COIS). 1990. pp. 40–47.
  12. Dumais S. Latent semantic indexing: TREC-3 report. In Proc. of the Third Text REtrieval Conference. 1995. pp. 219–230.
  13. Landauer T., Foltz P., Laham D. An introduction to Latent Semantic Analysys. Discourse processes. 1998. vol. 25. no. 2–3. pp. 259–284.
  14. Kuralenok I.E., Nekrest'janov I.S. [Automatic categorization of documents based on latent semantic analysis] *Trudy pervoj vsrossijskoj nauchno-metodicheskoy konferencii "Jelektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tehnologii, jelektronnye kolekcii"*. SPb [Proceedings of the First All-Russian Scientific Conference "Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections"]. 1999. pp. 89–96. (In Russ.).
  15. Khomonenko A.D., Krasnov S.A., Eremin A.S. [Evaluation of the efficiency of the automatic rubrication of documents using the model of non-stationary queueing systems with erlangovsky distribution of duration of intervals between requests] *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy – Problems of information security. Computer systems.* 2012. vol. 3. pp. 14–21. (In Russ.).
  16. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics.* 1985. vol. 15. no. 1. pp. 116–132.
  17. Leonenkov A. *Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. SPb.: BHV-Peterburg, 2003. 736 p. (In Russ.).
  18. Shtovba S.D. *Proektirovanie nechjotkih sistem sredstvami MATLAB* [The design of fuzzy systems by means of MATLAB]. Moscow: Gorjachaja linija-Telekom. 2007. 288 p. (In Russ.).

**Хомоненко Анатолий Дмитриевич** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных и вычислительных систем, ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: численная теория массового обслуживания, программирование, операционные и информационные системы. Число научных публикаций — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; р.т.: 457-80-23, Факс: 310-75-25.

**Khomonenko Anatoly Dmitrievich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of information and computing systems department, Petersburg State Transport University. Research interests: queueing systems, artificial intelligence, databases. The number of publications — 150. khomon@mail.ru, <http://www.pgups.ru>; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: 457-80-23, Fax: 310-75-25.

**Логашев Сергей Вячеславович** — преподаватель кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: базы данных, информационные системы, системы поддержки принятия решения. Число научных публикаций — 2. loga1977@yandex.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: 8-906-225-67-76.

**Logashev Sergej Vjacheslavovich** — teacher, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: databases, information systems, systems of support of decision-making. The number of publications — 2. loga1977@yandex.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: 8-906-225-67-76.

**Краснов Сергей Александрович** — к-т техн. наук, старший преподаватель, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: информационные технологии, защита информации, системы искусственного интеллекта. Число научных публикаций — 30. kras25@rambler.ru; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: 89117346550.

**Krasnov Sergey Aleksandrovich** — senior lecturer, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: information technology, information security, artificial intelligence systems. The number of publications — 30. kras25@rambler.ru; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: 89117346550.

## РЕФЕРАТ

### *Хомоненко А.Д., Логашев С.В., Краснов С.А.* **Автоматическая рубрикация документов с помощью латентно-семантического анализа и алгоритма нечёткого вывода Мамдани.**

Целью работы является выработка подхода к решению задачи автоматической рубрикации документов по заданным тематическим рубрикам. Для этого предлагается использовать совместно метод латентно-семантического анализа и алгоритм нечёткого вывода Мамдани, что определяет новизну предлагаемого подхода. Выявление семантической структуры при помощи латентно-семантического анализа выполняется алгоритмически и не требует ручного составления словарей. Для повышения точности решения рассматриваемой задачи, предлагается использовать методы и алгоритмы нечеткого вывода, т.к. в решении задачи автоматической рубрикации документов имеется нечеткость значений анализируемых параметров. Для реализации построенной модели использовалась среда MATLAB и специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox. Исходной информацией для ЛСА является матрица А терм-документ, которая описывает используемый для обучения системы набор документов. Далее производим разложение полученной матрицы терм-документ и рассчитываем степень соответствия векторов (документов), обычно для этого используется математическая операция скалярного произведения векторов. Полученные значения обрабатываются алгоритмом нечёткого вывода Мамдани, результатом которого являются значения выходных функций о принадлежности документа каждой из существующих рубрик.

## SUMMARY

### *Khomonenko A.D., Logachev S.V., Krasnov S.A.* **Automatic Categorization of Documents Using Latent Semantic Analysis and Fuzzy Inference Algorithm of Mamdani.**

The aim of this work is to develop an approach to the problem of automatic categorization of documents by given subject headings. For this purpose, it is proposed to use jointly the method of latent semantic analysis and fuzzy inference algorithm of Mamdani, which determines the novelty of the proposed approach. Identifying semantic patterns using latent semantic analysis is performed algorithmically and does not require manual compilation of dictionaries. To improve the accuracy of the considered problem, it is proposed to use methods and algorithms of fuzzy inference, as in the solution of the problem of the automatic rubrication of documents there are ambiguities in the values of the analyzed parameters. For the implementation of the constructed model, MATLAB and a special expansion pack Fuzzy Logic Toolbox were used. Source data for LSA is a matrix A term-document that describes a set of documents being used to train the system. Next, we make the decomposition of the resulting matrix of term-document and calculate the degree of correspondence of vectors (documents), usually via a mathematical operation of scalar product of vectors. The obtained values are processed by fuzzy inference algorithm of Mamdani, resulting values are output functions of a document belonging to each of the existing headings.

А.И. ТИТОВ  
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОЙ АППРОКСИМАЦИИ  
ПРИ ОЦЕНКЕ ТРУДОЕМКОСТИ РАЗРАБОТКИ  
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

---

*Титов А.И. Использование нейросетевой аппроксимации при оценке трудоемкости разработки программного обеспечения.*

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные модели оценки трудоемкости разработки ПО. Подробно рассмотрена одна из самых распространенных методик оценки — модель СОСОМО. Предложен подход для повышения уровня точности оценки по модели СОСОМО на основе нейросетевой аппроксимации. Обосновывается выбор нейросети с обратным распространением ошибки в качестве аппроксиматора. Приводятся численные результаты обучения нейросети, использующей параметры модели СОСОМО в качестве входных параметров.

**Ключевые слова:** оценка трудоемкости разработки ПО, модель СОСОМО, нейронная сеть.

*Titov A.I. Software Development Effort Estimation Using a Neuro Network Approximation Approach.*

**Abstract.** The article describes the main effort estimation models for software development. It is spoken in detail about the most widely used software effort estimation model, the Constructive Cost Model (COCOMO). An approach to improve the accuracy of estimates of COCOMO model based on neural network approximation is proposed. It deals with the choice of a neural network with back-propagation errors as an approximator. Data are given about numerical results of neural network learning using COCOMO model parameters as input.

**Keywords:** software development effort estimation; constructive cost model; artificial neural network.

---

**1. Введение.** При управлении проектами в сфере информационных технологий важную роль играет создание обоснованного плана выполнения проекта. По мнению многих специалистов в области управления ИТ-проектами, ошибки в оценке (предсказании ключевых параметров будущих работ) являются одной из наиболее распространенных причин возникновения проблем в проектах по разработке ПО. Существует ряд исследований, согласно которым в среднем реальные трудозатраты превышают исходную оценку трудоемкости на 21% [1-2].

Недооценка объема функциональности, трудозатрат и сроков исполнения проекта может нарушить задуманный порядок работ и привести к увеличению бюджета проекта, а также снизить качество выполняемых работ. При этом слишком высокая оценка проекта также несет в себе определенные риски. Переоценка трудоемкости может повлиять на скорость выполнения работ, поскольку проектная команда будет ориентироваться на сроки выполнения, полученные исходя из переоцененного плана. Помимо этого, завышенная оценка также озна-

чает завышенный бюджет проекта и расход ресурсов, а следовательно, снижение конкурентоспособность исполнителя.

Исходя из этих рисков, при построении планов работ необходимо дать оценку трудоемкости с достаточно высоким уровнем точности. Для того чтобы оценка трудоемкости обладала необходимой точностью и могла быть пересмотрена в процессе разработки ПО она должна удовлетворять следующим условиям [3]:

1. Оценка трудоемкости создания программного компонента должна опираться на предшествующий опыт разработки подобных компонентов.
2. Необходимо оценивать трудоемкость вновь создаваемого компонента, так и работу по внесению изменений в уже реализованные компоненты.
3. Оценка должна учитывать квалификацию участников проектной команды.
4. Оценка должна учитывать расходы на весь жизненный цикл ПО, включая руководство проектом.

Существует большое число методов для оценки трудозатрат на разработку программного обеспечения, такие как PERT, COSOMO и COSOMO II, Functional Points, Use Case Points и многие другие [4-9]. Основным недостатком этих методов в том, что результаты анализа проекта, на которых строится оценка, не всегда могут быть применимы в равной степени к другим проектам. Из-за сложности адаптации методов к конкретному проекту точность расчета может значительно снизиться.

Исходя из этого, при оценке трудоемкости возникает задача внесения изменений в методику расчета с учетом данных, полученных от оценок предыдущих проектов или отдельных компонентов. Одним из возможных подходов к решению этой задачи является использование нейросетевой аппроксимации оценки трудоемкости. При обучении нейронной сети в качестве исходных данных используются базовые (полученные в результате оценки) характеристики программного проекта и его фактические трудозатраты. Если имеющихся данных для обучения нейронной сети недостаточно, то дополнительные наборы параметров трудоемкости и выходных характеристик трудозатрат разработки программного проекта можно получить, к примеру, с помощью линейной или сплайн аппроксимации.

В качестве базовой модели расчета трудоемкости выбрана модель COSOMO, поскольку она обладает следующими преимуществами:

- широкая распространенность в ИТ-отрасли;
- использование большого числа параметров, за счет чего достигается полнота модели проекта;

- возможность расчета для разных уровней детализации (базового, промежуточного и детального);

**2. Описание выбранного подхода.** Оценка трудоемкости по модели COSOMO имеет ряд недостатков:

1. Отсутствие возможности корректировки оценки по данным, полученным с предыдущих проектов.

2. Использование в качестве метрики объема проекта количество строк кода (KSLOC). В усовершенствованном варианте методики COSOMO II предусмотрена возможность использования функциональных точек вместо количества строк кода, но для итогового расчета функциональные точки необходимо перевести в строки кода, что влечет за собой снижение точности оценки.

3. При необходимости добавления новых параметров требуется проведение регрессионного анализа для калибровки модели.

Эти недостатки могут сильно снизить точность вычисления, а также повысить трудозатраты при необходимости скорректировать модель под требования определенной проектной команды. Для устранения этих недостатков предлагается подход на основе нейросетевой аппроксимации. Общая схема предлагаемого подхода представлена на рисунке 1.



Рис.1. Общая схема подхода к использованию нейросетевой аппроксимации в оценке трудоемкости

Основная идея данного подхода заключается в том, что между входными параметрами проекта и его выходной трудоемкостью устанавливается функциональная зависимость, реализуемая с помощью нейронной сети. При обучении нейронной сети в качестве исходных данных используются известные параметры проекта, выбранные в за-

зависимости от используемой модели оценки, а также выходные характеристики трудоемкости. Если имеющихся данных для обучения нейронной сети недостаточно, то дополнительные наборы параметров и выходных характеристик можно получить, к примеру, с помощью линейной или сплайн аппроксимации. После того как нейронная сеть обучена на данных существующих проектов, возможно ее использование для прогнозирования трудозатрат последующих проектов.

Главным преимуществом этого подхода является универсальность. Прогнозирование трудоемкости с помощью нейронной сети может быть применено к различным моделям оценки. Кроме того, возможно использование в условиях изменения состава входных параметров модели. Например, при использовании модели СОСОМО II возможен расчет трудоемкости без перевода функциональных точек в строки кода, что позволяет повысить точность оценки и получить предварительный прогноз на ранних этапах проектирования программного обеспечения.

Основной минус использования нейронной сети заключается в том, что для получения приемлемого уровня точности требуется обучение на реальных примерах. В ситуациях, когда отсутствуют выполненные проекты или их статистика, следует использовать методы оценки без нейросетевой аппроксимации. По мере появления реальных данных по разрабатываемым и внедряемым проектам обучение нейронной сети станет возможным, а с ростом числа обучающих примеров точность оценки будет расти.

**3. Вычислительный эксперимент.** Для того чтобы оценить возможности повышения точности оценки с помощью нейросетевой аппроксимации, были проведены эксперименты по моделированию и обучению нейросети в пакете Matlab Network Neural.

В качестве архитектуры нейросети выбрана сеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки. Для входных параметров были выбраны 15 атрибутов стоимости  $CD_k$  из модели СОСОМО и объем программного средства в тысячах строках кода (KSLOC).

Архитектура выбранной нейросети, смоделированной в пакете Matlab Network Neural представлена на рисунке 2.

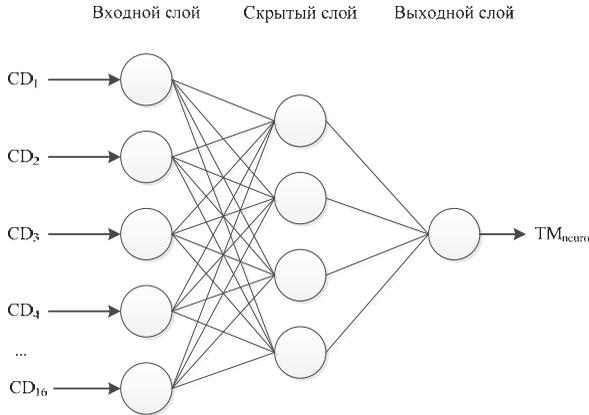


Рис.2. Архитектура выбранной нейросети в Matlab Network Neural

В качестве источника данных были взяты проекты, использованные при разработке модели СОСОМО [10]. Из исходных 63 проектов случайным образом были выделены 5, которые использовались как тестовые для оценки точности моделей. На первом этапе обучения нейросети был введен обучающий набор данных по 20 проектам, выбранным из исходных. На втором этапе в обучающий набор были добавлены еще 20 проектов, а на третьем этапе еще 16. После обучения нейросети на обучающем наборе данных, на каждом этапе моделирования было проведено тестирование обученной нейросети.

Для сравнения точности нейросетевого подхода с точностью расчета по методу СОСОМО были проведены вычисления величины времени разработки в календарных месяцах (ТМ).

$$TM = c_i \times (PM)^{d_i},$$

где PM (People  $\times$  Month) — трудоемкость (чел. мес.);

Формула для расчета трудоемкости промежуточного уровня модели имеет вид:

$$PM = EAF \times a_i \times (SIZE)^{b_i},$$

где SIZE — объем программного продукта в тысячах строк исходного текста (KiloofSourceLineofCode —KSLOC);

EAF (Effort Adjustment Factor) — произведение выбранных атрибутов (коэффициентов) стоимости (Cost Drivers)  $CD_k$  :

$$EAF = \prod_{k=1}^{15} CD_k.$$

Значения коэффициентов  $a_b, b_b, c_b, d_b$  были выбраны для органического типа проекта (см. таблицу 1), который характеризуется тем, что проект выполняется небольшой группой специалистов, имеющих необходимый опыт разработки.

Таблица 1. Значения коэффициентов базового уровня модели

Тип проекта	$a_b$	$b_b$	$c_b$	$d_b$
Органический	2.4	1.05	2.5	0.38
Полуразделенный	3.0	1.12	2.5	0.35
Встроенный	3.6	1.20	2.5	0.32

В таблице 2 приведена часть значений атрибутов (коэффициентов) стоимости  $CD_k$  на примере фактора «характеристики продукта» (ProductAttributes).

Таблица 2. Атрибуты (коэффициенты) трудоемкости среднего уровня модели COSOMO [10]

Факторы стоимости	Рейтинг					
	очень низкий	низкий	средний	высокий	очень высокий	критический
Сложность продукта	0,70	0,85	1,00	1,15	1,30	1,65
Требуемая надежность ПО	0,75	0,88	1,00	1,15	1,40	-
Размер БД приложения	-	0,94	1,00	1,08	1,1	-

В качестве критерия точности оценки выбрана величина среднего отклонения, которая вычислялась для каждого тестового проекта по следующей формуле:

$$X = \frac{|TM_{\text{actual}} - TM|}{TM_{\text{actual}}} \times 100 ,$$

где  $TM_{\text{actual}}$  — реальные трудозатраты;

$TM$  — предполагаемые трудозатраты, вычисленные по одному из методов оценки.

Также для оценки рассеивания отклонений, вычисленных по методу COSOMO и при помощи нейросети, для каждого метода была определена остаточная дисперсия:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{n=1}^n (TM - TM_{\text{actual}})^2}{n} ,$$

где  $n$  — количество тестовых проектов. Результаты вычислений приведены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты вычисления времени разработки по методике СОСОМО и при помощи нейросети

Номер проекта	ТМ <sub>актуа</sub> , мес.	ТМ <sub>сосомо</sub> , мес.	ТМ <sub>нейро</sub> , мес.		
			20 обучающих проектов	40 обучающих проектов	56 обучающих проектов
1	18,2	15,53	16,69	19,63	14,29
2	11,3	10,46	20,69	15,00	13,15
3	16,4	14,65	15,98	17,50	15,21
4	15,3	9,49	12,83	11,18	16,02
5	11,6	8,38	15,99	12,28	13,21
Среднее значение отклонения X, %		19,7	29,6	16,0	12,7
Остаточная дисперсия $\sigma^2$		11,01	23,20	6,97	4,65

Как можно увидеть из результатов вычислений, среднее отклонение по трудоемкостям проектов, вычисленное методом СОСОМО, составило 19,7%. Среднее отклонение, вычисленное смоделированной нейросетью, составило 12,7%. При этом уже после второго этапа обучения нейросети получены более точные результаты, чем по методу СОСОМО. Оценки рассеивания отклонений результатов моделирования времени разработки от фактических данных также подтверждают более высокую точность нейросетевой аппроксимации.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что предложенный подход применения нейросетевой аппроксимации является перспективным для дальнейших исследований в направлении повышения точности прогнозирования трудозатрат при разработке ПО.

**4. Заключение.** Результатом применения данного подхода является получение общей функциональной зависимости прогнозных выходных характеристик производительности разработки программного проекта от его параметров трудоемкости. Достоинством предлагаемого подхода является его высокая общность и универсальность в смысле допустимости предположек о входных параметрах разработки. Так, например, при изменении исходных параметров возможно применение этого подхода и к другим моделям оценивания трудоемкости, таким как СОСОМО II или метод функциональных точек.

Также можно отметить, что по результатам вычислительного эксперимента метод аппроксимации оценки трудоемкости разработки программного обеспечения с помощью нейронной сети может обеспечивать большую точность, по сравнению с методом СОСОМО, при идентичных входных данных.

В качестве направлений дальнейших исследований целесообразно выделить: развитие регрессионной модели оценивания СОСОМО [19], обоснование выбора архитектуры нейронной сети для

различных моделей оценки, применение нейросетевой аппроксимации к методу функциональных точек.

### Литература

1. *Jørgensen M.* A Review of Studies on Expert Estimation of Software Development Effort // *Journal of Systems and Software*. 2004. vol. 70. Issue 1-2. pp. 37–60.
2. *Jørgensen M.* The Use of Precision of Software Development Effort Estimates to Communicate Uncertainty // *Software Quality Days. The Future of Systems and Software Development*. Springer. 2016. pp. 156–168.
3. *Гольфанд И.Я., Хлебунин П.С.* Оценка трудозатрат разработки программной компоненты // *Труды ИСА РАН*. 2005. Т. 15. С. 125–135.
4. *Фатрелл Р.Т., Шафер Д.Ф., Шафер Л.И.* Управление программными проектами. Достижение оптимального качества при минимуме затрат: пер. с англ. // М., СПб., Киев: Вильямс. 2004. 1136 с.
5. *Макконелл С.* Сколько стоит программный проект // М.: Русская редакция; СПб.: Питер. 2007. 304 с.
6. *Архипенков С.Я.* Лекции по управлению программными проектами // М. 2009. 127 с.
7. *Соммервилл. И.* Инженерия программного обеспечения: пер. с англ. // М.: Вильямс. 2002. 624 с.
8. *Тележкин А.М.* Применение алгоритмических сетей для оценки ресурсов в программных проектах. Дисс. канд. техн. наук // СПб. 2015.
9. *Кульдин С.П.* Генетический подход к проблеме оценки сроков и трудоемкости разработки программного обеспечения с заданными требованиями к качеству // *Прикладная информатика*. 2010. № 5 (29). С. 30–42.
10. *Voehn B.* *Software Engineering Economic* // Prentice Hall. 1981.768 с.
11. *Voehn B.* *Software cost estimation with COCOMO II* // Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall. 2000. 540 с.
12. *Круглов В.В., Борисов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика // М.: Горячая линия-Телеком. 2002. 2-е изд. 382 с.
13. *Медведев В.С., Потемкин В.Г.* Нейронные сети. MATLAB 6 // М.: Диалог-МИФИ. 2002. 496 с.
14. *Горбань А.Н.* Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 1998. Вып. 1. № 1. С. 12–24.
15. *Hornik K.* Approximation capabilities of multilayer feedforward networks // *Neural Networks*. 1991. vol. 4. pp. 251–257.
16. *Филатова Т.В.* Применение нейронных сетей для аппроксимации данных // *Вест. Том. гос. ун-та*. 2004. № 284. С. 121–125.
17. *Павлова А.И., Лончакова О.Ю.* Сравнительный анализ применения нейронных сетей для аппроксимации функцией // *ScienceTime*. 2015. № 5 (17). С 118–121.
18. *Хомоненко А.Д., Яковлев Е.Л.* Нейросетевая аппроксимация характеристик многоканальных немарковских систем массового обслуживания // *Труды СПИИРАН*. 2015. Вып. 4(41). С. 81–91.
19. *Рогальчук В.В., Хомоненко А.Д.* Метод обратной трассировки и оценивание его влияния на стоимость разработки программного обеспечения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление*. 2008. № 4 (62). С. 146–151.

### References

1. *Jørgensen M.* A Review of Studies on Expert Estimation of Software Development Effort. *Journal of Systems and Software*. 2004. vol. 70. Issue 1-2. pp. 37–60.
2. *Jørgensen M.* The Use of Precision of Software Development Effort Estimates to Communicate Uncertainty. *Software Quality Days. The Future of Systems and Software Development*. 2016. pp. 156–168.

3. Gol'fand I.Ja., Hlebutin P.S. [Effort estimation development software components]. *Trudy ISA RAN – Proceedings of ISA RAS*. 2005. vol. 15. (In Russ.).
4. Fatrell R.T., Shafer D.F., Shafer L.I. *Upravlenie programmnyimi proektami. Dostizhenie optimal'nogo kachestva pri minimum zatrat* [Quality software project management first edition]. M. SPb.: Kiev: Vil'jams. 2004. 1136 p. (In Russ.).
5. Makkonell S. *Skol'ko stoit programnyj proekt* [Software Estimation: Demystifying the Black Art]. M.: Russkaja redakcija. SPb.: Piter. 2007. 304 p. (In Russ.).
6. Arhipenkov S.Ja. *Lekcii po upravleniju programmnyimi proektami* [Software project management lectures]. M. 2009. 127 p. (In Russ.).
7. Sommerville I. *Software Engineering*, 6<sup>th</sup> Edition. Addison Wesley Publishing Company. 2000. 6<sup>th</sup> Edition. 720 p. [Russian ed.: Sommerville I. *Inzhenerija programmnogo obespechenija*. M.: Vil'jams. 2002. 624 p].
8. Telezhkin A.M. *Primenenie algoritmicheskikh setej dlja ocenki resursov v programnyh proektah: diss. kand. tehn. nauk* [The use of algorithmic networks to assess resources in software projects: PhD thesis]. SPb. 2015. (In Russ.).
9. Kul'din S.P. [Genetic approach to the problem of estimating the timing and complexity of software development with the specified quality requirements]. *Prikladnaja informatika – Applied Informatics*. 2010. vol. 5 (29). pp. 30–42. (In Russ.).
10. Boehm B. *Software Engineering Economic*. Prentice Hall. 1981. 768p.
11. Boehm B. *Software cost estimation with COCOMO II*. Englewood Cliffs. NJ: Prentice Hall. 2000. 540p.
12. Kruglov V.V., Borisov V.V. *Iskusstvennye nejronnye seti. Teorija i praktika*. [Artificial neural networks. Theory and practice. Second edition]. M.: Gorjachaja linija-Telekom. 2002. 2e izd. 382p. (In Russ.).
13. Medvedev V.S., Potemkin V.G. *Nejronnyeseti. MATLAB 6* [Neural Networks. Matlab 6]. M.: Dialog – MIFI. 2002. 496p. (In Russ.).
14. Gorban' A.N. [Generalized approximation theorem and computing capabilities of neural networks]. *Sibirskij zhurnal vychislitel'noj matematiki – Siberian Journal of Numerical Mathematics*. vol. 1. no. 1. 1998. 12–24 pp. (In Russ.).
15. Hornik K. Approximation capabilities of multilayer feedforward networks. *Neural Networks*. 1991. vol. 4. pp. 251–257.
16. Filatova T.V. [Application of neural networks to approximate data]. *Vestn. Tom. gos. un-ta – Bulletin of the Tomsk State University*. 2004. vol. 284. 121–125 pp. (In Russ.).
17. Pavlova A.I., Lonchakova O.Ju. [Comparative analysis of the use of neural networks for approximation of functions]. *ScienceTime*. 2015. vol. 5 (17). 118–121 p. (In Russ.).
18. Homonenko A.D., Jakovlev E.L. [Neural network approximation of characteristics of multi-channel non-markovian queuing systems]. *Trudy SPIIRAS – Proceedings of SPIIRAS*. 2015. vol. 4 (41). 81–91 p. (In Russ.).
19. Rogal'chuk V.V., Homonenko A.D. [Reverse Tracing method and evaluating its impact on the cost of the software development]. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb GPU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie – Scientific and technical SPb SPU statements. Computer science. Telecommunications and Control Systems*. 2008. vol. 4 (62). pp 146–151. (In Russ.).

**Титов Александр Игоревич** — аспирант кафедры информационных и вычислительных систем, ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: нейронные сети, разработка программного обеспечения, управление проектами. Число научных публикаций — 2. titovvv@rambler.ru, <http://www.pgups.ru>; Московский пр., 9, Санкт-Петербург, 190031; п.т.: 8(812)457-80-23, Факс: 8(812)310-75-25.

**Titov Alexandr Igorevich** — postgraduate student of information and computing systems department, Petersburg State Transport University. Research interests: artificial neural network, software development, project management. The number of publications — 2. titovvv@rambler.ru, <http://www.pgups.ru>; 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031; office phone: 8(812)457-80-23, Fax: 8(812)310-75-25.

## РЕФЕРАТ

### *Титов А.И.* **Использование нейросетевой аппроксимации при оценке трудоемкости разработки программного обеспечения.**

В данной статье рассматриваются вопросы оценки трудоемкости разработки программного обеспечения. Оценка трудоемкости очень важна в управлении проектом, поскольку влияет на построение календарного плана работ и объем выделяемых ресурсов. Неточная оценка несет в себе большие риски для проекта, причем отрицательно влияет как заниженная оценка, так и завышенная.

Проанализированы основные критерии для оценки трудоемкости, а также наиболее широко используемые методы оценки. Основной недостаток этих методов в том, что данные, полученные с завершенных проектов, не всегда могут быть адаптированы к новым проектам. Исходя из этого, был предложен метод на основе нейронных сетей, который позволяет решить задачу внесения изменений в метод расчета с учетом фактических данных по трудозатратам.

Предлагаемый метод состоит в том, что между входными параметрами проекта и его выходной трудоемкостью устанавливается аппроксимирующая функция, которая реализуется с помощью нейронной сети. При обучении нейронной сети в качестве исходных данных используются известные параметры проекта, выбранные в зависимости от используемой модели проекта, а также выходные характеристики трудоемкости. После того как нейронная сеть обучена на завершенных проектах, ее можно использовать для прогнозирования трудоемкости новых проектов.

Для получения оценки точности этого подхода был проведен вычислительный эксперимент, где в качестве модели проекта была использована модель СОСОМО, а в качестве исходных данных проекты, использованные при разработке этой модели. Приведенные результаты показывают более высокий уровень точности, чем в исходном методе СОСОМО при идентичных входных данных.

## SUMMARY

### *Titov A.I.* **Software Development Effort Estimation Using a Neuro Network Approximation Approach.**

The article describes the effort estimation models for software development. Efforts estimation is great importance in the management of the project, because the impact on the construction schedule of works and the amount of resources allocated. Incorrect estimation carries great risks for the project, and negatively affects both underestimation and overestimation.

It analyzes the main criteria for effort estimation, as well as the most widely used valuation methods. The main disadvantage of these methods is that the data obtained from completed projects may not always be adapted to the new projects. Therefore, the method based on neural networks was proposed, which can solve the problem of changes in the calculation method based on actual data of estimation.

The proposed method consists in the fact that between the input parameters of the project and its complexity output set approximating a function that is implemented using a neural network. When training the neural network in the known parameters of the project are used as input data, selected depending on the model of the project, as well as the complexity of the output characteristics. Once the neural network trained on completed projects, it can be used to predict the complexity of new projects.

Computational experiment was conducted to obtain an estimate of the accuracy of this approach, where the project model COCOMO model was used, and as an input to projects used in the development of this model. These results show a higher level of precision than in the original method COCOMO under identical input data.

Н.В. ПУСТОВАЛОВА, Т.В. АВДЕЕНКО  
**ПОСТРОЕНИЕ СОГЛАСОВАННОЙ МОДЕЛИ ТРЕБОВАНИЙ  
ДЛЯ ПРОЦЕССА ПРОГРАММНОЙ ИНЖЕНЕРИИ**

---

*Пустовалова Н.В., Авдеенко Т.В. Построение согласованной модели требований для процесса программной инженерии.*

**Аннотация.** В работе описан подход, позволяющий сформировать согласованную модель типов требований для конкретного проекта по разработке программ. Использование такой модели призвано разрешить противоречия, вызванные разным пониманием определения «требование к программе», а также скоординировать различные модели типов требований, лежащие в основе отдельных видов документов-спецификаций и методологий работы с ними. Для построения согласованной модели исследованы наиболее часто используемые виды документов-спецификаций и модели требований, лежащие в их основе. В качестве базиса для построения классификации типов требований использована теория полевой структуры частей речи. Сформулировано определение «тип требования». Для этого выделен ряд критериев, пригодных для оценки отдельных экземпляров требований на их принадлежность к типам и полям требований. Такой подход позволяет на основании набора признаков экземпляра требования отнести его к определенному типу, а затем рекомендовать включить в структуру спецификации типы требований, необходимые для обеспечения качества спецификации.

**Ключевые слова:** программная инженерия, инженерия требований, спецификация требований, непротиворечивость и полнота требований, теория полевой структуры частей речи, онтология.

*Pustovalova N.V., Avdeenko T.V. Building a Harmonized Model of Requirements for Software Development Process.*

**Abstract.** The paper describes an approach to form a harmonized model of requirements for a specific software development project. Such a model is intended to resolve the contradictions caused by different understanding of the "program requirements" definition, as well as to coordinate the various models of requirements types that underlie certain types of documents, specifications and methodologies of requirements engineering. The most commonly used examples of requirements specifications were analyzed. We propose the theory of the field structure of parts of speech as a basis for requirement type classification and give a special definition for "requirements types." In addition, we propose a set of criteria for identification of types and fields of requirements. Based on a set of criteria for a requirement instance, this approach allows one to identify the requirements type and then recommend adding desired types to the requirements specification.

**Keywords:** software engineering, requirements engineering, requirements specification, completeness and consistency of the requirements, field theory in linguistic and grammar, ontology.

---

**1. Введение.** Прошло более 30 лет с момента опубликования эссе «No Silver Bullet» [1], в котором были рассмотрены различные проблемы, обозначившиеся после того, как стало ясно, что разработка программного обеспечения (ПО) превращается в массовый технологический процесс. Основным источником проблем, «оборотнем», который, неожиданно преобразаясь, губит весь проект, были названы требования к программам. Именно после этого инженерия требова-

ний (Requirements Engineering, RE) начала активно развиваться как самостоятельная область знания. Несмотря на все усилия специалистов, направленные на формализацию и стандартизацию процесса работы с требованиями, он по-прежнему во многом носит творческий и случайный характер. Это порождает ряд проблем в процессе программной инженерии: срыв сроков, превышение бюджета, создание некачественного программного продукта. В качестве одной из причин можно назвать отсутствие единой и согласованной теоретической базы инженерии требований [2, 3]. В настоящее время при работе с требованиями используется несколько различных подходов, в основе которых лежат разные классификации типов требований.

Сегодня существует множество типов разрабатываемых программ, специфику которых необходимо учитывать при организации процесса программной инженерии. Создание и внедрение формализованных процессов разработки, адаптированных для типовых проектов, будет полезно с точки зрения сокращения затрат, а также повышения уровня зрелости процессов организации-разработчика согласно модели CMM (Capability Maturity Model).

В модели жизненного цикла ПО этап сбора и анализа требований предшествует остальным этапам. Результат работы с требованиями записывается в виде спецификации (Software Requirements Specification, SRS). По определению [5] спецификация требований — это документ, который полно и четко определяет системные, программные, функциональные требования к ПО и его компонентам, параметры, которым они должны соответствовать, определяет дальнейшую процедуру проведения верификации и валидации. Спецификация требований является основой для всего процесса разработки, ее качество напрямую влияет на качество итогового продукта. Определение параметров спецификации, оказывающих значимое влияние на качество итогового продукта с учетом характеристик реализуемых проектов [4], позволит формировать рекомендации по созданию итогового документа-спецификации (технического задания), учитывающего особенности конкретного проекта.

Спецификация требований используется на различных этапах процесса разработки программ: проектирование и кодирование программ, подготовка и проведение тестирования, аттестации ПО. Очевидно, насколько важно корректно сформулировать требования и отразить их в виде спецификации, позволяющей обеспечить реализацию основных свойств требований: адекватность, полноту, однозначность, непротиворечивость, трассируемость [2, 6, 7]. Адекватность системы требований заключается в том, что на ее основе может быть разрабо-

тана программа, выполняющая именно те функции, которые нужны заказчику. Свойство полноты обеспечивается, когда требование содержит всю необходимую информацию для своей корректной реализации. Однозначность заключается в том, что каждая формулировка конкретного требования может быть интерпретирована единственным образом. Непротиворечивость подразумевает, что одно конкретное требования не должно содержать сведения, противоречащие другому. Трассируемость подразумевает, что всегда можно определить, с какими другими требованиями связано текущее, а также как оно реализуется в рамках этапов проектирования, кодирования и тестирования. Выполнение этих свойств определяет качество спецификации требований. Таким образом, построение качественной спецификации является основной целью инженерии требований.

Кроме сложностей, связанных непосредственно с написанием и использованием текста спецификации, процесс инженерии требований также имеет особенности организационного характера. В [8] особо отмечается, что продуктивная работа с требованиями возможна только в рамках слаженной команды разработчиков, а для этого, безусловно, необходимо единообразное или согласованное представление об организации этого процесса. Кроме того, разработка больших систем требует декомпозиции, и выполнения работ по созданию отдельных подсистем разными коллективами. Взаимопонимание, общение на одном языке в рамках единой методологии может внести большой положительный вклад в успех всего проекта, упростив процесс выявления и управления требованиями [2].

Общепризнанным средством решения слабо формализуемых задач, к каким относится инженерия требований, являются методы, развиваемые в научной области искусственного интеллекта. В работе [9] было предложено описание формальной гибридной модели требований, включающей фреймовую онтологию и гибридный механизм вывода на знаниях. В работе [10] мы обосновали использование логической модели представления знаний для обеспечения выполнения таких свойств системы требований, как, например, непротиворечивость и полнота. В настоящей работе данная модель адаптируется и расширяется для решения проблемы согласования теоретической базы инженерии требований. В рамках модели определяются различные типы требований и устанавливаются иерархические и ассоциативные отношения между ними. На основе критического анализа существующих моделей требований строится онтология типов требований, определяющая отношения между типами требований (классами онтологии), с использованием теории полевой структуры частей речи.

Построенная онтологическая модель может служить основанием для последующего соотнесения тех или иных артефактов инженерии требований, что, в свою очередь, позволит определить сочетаемость и возможность совместного использования различных подходов, инструментов, методов, стандартов, либо конвертацию артефактов требований из одного вида в другой. Кроме того, имея общее представление о соотнесении типов требований, можно формировать рекомендации по включению тех или иных типов требований в структуру спецификации для обеспечения свойств требований.

**2. Анализ существующих моделей требований и попытка их унификации.** Структура документа-спецификации, описывающего требования, набор используемых в нем типов требований и их отношения зависят от выбранной для проекта модели требований. Ее выбор определяется используемой моделью жизненного цикла ПО, зрелостью процессов согласно СММ, навыков разработчиков, требований к стандартизации программного продукта и процессу его создания со стороны заказчика. Часто использование только одной модели с ограниченным набором типов требований недостаточно для выполнения свойств требований, а значит, обеспечения качества спецификации. По этой причине в процессе разработки приходится решать дополнительные вопросы, связанные гармонизацией артефактов, созданных не только с привлечением элементов нескольких моделей, но и в виде разных видов документов-спецификаций, возможно, разными коллективами разработчиков. На сегодняшний день разные модели основываются на двух подходах к классификации типов требований, рисунок 1 [3, 8, 11, 12]. При первом подходе все требования делят на функциональные и нефункциональные, как представлено на рисунке 1А.

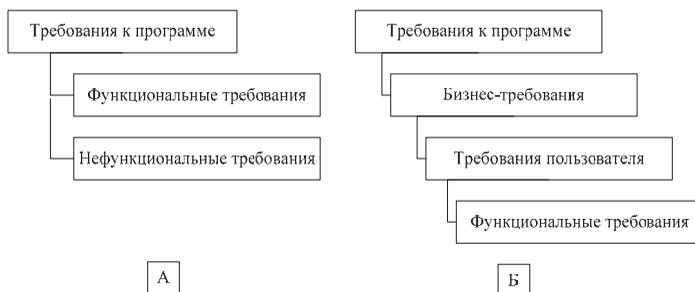


Рис. 1. Классификационные основания типов требований

В работе [3], функциональные требования определены как взаимодействие компонентов и их окружения, а нефункциональные как ограничения решений, которые могут быть приняты. В основе второго

подхода разделение требований по уровню детализации, представленное на рисунке 1Б [2, 7, 12, 14]. В рамках этого подхода выделяют: бизнес-требования, требования пользователя, функциональные требования. Стоит подчеркнуть, что для моделей, относящихся к этому подходу, понимание функциональных требований не полностью соответствует пониманию аналогичного термина при первом подходе. Редко для этого типа используется синоним «behavioral requirements», или требования поведения, как это происходит при первом подходе. Но в любом случае, его назначение - описать, что разработчику необходимо реализовать. В этом случае тип «функциональные требования», используемый в моделях, основанных на втором классификационном подходе, является частным случаем (подтипом), того, что используется в моделях, базирующихся на подходе первом. Независимо от того, какое основание было положено в основу модели типов требований, далее разработчики идут по пути детализации, дополняя ее описанием подтипов. Конкретные наборы подтипов и отношения между ними определяются методологией разработки, и составляют основу структур стандартов, на основании которых выполняются экземпляры спецификаций [7, 11–13]. В качестве примера можно привести выделение в структуре нефункциональных требований таких подтипов как «Требования к надежности», «Требования к составу и параметрам технических средств» согласно [11], «Требования к безопасности», «Требования к эргономике и технической эстетике» согласно [12], или атрибутов качества [5].

Если типы требований выделяются на основании критерия «функциональности», не происходит разделения спецификации по уровням детализируемых объектов, не в полной мере реализованы аспекты трассировки и наследования требований. В [8] приводятся данные о том, что описание иерархии требований в разрезе иерархии «родитель — потомок» улучшает качество спецификации и облегчает работу с ней. В случае выделения типов требований на основании разделения по уровням владельцев, отсутствует группировка по типам внутри уровней декомпозиции т.е. требования не разделяются на группы различных типов. Для небольших систем такой вариант структуры спецификации может быть допустим, но при разработке больших проектов такого разделения будет недостаточно для организации трассировки. Дополнительная декомпозиция может быть полезна, когда дело касается управления проектом, распределения функций между исполнителями, а также создания системы «зрелых» процессов инженерии программ. Использование одних и тех же названий для определения разных типов требований, и разное понимание места типов в структуре спецификации затрудняет процесс работы с требованиями, взаимодействие аналитиков.

На основе двух классификационных оснований (рисунок 1) формируются все остальные модели типов требований, задающие структуры итоговых документов-спецификаций. Эти документы задают структуру описания, его формат, но в вопросах наполнения оставляют аналитику достаточно много свободы. Причем даже в рамках одной методологии разработки существуют разногласия по поводу того, как использовать те или иные нотации для создания артефактов (например, можно взглянуть на UML диаграммы, создаваемые разными аналитиками). Отчасти это объясняется тем, что сами методики создания артефактов имеют рекомендательный характер и зависят от объекта предметной области, для моделирования которого создается артефакт, а также от принятых в организации практик их использования. «Одна из проблем, существующих в индустрии программного обеспечения, — это отсутствие общепринятых определений терминов, которыми мы пользуемся для описания нашей работы» [2]. Необходимость упорядочить и определить вопросы, касающиеся терминологии и методологии предметной области инженерии требований все еще есть.

Карл Вигерс, известный специалист в области инженерии требований, автор многих публикаций, одним из первых открыто заявил о необходимости комбинирования разных типов требований в процессе формирования спецификации [2]. На рисунке 2 представлен результат такого комбинирования.



Рис. 2. Сводная модель типов требований, предложенная в [2]

Представленная модель содержит типы требований, ориентированные на описание как поведения, так и свойств программы, причем с учетом возможной детализации. Однако, как можно видеть на рисунке, модель включает всего 3 уровня детализации. Это объясняется тем, что она ориентирована на применение спецификации в формате SRS, дополняемой диаграммами прецедентов UML. В рамках этой модели хорошо визуализируется противоречие предметной области, касающееся определения функциональных требований. Есть и другие примеры подобных попыток сопоставления типов разных классификаций, например [14].

Модель, представленная на рисунке 2, также иллюстрирует разногласие авторов в определении места «ограничений». Под этим термином разные исследователи подразумевают пересекающиеся, но неодинаковые множества требований. Поэтому аналитик требований постоянно вынужден решать задачу построения корректной спецификации, в структуре которой предусмотрены типы отношений, характеризующие все аспекты, необходимые для обеспечения свойств спецификации и направленные на проверку разных видов связей между типами требований.

Рассмотрев предложенные модели соотнесения различных типов требований, можно заметить, что при их создании были использованы разные основания, и их применение ориентировано на проверку определенных связей между типами требований, то есть различных свойств спецификации. Согласованная модель типов требований, сочетающая различные подходы и разрешающая вопросы, касающиеся неоднозначного определения места типов в структуре предметной области, должна допускать задание разнообразных связей, отражающих отношения между типами требований.

Очевидно, что просто заменой названий в этом случае не обойтись, так как останутся смысловые различия. Поэтому необходимо сделать объединенную модель более дружелюбной к тем, кто придерживается разных точек зрения на предметную область. Сделать это можно, если нивелировать различия в формулировках, и ориентироваться на суть концептов, для описания которых используются понятия предметной области.

**3. Построение обобщенной модели типов требований к программам на основе теории полевой структуры частей речи.** Согласно теории полевой структуры частей речи, в каждой из них существуют единицы, обладающие полным набором признаков этой части речи. Такие единицы составляют ее ядро. Также существуют единицы, обладающие только частью таких признаков, но все же относящиеся к указанной части речи. Они составляют периферию поля.

Появление этой теории помогло решить проблему, связанную с определением принадлежности спорных лексических единиц к определенным частям речи [15, 16]. Адаптируя теорию полевой структуры к процессу инженерии требований, получим следующие понятия. Поле — это множество типов требований, определяемое набором признаков, значимых при описании определенного аспекта спецификации (поведение системы, место в структуре спецификации и т.д.). Ядро поля — типы требований, обладающие всеми признаками, определенными для описания конкретного поля. Периферия поля — типы требований, частично обладающие признаками, определенными для описания конкретного поля. В процессе адаптации теории полевой структуры для нужд программной инженерии, необходимо определить те признаки, которые являются значимыми для классификации требований. Отнесение типов требований к разным полям призвано решить задачу создания спецификации, для которой выполняется свойство полноты, за счет перечисления всех необходимых аспектов ее описания: поведения и характеристик, назначения системы в целом и нужд конкретных пользователей.

Определим тип требования как формальный набор элементов, призванных отразить атрибуты и формулировку некоторого множества экземпляров требований, имеющих определенную функциональную область применения, уровень детализации и место в структуре спецификации. Гипотеза исследования заключается в том, что на основании характеристик проекта по разработке программного обеспечения для гарантий качества итогового продукта, можно подобрать наиболее подходящую структуру спецификации (набор типов требований с учетом отношений между ними), и этим обеспечить выполнение свойств требований, т.е. качество спецификации.

При решении об отнесении типа требований к конкретному полю рассматривались следующие группы признаков:

1. Уровень детализации экземпляров конкретного типа. Содержит указания на владельца требований и исполнителя, ответственного за реализацию. При формировании спецификации такое описание типов направлено на обеспечение трассировки требований и управления ими.

2. Область применения экземпляров конкретного типа. Каждый экземпляр предназначен для отражения определенного аспекта системы (характеристики программы, функционал, интерфейс, данные). При формировании спецификации описание требований с этой точки зрения позволяет обеспечить ее полноту и трассируемость в разрезе всего процесса программной инженерии.

3. Рекомендации по формулированию экземпляров типа. Отражает группы ситуаций, которым в соответствие можно поставить шаб-

лоны конструкций на естественном языке, чтобы в дальнейшем рекомендовать их в качестве основы для формулирования экземпляров. Данная точка зрения на формулирование экземпляров требований направлена на достижение таких свойств спецификации, как ясность, адекватность и однозначность.

4. Место в структуре документа-спецификации, согласно методологии разработки. Отражает иерархические и иные связи, возможные между экземплярами требований в структуре спецификаций. Например, дублирование требований, или наличие противоречий между ними. При формировании спецификации описание требований с этой точки зрения призвано обеспечить её полноту и непротиворечивость.

В таблице 1 показано, как данные группы признаков были использованы при классификации типов требований на примере типа «функциональное требование» из версии стандарта SWEBOK.

Таблица 1. Характеристика типа «функциональные требования», построенная по результатам изучения SWEBOK

Признаки	Стандарт (методология)	Практические рекомендации
1	2	3
1. Уровень детализации описания экземпляров типа:		
1.1. Бизнес-уровень	1	0,7
1.2. Системный уровень	0,5	0,5
1.3. Пользовательский уровень	0	0
1.4. Уровень функций	0	0
1.5. Уровень реализации	0	0
2. Область применения экземпляров типа:		
2.1. Характеристики ПО	0	0
2.2. Функционал	1	1
2.3.Интерфейс	0	0
2.4. Данные	0,5	0,5
3. Рекомендации по формулированию экземпляров типа:		
3.1. Описание объекта в структуре требования	0,5	1
3.2. Описания действия над объектом в структуре требования	0,5	1
3.3. Описание параметров объекта в структуре требования	0	0
3.4. Описание процесса, связанного с объектом в структуре требования	0	0
3.5. Описание структур данных, связанных с объектом, процессом	0,5	0,5
4. Место в структуре документа-спецификации, согласно методологии разработки		
4.1. Наличие экземпляров-потомков	1	1
4.2. Наличие экземпляра-предка	0,5	1
4.3. Наличие горизонтальных связей между экземплярами.	1	1

В результате для формирования структуры спецификации предлагается использовать следующие поля:

1. Поведение;
2. Характеристики;
3. Высокоуровневое описание;
4. Детализованные требования;
5. Интеграция;
6. Данные.

Решение о принадлежности типа требований к определенному полю принимается на основании того, обладает ли тип требуемым набором признаков. То есть к полям относятся свойства типов. Для каждого типа требований, определяемого в разных идеологиях разработки [2, 8, 11, 13], были построены таблицы, содержащие данные о выраженности исследуемых признаков (как в таблице 1). Для этого используется шкала от «0» до «1», где «1» означает максимальную степень выраженности признака, а «0» — его отсутствие. Были учтены как общие рекомендации методик и стандартов, так и рекомендации специалистов, либо устоявшиеся приемы и методы описания конкретных типов. В таблице 1 этот факт отражен в столбцах 2 и 3. После чего были составлены итоговые таблицы, где были записаны итоговые значения признаков. Если значения признаков различались менее, чем на 0,5, бралось максимальное из них. Если значения признаков согласно стандартам и рекомендациям различались более, чем на 0,5, использовалось среднее значение. В случае если по итоговой сумме значений признаков один тип может быть отнесен к периферии разных полей, анализируются исходные таблицы, и на их основании принимается решение об отнесении типа к периферии конкретного поля. Тип относится к тому полю, где сумма признаков оказалась больше. При построении онтологии в Protégé в структуре класса «Требование» был предусмотрен специальный слот для записи имени альтернативного поля. Когда совпадение значений признаков разных типов составляет более 80%, они определяются как синонимы, и этот факт также отражается в специальном слоте класса «Требование». Данная ситуация возникает, когда разные методологии используют одно основание для классификации, или ссылаются друг на друга.

**4. Реализация структуры спецификации, включающей поля и типы требований.** Признаки, использующиеся для характеристики типов требований, при программной реализации положены в основу шаблонов, позволяющих описывать экземпляры требований. Использование шаблонов предполагает методическую помощь аналитику. Пример шаблона приведен на рисунке 3.

Функциональное требование

Выберите или введите задачу  
 Закрепление бортов за рейсом

Укажите объекты предметной области, с которыми связано требование ?

Рейс

Борт

Добавить объект

Описания функционального требования ?

Объект 1      Опишите связь между двумя объектами предметной области      Объект 2

Борт      Выполняет      Рейс

Объект 1      Опишите связь между двумя объектами предметной области      Объект 2

Борт      Закреплен за      Рейс

Добавить описание связи

Укажите необходимые условия для выполнения действия ?

В систему введены данные о рейсе

Добавить условие

Укажите плановый результат выполнения требования

В окне «выполнение рейса» в выпадающем списке доступны для выбора разные борты

Добавить результат

Общая формулировка требования

Каждому рейсу, доступному в справочнике системы, можно назначить борты, выполняющие его. В справочнике должны отображаться только те борты, которые доступны для вылета в ближайшие 2 часа.

Владелец требования

Агент регистрации

Сохранить

Рекомендовано добавить

Нефункциональные характеристики

Описание структур данных

Введите описание требования в поля шаблона...

Рис. 3. Шаблон типа «функциональные требования»

Шаблоны формируются превентивно, согласно рекомендациям наиболее широко распространенных методик инженерии требований. В шаблоны можно добавлять или исключать элементы, необходимые или лишние для описания экземпляров типа. Набор элементов, которые могут входить в состав шаблона, определен в таблице 1. Данный шаблон предназначен для описания типа «функциональные требования», синонимом которого является тип 6. Его синонимом является тип «поведенческие требования». В структуре шаблона отражено наличие конкретных значений таких фасетов как «уровень детализации» (пользовательский уровень), «область применения» (описание объекта в структуре требования). Такому экземпляру требования соответствует один экземпляр класса «функциональные требования», в слотах которого располагается описание действия над объектами, и два экземпляра класса «Объект», содержащие описание борта и рейса, а также связей между ними. Типы требований, применяемые при формировании спецификации, реализованы с помощью онтологии. Набор признаков (таблица 1) отражен в структуре класса «Требование», который определен как класс-родитель для всех остальных классов, задающих конкретные типы требований.

Для решения проблемы обеспечения выполнения свойств спецификации мы предлагаем использование гибридной модели знаний, включающей фреймовую онтологию, содержащую иерархическое описание типов (классов) требований и ассоциативных связей между ними, и систему правил, основанную на продукционной (логической) модели представления знаний. Формальное детальное описание предлагаемой гибридной модели приведено в [9].

$$Model = \langle O_F, F, P, M \rangle,$$

где  $O_F$  — фреймовая онтология, задающая классы (типы) требований и связи между ними,  $F$  — конечный набор фактов (сохраненных экземпляров требований для конкретной задачи),  $P$  — конечное множество правил, описывающих процедурный компонент системы,  $M$  — гибридный механизм вывода на знаниях. Реализацию выполнения свойств спецификации требований обеспечивает согласованное взаимодействие всех компонент построенной модели под управлением гибридного механизма  $M$ . В частности, реализацию свойств непротиворечивости и полноты спецификации обеспечивает механизм логического вывода на основе правила *Modus Ponens*, обладающий свойствами полноты и непротиворечивости. Реализацию механизма взаимодействия иерархических и ассоциативных отношений онтологии обеспечивает выполнение остальных свойств спецификации.

Основу онтологии составляет построенная в данной работе на основе полевой теории таксономия типов требований, определяющая иерархические связи между ними. Для построения таксономии был проведен анализ различных моделей типов требований [2, 3, 8, 11–13, 17]. При построении таксономии выделяются концепты, основные понятия предметной области, и записываются в качестве классов. Каждый класс содержит набор слотов, в которых могут храниться значения определенных типов, характеризующие конкретные экземпляры классов [18]. Между классами могут быть установлены стандартные отношения [19], например, наследование, или части и целого, в зависимости от возможностей инструмента построения онтологий [18]. Кроме того, можно определять непредусмотренные инструментом отношения, задавая в качестве значений слотов имена объектов других классов онтологии, если это необходимо. Также слоты классов могут быть использованы для хранения понятий синонимов, использующихся для описания концепта предметной области, как, например, в [20]. Таким образом, онтология позволяет описать предметную область инженерии требований, даже с учетом наличия в ней разных точек зрения, предполагающих рассмотрение большого количества близких, но не совсем одинаковых по смыслу терминов.

Совокупность полей охватывает все структурные аспекты спецификаций, применяемые в современных документах, используемых для описания требований. За полями закреплены типы требований на основе совпадения наборов признаков. Для определения принадлежности экземпляра к конкретному типу применяются шаблоны формулировок требований. Типы значений элементов шаблона соответствуют классам онтологии, предназначенным для описания предметной области. Конкретные значения элементов шаблона соответствуют экземплярам типов требований. При вводе в структуру шаблона нового требования, объекты, описанные в нем, и отношения между ними, добавляются в модель предметной области. Для её формирования предусмотрены класс «Объект» и соответствующие слоты в его описании. Между экземплярами класса «Объект» устанавливаются связи посредством задания значений слотов. Таким образом, на основании спецификации формируется модель предметной области, которую визуально может проверить аналитик. Каждый объект связан с конкретной формулировкой требования. Если при проверке модели предметной области в ней отсутствует объект, это является признаком неполноты спецификации. Безусловно, такой способ проверки полноты имеет ограничения в силу того, что на одной схеме нельзя отобразить слишком много объектов и связей. Но для проектов, где спецификация содержит не-

много экземпляров требований и описывает узкую предметную область, способ может быть применен. В качестве примеров такого рода проектов можно привести проекты, разрабатываемые на основе ограниченных спецификаций. В этом случае особенно важно понимать модель предметной области или задачи, так как документация к такого рода проектам заведомо не содержит полных данных.

Онтология, реализованная в среде Protégé, представлена на рисунке 4.

Name	Cardinality	Type	
business_level	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
can_be_itemized_with	required multiple	Instance of Requirement	
data	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
development_and_realisation	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
functionality	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
horizontal_relation	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
interface	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
is_identical_to	required multiple	Instance of Requirement	
level_of_function	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
must_be_added_by	required multiple	Instance of Requirement	
object	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
object_characteristic	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
process	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
recommended_type_of_project	required multiple	Instance of Project_type	
sibling	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
software_product_characteristic	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
statement	single	Instance of Full_Text	
structure_of_related_data	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
system_level	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0
user_level	required single	Float	minimum=0.0, maximum=1.0

Рис. 4. Онтология понятий инженерии требований, реализованная в среде Protégé

Безусловно, применение онтологического подхода для записи требований при разработке узкоспециализированного ПО, имеет свои ограничения. В [21, 22] онтологии используются для формализации и анализа функциональных требований, хотя в [22] указывается на возможность использования онтологии пользовательских задач, для описания поведенческих аспектов будущей системы, то есть части нефункциональных требований.

В обеих представленных работах описание предметной области, используемое для формализации требований составлялось из нескольких онтологий, призванных отразить разные аспекты разрабатываемой системы: структуру, связи между элементами, характеристики и т.д. Развивая такой подход, необходимо предусмотреть онтологии, предназначенные для записи разных аспектов инженерии требований. В первую очередь, онтология типов требований, главная задача которой — отразить таксономию разных типов, с учетом их возможного дублирования и использования разных названий для описания одних и тех же кон-

цептов-классов. Для этого в данную онтологию необходимо добавить другие объекты предметной области инженерии требований, такие как функция, модуль и т.д. А также предусмотреть возможность хранения названий синонимов в слотах классов, описывающих понятия предметной области. Во-вторых, кроме онтологии инженерии требований, необходимо использовать онтологии пользовательских задач, где содержатся описания данных, поведенческой части системы и характеристик проекта. Это позволит соотнести виды спецификаций, представленные в онтологии инженерии требований, и типы проектов, что дает возможность на основании надстройки вывода рекомендовать тот или иной вид спецификации.

**5. Заключение.** В работе описан подход, позволяющий соотнести типы требований, относящиеся к разным классификациям и описывающие разные аспекты документа-спецификации. Его применение с учетом классификации проектов [4] позволяет формировать модели процессов программной инженерии, адаптированные для конкретных условий разработки, а также рекомендовать структуру спецификации, наиболее подходящую для конкретного проекта. Таким образом, аналитик требований и менеджер проекта получают методологическую поддержку, что способствует сокращению трудозатрат и обеспечивает дополнительный контроль качества в ходе разработки.

Совместное использование шаблонов и рекомендаций, касающихся структуры спецификации, призвано помочь аналитику учесть все аспекты описания требований. Таким образом реализуется свойство полноты. Реализация свойства непротиворечивости происходит посредством анализа связей объектов предметной области и требований, связанных с ними.

В работе [23] представлена формальная модель, описывающая взаимосвязь и реализацию таких свойств требований как полнота, целостность и непротиворечивость в процессе создания спецификации. Совместное использование данной модели и полевого подхода к описанию требований дает возможность для дальнейшей разработки методов, позволяющих осуществлять проверку свойств требований, а значит и качества спецификации, в автоматизированном режиме.

## Литература

1. *Brooks F.* No Silver Bullet: Essence and Accidents of Software Engineering // Computer. 1987. vol. 4. pp. 10–19.
2. *Wieggers K., Beatty J.* Software requirements // Microsoft Press. 2014. 637 p.
3. *Roman G.-C.* A Taxonomy of Current Issues in Requirements Engineering // IEEE Computer. 1985. pp. 14–21.
4. *Armin E., Li J.* Requirements Engineering: Technique Selection // In Encyclopedia of Software Engineering. 2011. pp. 962–978.

5. IEEE STD 610.12-1990. Standard Glossary of Software Engineering Terminology // NEW York: IEEE. 1990.
6. *Кулямин В.В. и др.* Формализация требований на практике // М.: ИСП РАН. 2006. 50 с.
7. IEEE Standard 830-1998. IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications // NEW York: IEEE. 1998.
8. *Leffingwell D., Widrig, D.* Managing Software Requirements - A Unified Approach // Addison-Wesley. 2000. 528 p.
9. *Авдеенко Т. В., Бакаев М.А.* Гибридная модель представления знаний для реализации вывода во фреймовой онтологии // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2013. № 3. С. 84–90 .
10. *Avdeenko T.V., Pustovalova N.V., Klavuts I.L.* The Ontology-Based Approach to Support the Requirements Engineering Process // In Proceedings of the 10 International Forum on Strategic Technology (IFOST-2015). Indonesia. 2015. pp. 70.
11. ГОСТ 19.201-78. Единая система программной документации. Техническое задание. Требования к содержанию и оформлению // М.: СТАНДАРТИНФОРМ. 2005.
12. ГОСТ 34.602-89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы // М.: ИПК ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ. 2004.
13. *Орлик С.* Основы Программной Инженерии (по SWEBOK) // URL: [http://swebok.sorlik.ru/1\\_software\\_requirements.html](http://swebok.sorlik.ru/1_software_requirements.html). (дата обращения: 28.01.2014).
14. *Cockburn A.* Writing Effective Use Cases // Addison-Wesley. 2001. 304 p.
15. *Терпак М.А.* Фреймвая модель как способ структурирования и анализа концептов // URL: <http://vestnik-samgu.samsu.ru/gum/2006web51/yaz/2006510505.pdf>. (дата обращения: 28.01.2014).
16. *Бондаренко А.В.* Проблемы функциональной грамматики. Полевые структуры // Спб.: Наука. 2005. 480 с.
17. *Булуй Ю.И.* Классификация типов требований к программному обеспечению и ее представление в стандартах и методологиях // URL: [http://www.uml2.ru/index.php?option=com\\_remository&Itemid=28&func=fileinfo&id=135](http://www.uml2.ru/index.php?option=com_remository&Itemid=28&func=fileinfo&id=135) (дата обращения: 28.01.2014).
18. *Noy N.F., McGuinness D.L.* Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology. Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880 // URL: [http://protege.stanford.edu/publications/ontology\\_development/ontology101.html](http://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.html) (дата обращения: 28.01.2014).
19. *Найханова Л.В.* Основные типы семантических отношений между терминами предметной области // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Пенза. 2008. № 1. С. 62–71.
20. *Кортиков Ф.С.* Семантическое описание электронного документа с использованием онтологии предметной области // Труды СПИИРАН. 2013. № 8(31). С. 218–222.
21. *Шалфеева Е.А.* Возможности использования онтологий при разработке и сопровождении программных систем // ИАПУ ДВО РАН. Владивосток. 2011. 16 с.
22. *Шалфеева Е. А.* Модель связи структурных свойств онтологии со структурой модели требований системы, основанной на редактируемых знаниях // Искусств. интеллект. Донецк. 2009. № 4. С. 472–481.
23. *Zowghi D., Gervasi V.* The Three Cs of Requirements: Consistency, Completeness, and Correctness // In Proceedings of 8th International Workshop on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality (REFSQ'02). 2002. pp. 155–164.

## References

1. Brooks F. No Silver Bullet: Essence and Accidents of Software Engineering. *Computer*. 1987. vol. 4. pp. 10–19.
2. Wieggers K., Beatty J. Software requirements. *Microsoft Press*. 2014. 637 p.
3. Roman G.-C. A Taxonomy of Current Issues in Requirements Engineering. *IEEE Computer*. 1985. pp.14–21.
4. Armin E., Li J. Requirements Engineering: Technique Selection. In *Encyclopedia of Software Engineering*. 2011. pp. 962–978.
5. IEEE STD 610.12-1990. Standard Glossary of Software Engineering Terminology. NEW York: IEEE. 1990.
6. Kuliamin V.V., et al. *Formalizatsiia trebovanii na praktike*. [Requirements formalization in practice]. M.: ISP RAN. 2006. 50 p. (In Russ.).
7. IEEE STD 610.12-1990. Standard Glossary of Software Engineering Terminology. NEW York: IEEE. 1990.
8. Leffingwell D., Widrig, D. *Managing Software Requirements - A Unified Approach*. Addison-Wesley. 2000. 528 p.
9. Avdeenko T.V., Bakaev M.A. [Hybrid model of knowledge representation for inference realization in frame-based ontology]. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta – Scientific bulletin of Novosibirsk state technical university*. 2013. vol. 3. pp. 84–90. (In Russ.).
10. Avdeenko T.V., Pustovalova N.V., Klavuts I.L. The Ontology-Based Approach to Support the Requirements Engineering Process. In *Proceedings of the 10 International Forum on Strategic Technology (IFOST-2015)*. Indonesia. 2015. pp. 70.
11. GOST 19.201-78. [Unified system for program documentation. Technical specifications for development. Requirements to contents and form of presentation]. M.: Standartinform. 2005. (In Russ.).
12. GOST 34.602-89. [Information technology. Set of standards for automated systems. Technical directions for developing of automated system]. M.: IPK IZDATEL"STVO STANDARTOV. 2004. (In Russ.).
13. Orlik C. *Osnovy Programnoi Inzhenerii (po SWEBOK)*. [Basic Software Engineering: SWEBOK]. Available at: [http://swebok.sorlik.ru/1\\_software\\_requirements.html](http://swebok.sorlik.ru/1_software_requirements.html). (accessed 28.02.2014). (In Russ.).
14. Cockburn A. *Writing Effective Use Cases*. Addison-Wesley. 2001. 304 p.
15. Terpak M.A. *Freimovaia model' kak sposob strukturirovaniia i analiza kontseptov*. [Frame model as a way to organize and analyze concepts]. Available at: <http://vestnik-samgu.samsu.ru/gum/2006web51/yaz/2006510505.pdf> (accessed 28.01.2014). (In Russ.). (In Russ.).
16. Bondarenko A.V. *Problemy funktsional'noi grammatiki. Polevye struktury* [Problems of functional grammar. Field structure]. St. Petersburg, Nauka. 2005. 480 p. (In Russ.).
17. Buluj Y.I. *Klassifikatsiia tipov trebovanii k programmnomu obespecheniiu i ee predstavlenie v standartakh i metodologiiakh*. [Classification of requirements types and its representation as standards and techniques]. Available at: [http://www.uml2.ru/index.php?option=com\\_remository&Itemid=28&func=fileinfo&id=135](http://www.uml2.ru/index.php?option=com_remository&Itemid=28&func=fileinfo&id=135) (accessed 28.01.2014). (In Russ.). (In Russ.).
18. Noy N.F., McGuinness D.L. *Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology*. Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics Technical Report SMI-2001-0880. Available at: [http://protege.stanford.edu/publications/ontology\\_development/ontology101.html](http://protege.stanford.edu/publications/ontology_development/ontology101.html) (accessed 28.01.2014).
19. Naikhanova L.V. [The main types of semantic relationships between terms of domain area]. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tehniceskie nauki –*

*Proceedings of the higher educational institutions. Volga region. Technical science.* Penza. 2008. vol. 1. 62–71 pp. (In Russ.).

20. Kortikov F.S. [The semantic description of electronic document using the domain ontology]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 8(31). pp. 218–222. (In Russ.).
21. Shalfeeva E.A. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya ontologii pri razrabotke i soprovozhdenii programmyh sistem* [A possibility of using ontology during software development process and maintenance]. Vladivostok: IAPU DVO RAN. 2011. 16 p. (In Russ.).
22. Shalfeeva E. A. [Model of relationships between structural properties of ontology and structure of system requirements model that based on editing knowledge]. *Iskusstv. intellekt – Artificial intelligent*. Donetsk. 2009. vol. 4. pp. 472–481. (In Russ.).
23. Zowghi D., Gervasi V. The Three Cs of Requirements: Consistency, Completeness, and Correctness. In *Proceedings of 8th International Workshop on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality (REFSQ'02)*. 2002. pp. 155–164.

**Пустовалова Наталья Викторовна** — старший преподаватель кафедры экономической информатики факультета бизнеса, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: инженерия требований, программная инженерия. Число научных публикаций — 18. Natalja.ru@gmail.com, <http://ciu.nstu.ru/kaf/persons/22294/about>; пр. К. Маркса, 20 к.6, ауд 601, Новосибирск, 630073; р.т.: +7(383) 346-0679.

**Pustovalova Natalya Victorovna** — senior lecturer of computer science in economics department of business faculty, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Research interests: requirements engineering, software engineering. The number of publications — 18. Natalja.ru@gmail.com, <http://ciu.nstu.ru/kaf/persons/22294/about>; 20 k. 6, aud. 601, K. Marksa pr., Novosibirsk, 630073, Russia; office phone: +7(383) 346-0679.

**Авдеенко Татьяна Владимировна** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой экономической информатики факультета бизнеса, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: интеллектуальные информационные системы, нечеткие вычисления. Число научных публикаций — 110. [tavdeenko@mail.ru](mailto:tavdeenko@mail.ru), <http://ciu.nstu.ru/kaf/persons/818>; пр. К. Маркса, 20 к.6, ауд. 601, Новосибирск, 630073; р.т.: +7(383) 346-0679.

**Avdeenko Tatyana Vladimirovna** — Ph.D., Dr. Sci., professor, head of computer science in economics department of business faculty, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Research interests: intelligent information system, fuzzy computation. The number of publications — 110. [tavdeenko@mail.ru](mailto:tavdeenko@mail.ru), <http://ciu.nstu.ru/kaf/persons/818>; 20 k. 6, aud. 601, K. Marksa pr., Novosibirsk, 630073, Russia; office phone: +7(383) 346-0679.

## РЕФЕРАТ

### *Пустовалова Н.В., Авдеенко Т.В.* **Построение согласованной модели требований для процесса программной инженерии.**

В работе описан онтологический подход к формированию качественной спецификации требований, удовлетворяющей свойствам требований. Рассмотрены основные подходы к формированию спецификаций, типы требований, используемые в разных документах. На основании результатов анализа различных моделей требований предлагается использовать теорию полевой структуры частей речи для формирования согласованной модели требований, учитывающей все аспекты написания спецификации. Представлен набор критериев, используемых для определения принадлежности экземпляра требования к определенному типу, и типа к полю. Описан метод, которым построена онтологическая модель для решения задачи формирования спецификации требований, где обеспечиваются свойства требований.

Приводится краткое описание онтологии, применяемой для реализации полевого подхода в процессе инженерии требований. Приведен пример шаблона, предназначенного для работы с экземплярами требований в разрабатываемой среде.

## SUMMARY

### *Pustovalova N.V., Avdeenko T.V.* **Building a Harmonized Model of Requirements for Software Development Process.**

The paper describes an ontological approach to generate a high-quality requirements specification that meets the requirements properties. The main approaches to the requirement specifications development as well as different requirement types, used in different documents, are considered. Based on the results of the analysis of various requirement type models, we propose to use the field theory of parts of speech as a basis for a coherent model of requirements, taking into account all aspects of writing specifications. It presents a set of criteria used to identify the type and field for requirements. The paper presents a method of building an ontological model for the quality requirements specifications ensuring requirements properties.

A brief description of the ontology used to implement the field theory-based approach for requirements engineering process is given. An example of a software template for the requirement instance implementation is presented.

Б.Г. ИЛЬЯСОВ, Е.А. МАКАРОВА, Е.Ш. ЗАКИЕВА, Н.А. ЖУРАВЛЕВА  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ И  
УПРАВЛЕНИЯ СОЦИАЛЬНОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ**

---

*Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Закиева Е.Ш., Журавлева Н.А.* **Моделирование процессов формирования и управления социальной напряженностью.**

**Аннотация.** В работе предложена динамическая модель формирования социальной напряженности, представленная в виде нелинейных дифференциальных уравнений. Проведены исследования разработанной модели, которые позволили изучить динамические особенности процесса формирования социальной напряженности, а также оценить эффективность управления уровнем социальной напряженности.

**Ключевые слова:** социальная напряженность, степень удовлетворенности, степень неудовлетворенности, интегральный показатель, динамическая модель.

*Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Zhuravleva N.A.* **Modeling of Processes of Formation and Management of Social Tension.**

**Abstract.** In the paper, the dynamic model of social tension formation, presented in the form of the nonlinear differential equations, is proposed. The research of the developed model is conducted, which allowed one to study the dynamic features of the process of social tension formation and to estimate the efficiency of managing the social tension level.

**Keywords:** social tension; satisfaction degree; dissatisfaction degree; integral indicator; dynamic model.

---

**1. Введение.** В настоящее время с особой остротой встает проблема обеспечения социальной стабильности как основы национальной безопасности и устойчивого развития современного общества. Национальная безопасность зависит не только от объема накопленного военного потенциала, структуры и состава Вооруженных Сил, но и от того, насколько своевременно разрешаются социально-экономические, общественно-политические, политико-правовые и другие противоречия, затрагивающие жизненно важные интересы и потребности как личности, так и общества в целом, а также государства.

Основой обеспечения стабильности является повышение качества жизни и снижение социальной напряженности как одного из его элементов [1]. Необходимость комплексного решения проблем повышения качества жизни населения и снижения социальной напряженности обусловлена взаимосвязью данных показателей: повышение качества жизни населения способствует социальной стабильности, уменьшению социальной напряженности, и наоборот, ненапряженное спокойное безопасное состояние общества способствует росту качества жизни. Здесь под социальной напряженностью будем понимать его беспокойное тревожное состояние, готовое разразиться чем-то негативным, например, социальным конфликтом. Такое состояние требует

постоянного внимания и определенных неослабевающих усилий со стороны государства.

В современной социологии эффективность жизни (удовлетворенность жизнью) оценивается такими терминами, как уровень жизни, благосостояние, счастье, качество жизни, безопасность жизни, ресурсообеспеченность жизни, социальная напряженность или тревожность и т.д. По-видимому, эти показатели переплетаются друг с другом, а эффективность жизни является результатом их системного объединения.

Причины социальной напряженности могут отражаться как объективными показателями развития политической, экономической и социальной сфер, так и субъективными показателями, которые формируются в сознании и поведении людей.

Наиболее общие предпосылки напряженности — это наличие устойчивой и длительное время неразрешимой ситуации рассогласования между потребностями, интересами, социальными ожиданиями всей массы (или значительной части населения) и степенью их фактического удовлетворения, приводящей к накоплению недовольства, усилению агрессивности отдельных групп и категорий людей, нарастанию психической усталости и раздражительности большинства.

Таким образом, социальная напряженность возникает, когда большинство людей ощущает невозможность удовлетворить свои социальные, экономические, политические, национальные, культурные, духовные или какие-либо иные жизненно важные потребности, т.е. отражает степень неудовлетворенности населения.

Социальную напряженность достаточно часто связывают с возникновением конфликтов, при этом она предшествует конфликтам, но необязательно переходит в них. Она признается социальным явлением, которое в том или ином виде постоянно присутствует в обществе. Социальная напряженность фактически содержит в себе потенциал возможного конфликта, который актуализируется при определенных условиях. Исследование социальной напряженности дает возможность изучать социальные конфликты на стадии их зарождения и формирования, а также позволяет получать данные для корректной выработки решений в области управления конфликтами.

За последние десятилетия Россия претерпела множество изменений, которые в той или иной степени спровоцировали различные конфликты. Опасность конфликтов заключается в том, что они могут привести не только к позитивным, но и к негативным последствиям, касающимся как отдельных индивидов, так и общества в целом. Однако обязательная эскалация в случае конфликтной ситуации — это не единственно возможный сценарий. Конфликты необходимо предупре-

ждать, то есть предотвращать их на стадии зарождения, что позволит избежать негативных последствий и снизить затраты на управление ими и их разрешение. Контроль над конфликтами предполагает целенаправленные действия властных структур и включает в себя целый ряд мероприятий: предупреждение или предотвращение, прогнозирование, урегулирование, разрешение [2,3].

Показателей, используемых при анализе социальной напряженности, достаточно много. К ним можно отнести, например, показатели отдельных параметров качества жизни населения [4]; степень неудовлетворенности состоянием дел в различных сферах жизни; степень неудовлетворенности жизненно важных потребностей, неудовлетворенность в сохранении ценностей социальных субъектов [5]; степень неудовлетворенности деятельностью местных властей, порождающих низкий уровень доверия политическим институтам [6] и др.

В научной литературе выделяют различные стадии развития напряженности. На начальной стадии среди определенных групп формируется неудовлетворенность положением в важных сферах жизни, начинают распространяться пессимистические настроения. Однако на данной стадии активные формы проявления недовольства или протеста еще не присутствуют. Но уже на второй стадии предпринимаются попытки найти виновного в сложившейся ситуации, при этом снижается уровень доверия местным властям, проявляемое недовольство начинает приобретать более острые формы, проявляясь в различных акциях протеста, в межэтнических конфликтах. «Широкая распространенность социального недовольства при определенных условиях может повлечь за собой нарушение механизмов саморегуляции и ухудшение функционирования основных подсистем общества, распространение практики применения насилия при решении основных социальных проблем» [7]. Но это уже этап, на котором социальная напряженность переходит в конфликты. Некоторые авторы выделяют и третью стадию социальной напряженности, связанную со снижением напряженности «постепенным исчезновением показателей, характерных для этого состояния общественной жизни» [6]. Авторы [4] выделяют четыре стадии: латентную (скрытую), начальную, стадию явной социальной напряженности и стадию социального конфликта.

Основная задача авторов данной статьи состоит в разработке математической модели для анализа возникновения и роста социальной напряженности общества и возможности ее снижения различными управляющими мероприятиями.

**2. Динамическая модель формирования социальной напряженности.** Разработка модели ведется на основе следующих концептуальных положений.

1. Рассматривается процесс функционирования и развития социальной системы, который характеризуется степенью удовлетворенности населения различными аспектами жизнедеятельности, объединенными в три группы: удовлетворенность благосостоянием; удовлетворенность политикой местных властных структур; удовлетворенность состоянием межнациональных отношений.

2. Сформулирована цель функционирования и развития социальной системы, на основе которой определен желаемый уровень удовлетворенности, достижимый с учетом ресурсных возможностей системы.

3. Наличие некоторой степени неудовлетворенности в обществе считается объективным состоянием и рассматривается как необходимый стимул для развития социальной системы. Поэтому процесс функционирования и развития социальной системы считается стабильным и устойчивым, если в обществе даже присутствует латентная неудовлетворенность, которая не превышает заданный уровень.

4. В качестве внешних возмущений рассматриваются причины социального, экономического и политического характера, которые вызывают рост напряженности в социальной системе.

5. В качестве управляющих воздействий, направленных на снижение уровня напряженности, рассматриваются две группы: воздействия, связанные с дополнительным расходом финансовых ресурсов, направленным на повышение уровня благосостояния населения; и воздействия, направленные на повышение качества организации и управления функционированием подсистем социальной системы.

Перечисленные положения дополнены рядом допущений, принятых при моделировании.

Во-первых, несмотря на то что различным слоям общества присущи различные степени удовлетворенности, считается, что в целом социальная система может быть охарактеризована интегральным уровнем удовлетворенности, который отражает существующий уровень развития системы.

Во-вторых, выделение только трех групп различных аспектов удовлетворенности, по мнению авторов, признается достаточным для того, чтобы выявить механизм воздействия на неблагоприятные ситуации с целью снижения уровня напряженности. Расширение состава и количества групп различных аспектов удовлетворенности в принципе не представляет сложности.

В-третьих, экономические и социальные аспекты удовлетворенности, обеспечивающие благосостояние, объединены в одну группу, поскольку рассматриваемый механизм компенсации соответствующей неудовлетворенности является единым и состоит в дополнительном расходе финансовых ресурсов.

В-четвертых, предполагается, что состояние напряженности, выраженное в виде текущего уровня удовлетворенности, не изменяется в процессе функционирования социальной системы, что признается допустимым на достаточно среднесрочных и краткосрочных периодах планирования и прогнозирования ее состояния.

При разработке динамической модели социальной напряженности, как отмечалось, учитывались состояния трех основных сред, которые характеризуются значением интегрального показателя  $X_i$  соответствующей среды:

- состояние социально-экономической среды ( $X_1$ );
- состояние общественно-политической среды ( $X_2$ );
- состояние межнациональных отношений в социальной среде ( $X_3$ ).

Интегральный показатель  $X_1$  включает в себя такие факторы как удовлетворенность высоким уровнем жизни, материальным положением, высоким статусом в обществе, содержательной стороной выполняемой работы, благосостоянием семьи, личным благосостоянием, безопасностью жизнедеятельности и т.д.

Интегральный показатель  $X_2$  включает в себя удовлетворенность деятельностью как местных, так и федеральных органов власти, удовлетворенность проводимыми политическими преобразованиями и мероприятиями, удовлетворенность неагрессивными, а дипломатическими законными формами деятельности оппозиционных политических партий и движений, удовлетворенность системой здравоохранения, образования, обеспечения лекарствами и т.д.

Интегральный показатель  $X_3$  включает в себя удовлетворенность отношением к иным национальностям, к людям, исповедующим другую веру, терпеливое и понимающее отношение к эмигрантам, желание оказать помощь другим людям (пострадавшим от пожара, стихийных бедствий, войны, страшных болезней и т.д.)

Если в модели  $X_1=X_2=X_3=1$ , то это означает полную удовлетворенность качеством жизни. Однако в каждой из перечисленных сред в реальной жизни объективно существует определенная степень  $\alpha_i$ ,  $i = 1,2,3$ , неудовлетворенности, рост которой и порождает рост социальной напряженности в целом, то есть в реальной жизни  $X_i < 1$ .

В тоже время в любом обществе существует латентная (скрытая) социальная напряженность, малая по величине, неагрессивная по сути и играющая своей критической направленностью положительную роль в развитии общества в целом.

Поэтому описание модели социальной напряженности начнем с этой части.

Уравнение социальной напряженности  $H$ :

$$H = W_0(p)E_H,$$

где  $E_H$  — отклонение социальной напряженности;

$W_0(p) = \frac{k_0}{p(\tau^2 p^2 + 2\xi\tau p + 1)}$  — передаточный оператор восприятия и преобразования отклонения  $E_H$ ;  $k_0$  — коэффициент передачи,  $\xi$  — коэффициент самодемпфирования, коэффициенты  $k_0$  и  $\xi$  оценивают восприятие населением отклонения  $E_H$ ;  $\omega_0 = \frac{1}{\tau}$  — собственная частота восприятия отклонения  $E_H$ ;  $p$  — оператор дифференцирования.

Уравнение отклонения социальной напряженности:

$$E_H = H^0 - H + \delta,$$

где  $H^0$  — начальный латентный уровень социальной напряженности;  $H$  — текущий уровень социальной напряженности;  $\delta$  — рост напряженности, определяемый как результат отклонения текущей удовлетворенности  $Y$  от полной удовлетворенности  $Y^0$ :

$$\delta = Y^0 - Y.$$

Уравнение текущей удовлетворенности как интегральный показатель удовлетворенности трех сред:

$$\dot{Y} = -k_4 Y + X_1 X_2 X_3,$$

где  $\frac{1}{k_4} = \tau_4$  — постоянная времени изменения текущей удовлетворенности.

Далее перейдем к рассмотрению той части модели, которая формирует степень удовлетворенности в трех средах.

Уравнение формирования степени удовлетворенности  $X_{i0}$   $i$ -й среды выделенными ресурсами:

$$\dot{X}_{i0} = -k_i X_{i0} + R^0,$$

где  $R^0$  — объем выделенного ресурса для удовлетворения социальных потребностей;  $k_i$  — коэффициент самоорганизации  $i$ -й среды (местные отрицательные обратные связи).

Уравнение текущей удовлетворенности  $i$ -й среды:

$$X_i = X_{i0} - \alpha_i,$$

где  $\alpha_i$  — степень интегральной неудовлетворенности  $i$ -й среды.

Уравнение формирования степени интегральной неудовлетворенности  $\alpha_i$   $i$ -й среды:

$$\alpha_i = r_i \mu_i H,$$

где  $r_i$  — коэффициент снижения степени неудовлетворенности за счет увеличения ресурсной дотации  $\Delta R$  в социальную систему:

$$r_i = \frac{R^0}{R^0 + \Delta R} < 1;$$

$\mu_i$  — коэффициент влияния текущей социальной напряженности  $H$  на неудовлетворенность  $i$ -й среды (положительная обратная связь); в качестве допущения принято, что для всех сред  $r_i$  имеет равные значения.

Уравнение ресурсной дотации  $\Delta R$ :

$$\Delta R = W_d(p) \delta H,$$

где  $W_d(p) = \frac{k_d}{\tau_d p + 1}$  — передаточный оператор дотации социально-экономической среды;  $k_d$  — коэффициент интенсивности освоения ресурсной дотации;  $\tau_d$  — постоянная времени изменения ресурсной дотации. Предполагается, что рост дотации  $\Delta R$  в социальную систему должен расти (до некоторого предела) по мере роста социальной напряженности  $\delta$  населения, но не превышать 50% от объема выделенных ресурсов.

Адекватность данной динамической модели основана на анализе наблюдений реальных поведений социальной системы, изложенных в работах авторов [8,9] и других исследователей [2,10–12].

### **3. Моделирование динамики социальной напряженности.**

Целью исследования является оценка качественного влияния различных факторов на изменение социальной напряженности на основе раз-

работанной модели. Исследования проводятся в пакете математического моделирования *MatLab* (приложение *Simulink*).

В качестве базового варианта функционирования выбран режим, соответствующий спокойному устойчивому состоянию социальной системы и характеризующийся наличием только латентной напряженности. В таком режиме функционирования социальной системы значения параметров модели равны:  $R^0=1$ ,  $Y^0=1$ ,  $H^0=0.1$ ,  $\mu_1=\mu_2=\mu_3=0$ ,  $k_0=0.4\text{ с}^{-1}$ ,  $k_4=0.1\text{ с}^{-1}$ ,  $\tau=0.2\text{ с}$ ,  $\xi=1$ ,  $k_d=0$  и текущее значение социальной напряженности  $H$  равно значению латентной напряженности  $H^0=0.1$ .

График переходного процесса для базового режима функционирования социальной системы приведен на рисунке 1 (по оси  $X$  отложено модельное время  $t$ , по оси  $Y$  — значение (уровень) текущей напряженности  $H$ ).

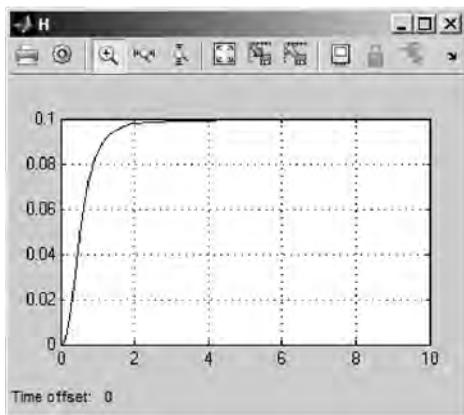


Рис. 1. Базовый режим функционирования

Задачей *первой группы* исследований являлась оценка влияния уровня текущей напряженности  $H$  на неудовлетворенность  $\alpha_i$   $i$ -й среды (влияние положительной обратной связи в системе). В рамках решения данной задачи были последовательно увеличены значения коэффициентов  $\mu_i$  от  $\mu_i=0.1$  до  $\mu_i=0.8$ . Отметим, что определение диапазона изменения параметров составляет самостоятельную задачу, которая в данном исследовании не рассматривалась.

В результате проведенных исследований разработанной модели была выявлена нелинейная зависимость влияния уровня текущей напряженности на неудовлетворенность  $i$ -й среды (рис. 2).

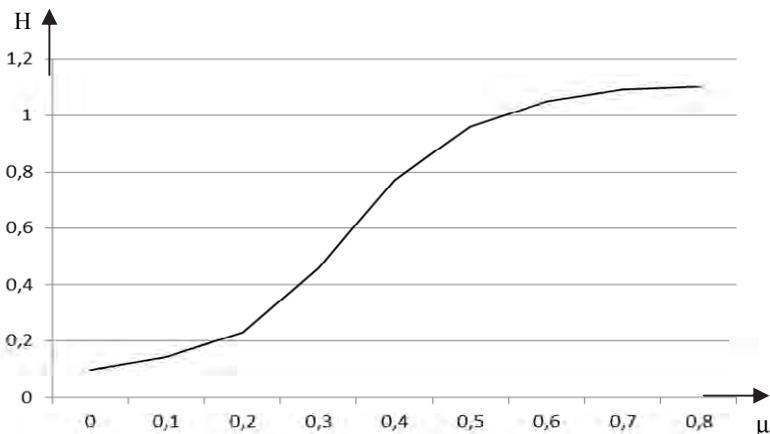


Рис. 2. Зависимость уровня текущей напряженности на неудовлетворенность  $i$ -й среды

Задачей *второй группы* исследований являлась оценка влияния «чувствительности» общества к уровню социальной напряженности. В рамках решения данной задачи были изменены коэффициенты  $k_0$  и  $\xi$  ( $k_0=4$ ,  $\xi=0.75$ ) при  $\mu_i=0.2$ . В этом случае имеет место колебательный переходный процесс, что свидетельствует о нестабильном, тревожном состоянии населения (рисунок 3).

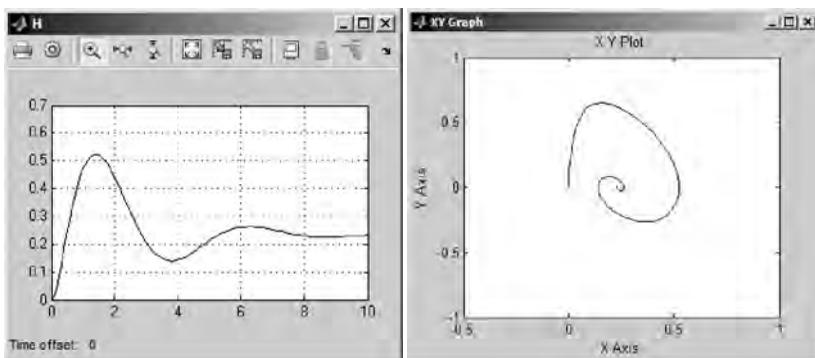


Рис. 3. График переходного процесса и фазовый портрет (зависимость скорости изменения напряженности  $\dot{H}$  от уровня напряженности  $H$ ) системы при  $k_0 = 4$  и  $\xi = 2.5$

Результаты исследований подтверждают выводы авторов [2] о том, что материалы социологических опросов населения позволяют

определить лишь часть компонентов, необходимых для анализа социальной напряженности. Анализ данных социологических опросов позволяет выявить, какие установки в обществе преобладают: негативные или позитивные. Однако на основе этих данных затруднительно определить, происходит ли у населения страны формирование готовности к различным формам протестных действий с целью исправления сложившейся ситуации. Это объясняется психологическим состоянием (настроением) населения. Одной из самых серьезных проблем остается определение момента и условий перерастания социальной напряженности в конфликт.

Задачей *третьей группы* исследований являлась оценка влияния величины начального (латентного) уровня социальной напряженности на состояние социальной системы. В рамках решения данной задачи значение  $N^0$  было увеличено от  $N^0 = 0.1$  до  $N^0 = 0.7$  при  $\mu_i = 0.2$ ,  $k_0 = 8$ ,  $\xi = 0.5$ . В этом случае в системе устанавливаются автоколебания как результат психологических тревожных волнений в период кризисных состояний (рис. 4).

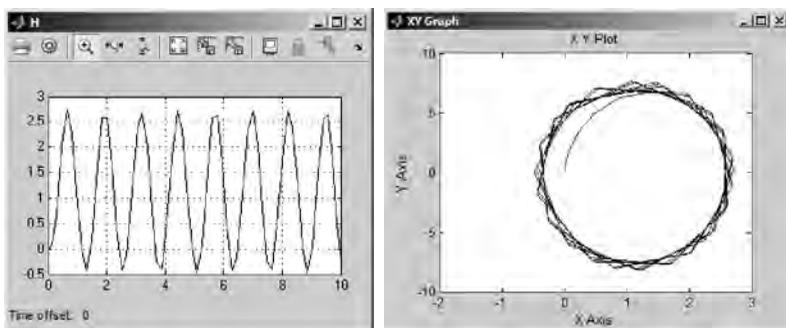


Рис. 4. График переходного процесса и фазовый портрет системы при  $N^0 = 0.7$

Результаты исследований подтверждают вывод автора [10] о том, что с ухудшением социальной ситуации в стране увеличение латентного уровня социальной напряженности может привести к резкому (скачкообразному) увеличению явных признаков социальной напряженности и развитию ее в сторону предкризисного, а затем и кризисного состояния. К тому же кризисное состояние государственности, будучи усиленным предкризисным, а затем и кризисным состоянием социальной напряженности, может направить развитие нашего общества в сторону социальной катастрофы, и, следовательно, в сторону ослабления устойчивости системы национальной безопасности и ее дальнейшего разрушения.

Задачей *четвертой группы* исследований являлась оценка эффективности проводимых экономических мероприятий по снижению уровня социальной напряженности. В рамках решения данной задачи были последовательно увеличены значения коэффициентов  $\mu_i$  от  $\mu_i = 0.2$  до  $\mu_i = 0.4$ , при этом для каждого значения  $\mu_i$  рассчитывались коэффициенты  $k_{эi}$  эффективности вложения дополнительных ресурсов для снижения социальной напряженности  $k_{эi} = \frac{\Delta R_i}{\Delta H_i}$ .

Результаты исследований показали, что при  $\mu_i = 0.2$ ,  $k_{э1} = 14$ , при  $\mu_i = 0.3$ ,  $k_{э2} = 3.9$ , при  $\mu_i = 0.4$ ,  $k_{э3} = 2.5$ . Следовательно, чем выше уровень текущей напряженности, тем меньше эффективность вложения дополнительных ресурсов в социальную систему и необходимо проведение организационно-структурных изменений.

Задачей *пятой группы* исследований являлась оценка эффективности проводимых организационных мероприятий по снижению уровня социальной напряженности. В рамках решения данной задачи были изменены значения коэффициентов обратной связи  $i$ -й среды  $k_i$ . Результаты исследований показали, что при увеличении  $k_i$  на 10% (от  $k_i = 1$  до  $k_i = 1.1$ ) уровень текущей напряженности  $H$  вырос почти в три раза (от  $H = 0.23$  до  $H = 0.61$ ), что может привести к возникновению конфликта в социальной системе.

Результаты исследований также показали, что при уменьшении значений коэффициентов обратной связи  $k_i$  на 1% (от  $k_i = 1$  до  $k_i = 0.99$ ) уровень текущей напряженности  $H$  снизился на 26% (от  $H = 0.23$  до  $H = 0.17$ ), при уменьшении  $k_i$  на 2% уровень текущей напряженности  $H$  снизился на 43,5% (от  $H = 0.23$  до  $H = 0.1$ ). Таким образом, даже при небольшом уменьшении значений  $k_i$ , что означает увеличение степени самоорганизации системы, уровень социальной напряженности значительно уменьшается.

Результаты исследований подтверждают выводы специалистов Института глобализации и социальных движений. Авторы доклада [11] отмечают рост социальной напряженности в России и по их мнению нехватка бюджетных средств не является главной причиной кризиса социального сектора. Проводимая социальная политика существенно усугубляет экономическую ситуацию, углубляя кризис, сокращая совокупный спрос, блокируя инициативу граждан, ухудшая инвестиционный климат для малого и среднего бизнеса, деморализуя и демотивируя работников.

Властные структуры пытаются поддержать внутренний спрос и тем самым демпфировать кризис при помощи политики жесткой экономики. Социальный блок правительства стремится перекладывать ответственность за происходящее на финансовые власти, которые выделяют недостаточно денег для разрешения социального конфликта.

По мнению авторов доклада [11] и авторов статьи, социальная сфера функционирует неэффективно. При общем сокращении финансирования эффективность вкладываемых в социальную систему денег стремительно падает, управляемость понижается, вместо самоорганизации системы и установления тотального контроля деятельности властных структур система движется к хаосу. Следовательно, необходимы структурные организационные преобразования системы управления социальной сферой.

**4. Заключение.** Проведенные исследования позволили изучить динамические особенности процесса формирования социальной напряженности. По результатам проведения имитационных экспериментов выявлено, что вливание дополнительных финансовых средств в социальную систему не приводит к значительному снижению уровня социальной напряженности. Показано, что правильно проведенные мероприятия по самоорганизации сред оказывают значительно большее влияние на снижение уровня социальной напряженности, чем вложение дополнительных ресурсов. Это означает необходимость совершенствования проводимых структурных и организационных мероприятий при росте социальной напряженности.

### Литература

1. *Бурдаков В.П.* Эффективность жизни. Введение в экоматерику // М.: Энергоатомиздат. 1997. 304 с.
2. *Пинкевич А.Г.* Возможности изучения социальной напряженности в России на основе данных Европейского социального исследования // Мир России. 2015. №1. С. 150–169.
3. *Внукова Л.Б.* Факторы социально-политической напряженности в регионах // Современные исследования социальных проблем. 2011. № 4. URL: <http://sisp.nkras.ru/issues/2011/4/vnukova.pdf> (дата обращения 22.11.2015).
4. *Баранова Г.В., Фролов В.А.* Методология и методика измерения социальной напряженности // Социологические исследования. 2012. №3. С. 50–64.
5. *Кужонков П.И.* Социальные напряжения и структурные конфликты в регионах России: некоторые исследовательские подходы // Вестник Нижегородского университета. URL: [http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990201\\_West\\_soc\\_2004\\_1\(3\)/21.pdf](http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990201_West_soc_2004_1(3)/21.pdf) (дата обращения 15.10.2015).
6. *Назайцев В.В., Пустовалова Е.В.* Уровень социальной напряженности и конфликтности в системе показателей социального благополучия населения региона // Известия Алтайского государственного университета. 2010. №2. С. 209–213.
7. Социальные конфликты: экспертиза, прогнозирование, технологии разрешения // М.: Едиториал УРСС. 2004. Выпуск 19. 328 с.
8. *Ильясов Б.Г., Исмагилова Л.А., Закиева Е.Ш.* Системный подход к построению математической модели социально-экономической и политической системы как единого динамического комплекса // Информатизация образования и науки. Изд. ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информика». 2015. №4 (28). С. 148–156.
9. *Доломатов М.Ю., Мартынов В.В., Журавлева Н.А., Филосова Е.И., Закиева Е.Ш.* Информационная система расчета социальной напряженности общества на основе применения законов равновесной термодинамики // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 4 (41). С. 163–179.

10. *Тепечин В. И.* Социальная напряженность в контексте проблемы национальной безопасности России // URL: <http://b-i.narod.ru/sos.htm> (дата обращения 20.10.2015).
11. Кризис социальной политики. Доклад Института глобализации и социальных движений // URL:[http://igso.ru/articles.php?article\\_id=545](http://igso.ru/articles.php?article_id=545) (дата обращения 10.10.2015).
12. *Ожиганов Э.Н.* Политическая напряженность: имитационное моделирование и раннее предупреждение // Аналитический вестник. 2008. №9 (354). С. 10–21.

## References

1. Burdakov V.P. *Jeffektivnost' zhizni. Vvedenie v jekomatemiku* [Efficiency of life. Introduction to an ekomatemika]. М.: Jenergoatomizdat, 1997. 304 p. (In Russ.).
2. Pinkevich A.G. [Possibilities of studying of social tension in Russia on the basis of data of the European social research]. *Mir Rossii – World of Russia*. 2015. vol. 1. pp. 150–169. (In Russ.).
3. Vnukova L.B. [Factors of socio-political tension in regions]. *Sovremennye issledovanija social'nyh problem – Modern researches of social problems*. 2011. vol. 4. Available at: <http://sisp.nkras.ru/issues/2011/4/vnukova.pdf> (accessed 22.11.2015). (In Russ.).
4. Baranova G.V., Frolov V.A. [Methodology and methods of measuring the social tensions]. *Sociologicheskie issledovanija – Sociological research*. 2012. vol. 3. pp. 50–64. (In Russ.).
5. Kukonkov P.I. [The social tension and the structural conflicts in regions of Russia: some research approaches]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta – Journal of Nizhny Novgorod University*. Available at: [http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990201\\_West\\_soc\\_2004\\_1\(3\)/21.pdf](http://www.unn.ru/pages/issues/vestnik/99990201_West_soc_2004_1(3)/21.pdf). (accessed 15.10.2015). (In Russ.).
6. Nagajcev V.V., Pustovalova E.V. [The level of social tension and conflictness in the system of social well-being indicators of the region's population]. *Izvestija Altajskogo gosudarstvennogo universiteta – News of Altai state University*. 2010. vol. 2. pp. 209–213. (In Russ.).
7. *Social'nye konflikty: jekspertiza, prognozirovanie, tehnologii razreshenija*. [Social conflicts: examination, forecasting, technologies of permission]. М.: Editorial URSS. 2004. vol. 19. 328 p. (In Russ.).
8. Ilyasov B.G., Ismagilova L.A., Zakieva E.Sh. [System approach to construction of mathematical model of socio-economic and political system as a single dynamic complex]. *Informatizacija obrazovanija i nauki – Informatization of Education and Science*. М. 2015. vol. 4 (28). pp 148–156. (In Russ.).
9. Dolomatov M.Ju., Martynov V.V., Zhuravleva N.A., Filosova E.I., Zakieva E.Sh. [Information System for Social Dissatisfaction Calculating Based on Application of the Law of Equilibrium Thermodynamics]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 4(41). pp. 163–179. (In Russ.).
10. Tepechin V.I. [Social tension in the context of national security problem of Russia]. Available at: <http://b-i.narod.ru/sos.htm>. (accessed: 20.10.2015). (In Russ.).
11. *Krizis social'noj politiki. Doklad Instituta globalizacii i social'nyh dvizhenij*. [Crisis of social policy. Report of Institute of globalization and social movements]. Available at: [http://igso.ru/articles.php?article\\_id=545](http://igso.ru/articles.php?article_id=545). (accessed: 10.10.2015). (In Russ.).
12. Ozhiganov Je.N. [Political tension: imitating modeling and early prevention]. *Analiticheskij vestnik – Analytical bulletin*. 2008. vol. 9(354). pp. 10–21.

**Ильясов Барый Галеевич** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технической кибернетики, ФГБОУВПО Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). Область научных интересов: системный анализ и управление сложными техническими и социально-экономическими системами. Число научных публикаций — 400. [ilyasov@tc.ugatu.ac.ru](mailto:ilyasov@tc.ugatu.ac.ru); ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450000; р.т.: +7(347)2737835.

**Ilyasov Bary Galeevich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of technical cybernetics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests: system analysis, control of complex technical, social-economic systems. The number of publications — 400. ilyasov@tc.ugatu.ac.ru; 12, K. Marksastreet, Ufa, 450000; office phone: +7(347)2737835.

**Макарова Елена Анатольевна** — д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры технической кибернетики, ФГБОУВПО Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). Область научных интересов: системный анализ, макроэкономическое моделирование, интеллектуальное управление. Число научных публикаций — 200. ea-makarova@mail.ru; ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450000; р.т.: +7(347)2737835.

**Makarova Elena Anatol'evna** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, professor of technical cybernetics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests: system analysis, macroeconomic modeling, intellectual control. The number of publications — 200. ea-makarova@mail.ru; 12, K. Marksastreet, Ufa, 450000; office phone: +7(347)2737835.

**Закиева Елена Шавкатовна** — к-т техн. наук, доцент, доцент кафедры технической кибернетики, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ). Область научных интересов: моделирование социально-экономических систем, качество жизни, информационные технологии. Число научных публикаций — 80. zakievae@mail.ru; ул. К.Маркса, 12, Уфа, 450000; р.т.: +79625235385.

**Zakieva Elena Shavkatovna** — Ph.D., associate professor, associate professor of technical cybernetics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University (USATU). Research interests: modeling of socio-economic systems, quality of life, information technology. The number of publications — 80. zakievae@mail.ru; 45/2, Pushkina street, apt.84, Ufa, 450076, Russia; office phone: +79625235385.

**Журавлева Надежда Александровна** — к-т техн. наук, доцент кафедры экономической информатики, ГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, заместитель по научной части заведующего научно-исследовательской лабораторией "Физика электронных процессов и наноматериалов", ФГБОУ ВПО Уфимский государственный университет экономики и сервиса. Область научных интересов: математическое моделирование, исследование сложных систем с хаосом состава, социально-экономические системы, ресурсы межзвездной среды. Число научных публикаций — 47. Zhuravliova80@mail.ru; ул. К. Маркса, 12, Уфа, 450000; р.т.: 8-919-158-70-48.

**Zhuravleva Nadezhda Aleksandrovna** — Ph.D., associate professor of economic informatics department, Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State Aviation Technical University, deputy for scientific part of head of scientific-research laboratory "Physics of electronic processes and nanomaterials", Federal state budgetary educational institution of higher professional education Ufa State University of Economics and Service. Research interests: mathematical modeling, the study of complex systems with chaos composition, socio-economic systems, the resources of the interstellar medium. The number of publications — 47. Zhuravliova80@mail.ru; 12, K. Marksastreet, Ufa, 450000; office phone: 8-919-158-70-48.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-00673\14).

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grant 14-08-00673\14).

## РЕФЕРАТ

*Ильясов Б.Г., Макарова Е.А., Закиева Е.Ш., Журавлева Н.А.*  
**Моделирование процессов формирования и управления социальной напряженностью.**

В данной статье разработана динамическая модель формирования социальной напряженности. Модель представлена в виде нелинейных дифференциальных уравнений. Проведены имитационные эксперименты, целью которых являлась оценка влияния различных факторов на изменение социальной напряженности. Исследования позволили изучить динамические особенности процесса формирования социальной напряженности. Проведен анализ влияния внутренних (объективных) характеристик общества, создающих почву для возникновения конфликтной ситуации в обществе, и внешних (субъективных) факторов, представленных возмущающими воздействиями на изменение социальной напряженности. Результаты исследований показали, что принятие управленческих решений в различных неблагоприятных ситуациях роста социальной напряженности позволяет обеспечить стабилизацию социально-экономической ситуации.

## SUMMARY

*Ilyasov B.G., Makarova E.A., Zakieva E.Sh., Zhuravleva N.A* **Modeling of Processes of Formation and Management of Social Tension.**

In this article, the dynamic model of social tension formation is developed. The model is presented in the form of the nonlinear differential equations. Imitating experiments aimed at assessing the influence of various factors on a change of social tension are carried out. Researches allowed us to study the dynamic features of the process of forming social tension. The analysis of the impact of the internal (objective) characteristics of society, creating the soil for emergence of a conflict situation in society, and the external (subjective) factors, presented by the revolting influences, on a change of social tension is carried out. The results of researches showed that adoption of administrative decisions in various adverse situations of rising social tension ensures stabilization of a social and economic situation.

К.О. Гнидко

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОГО И ГРУППОВОГО ПОВЕДЕНИЯ В P-АДИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

---

*Гнидко К.О. Моделирование индивидуального и группового поведения в p-адических системах координат для решения задач информационной безопасности.*

**Аннотация.** В настоящей работе предложена формальная модель индивидуального и группового поведения на основе применения p-адической системы координат, позволяющая осуществлять описание и прогнозирование поведенческих реакций персонала критически важных объектов в условиях внешних деструктивных информационных воздействий.

**Ключевые слова:** поведенческие реакции, p-адическое исчисление, информационная безопасность.

*Gnidko K.O. Modeling of Individual and Group Behavior in P-adic Coordinate Systems in Order to Solve Information Security Problems.*

**Abstract.** In this paper, we propose a formal model of individual and group behavior based on p-adic coordinate system. The model developed allows description and prediction of behavioral reactions of the personnel of critically important objects under conditions of external destructive informational impacts.

**Keywords:** behavioral reactions; p-adic computation; informational security.

---

**1. Введение.** Доктрина информационной безопасности РФ [1] указывает, что к основным угрозам информационной безопасности России относятся, в частности:

- противоправное применение специальных средств воздействия на индивидуальное, групповое и общественное сознание;
- девальвация духовных ценностей, пропаганда образцов массовой культуры, основанных на культе насилия, на духовных и нравственных ценностях, противоречащих ценностям, принятым в российском обществе.

Доктрина подчеркивает, что сложившееся положение дел в области обеспечения информационной безопасности Российской Федерации требует безотлагательного решения таких задач, как разработка современных методов и средств защиты информации, обеспечения безопасности информационных технологий, и прежде всего используемых в системах управления войсками и оружием, экологически опасными и экономически важными производствами. При этом к организационно-техническим методам обеспечения информационной безопасности относится, в частности, формирование системы мониторинга показателей и характеристик информационной безопасности Российской Федерации в наиболее важных сферах жизни и деятельности общества и государства.

С учетом приведенных положений и требований Доктрины информационной безопасности РФ, естественным образом возникает задача разработки системы мониторинга и прогнозирования эффекта непосредственного, накопленного и отложенного деструктивного информационно-психологического воздействия на индивидуальное и групповое поведение персонала критически важных объектов инфраструктуры. Подчеркнем, что групповое поведение несводимо к простой сумме действий составляющих группу индивидов. Одним из первых данный феномен отметил в конце XIX в. французский социолог Э. Дюркгейм: «Группа думает, чувствует, действует совсем иначе, чем это сделали бы ее члены, если бы они были разъединены».

Таким образом, ключевым элементом разрабатываемой системы мониторинга информационно-психологической безопасности должна стать модель индивидуального и группового поведения, которая будет являться кибернетическим эквивалентом поведенческих реакций персонала защищаемого объекта критически важной инфраструктуры. Главным требованием к такой модели является универсальность, то есть возможность адекватного описания максимально широкого круга реакций и психологических состояний.

**2. Современные подходы к проблеме моделирования поведенческих реакций.** Индивидуальные и групповые поведенческие реакции являются объектом пристального интереса ряда научных дисциплин, начиная от физиологии высшей нервной деятельности и психологии, заканчивая социологией и кибернетикой. Каждая из этих наук изучает определенные свойства и характеристики поведения, рассматривая его либо как функцию нейрофизиологических процессов, либо как продукт социализации и т. п. Разнообразие поведенческих теорий свидетельствует о несомненной сложности и комплексности этого феномена, обусловленного воздействием множества факторов как природного, так и социального порядка.

Главенствующие в кибернетике взгляды на моделирование поведения человека могут быть сведены к четырем парадигмам:

*A:* Всякая поведенческая реакция есть результат выполнения соответствующего вычисления в мозгу.

*B:* Поведенческие реакции представляют собой характерное проявление физической активности мозга. Хотя любую физическую активность можно моделировать посредством той или иной совокупности вычислений, численное моделирование как таковое не способно адекватно воспроизвести поведение человека.

*C:* Поведение является результатом соответствующей физической активности мозга, однако эту физическую активность невозможно должным образом смоделировать вычислительными средствами.

*D:* Поведение человека невозможно объяснить в физических, математических и вообще научных терминах.

Роджер Пенроуз в работах [2,3] детально рассматривает все перечисленные парадигмы и приводит трудно опровержимые доводы в пользу точки зрения С. Главным препятствием на пути создания модели разумного поведения человека при помощи «традиционных» методов искусственного интеллекта и машинного обучения становится так называемая «теорема Гёделя о неполноте». Среди положений, которые доказал Курт Гёдель, имеется следующее: нельзя создать такую формальную систему логически обоснованных математических правил, доказательства которой было бы достаточно, хотя бы в принципе, для доказательства всех истинных теорем элементарной арифметики.

Следствием этой теоремы является тот факт, что способность человека к пониманию и постижению сути вещей невозможно свести к какому бы то ни было набору вычислительных правил. Иными словами, нельзя создать такую систему правил, которая оказалась бы достаточной для доказательства даже тех арифметических положений, истинность которых, в принципе, доступна для человека с его интуицией и способностью к пониманию, а это означает, что интуицию и понимание, определяющие поступки человека, невозможно свести вообще к какому бы то ни было набору правил [3].

Данное фундаментальное ограничение вовсе не означает, что отдельные поведенческие реакции совершенно невозможно моделировать. Являясь существом не только социальным, но и биологическим, человек в процессе эволюционного развития выработал, унаследовал от предков и сохранил множество древних и достаточно примитивных в своей основе устойчивых паттернов поведения. Особенно ярко такие паттерны проявляются в критических ситуациях, когда у коркового анализатора недостаточно времени на осознание и анализ ситуации, а также в случае возникновения так называемого «эффекта толпы», превращающего совокупность рационально мыслящих индивидов в агрессивную человеческую массу, подчиняющуюся особым законам. Психологами описан широкий класс когнитивных искажений, то есть систематических ошибок в суждениях, которые возникают на основе дисфункциональных убеждений, внедренных в когнитивные схемы [4]. Все многочисленные проявления когнитивных искажений могут быть отнесены к двум классам, первый из которых обусловлен незнанием фундаментальных закономерностей бытия или неумением применять эти знания на практике. Ко второму классу когнитивных искажений относятся случаи, когда неосознаваемые или неконтролируемые психические процессы становятся причиной нежелательной реакции индивида [5]. Когнитивные искажения присущи практически всем людям без исключения, вне зависимости от расовой, культурной и религиозной принадлежности, они легко обнаруживаются при анализе автоматических мыслей и легко воспроизводятся в результате эксперимента. Таким образом, вполне естественно попытаться создать формальную

теорию для математического описания и прогнозирования поведенческих реакций человека. Для этого необходимо выбрать соответствующую систему координат и установить законы перехода системы из состояния в состояние в фазовом пространстве.

**3. Моделирование поведения в  $p$ -адических системах координат.** В ходе любого опыта, лежащего в основе построения теории, мы можем измерить интересующую нас величину лишь с точностью до конечного числа знаков после запятой, получив на выходе рациональное число. Развивая теорию, исследователь начинает с поля рациональных чисел  $\mathbb{Q}$ , которому принадлежат все экспериментальные данные, а затем пополняет  $\mathbb{Q}$ , строя абстрактную математическую модель. Одна из фундаментальных теорем теории чисел, теорема Островского, утверждает, что действительные метрики вида  $\varphi(x) = |x|^\alpha$  и  $p$ -адические метрики  $\varphi_p(x) = \rho^{v_p(x)} a/b$  ( $a$  и  $b$  целые, не делящиеся на  $p$ ) для всех простых  $p$  исчерпывают все нетривиальные метрики поля рациональных чисел  $\mathbb{Q}$  [6]. Таким образом, третьего «естественного континуума» не существует. Любое пополнение поля  $\mathbb{Q}$ , являющееся полем, — это либо поле вещественных чисел  $\mathbb{R}$ , либо одно из полей  $p$ -адических чисел  $\mathbb{Q}_p$ ,  $p$  — простое.

Приведем основные определения из области  $p$ -адического исчисления. Целым  $p$ -адическим числом для заданного простого  $p$  называется бесконечная последовательность  $x = \{x_1, x_2, \dots\}$  вычетов  $x_n$  по модулю  $p^n$ , удовлетворяющих условию:  $x_n \equiv x_{n+1} \pmod{p^n}$ .

Любое рациональное число  $r$  можно представить как  $r = p^n \frac{a}{b}$ , где  $a$  и  $b$  целые числа, не делящиеся на  $p$ , а  $n$  — целое.

$|r|_p$  ( $p$ -адическая норма  $r$ ) определяется как  $p^{-n}$ .  $|0|_p = 0$ . Поле  $p$ -адических чисел есть пополнение поля рациональных чисел с метрикой  $d_p$ , определенной  $p$ -адической нормой:  $d_p(x, y) = |x - y|_p$ , норма  $|r|_p$  продолжается по непрерывности до нормы на  $\mathbb{Q}_p$ .

Большинство исследователей [7-10] идут по пути использования для моделирования поведенческих реакций той же вещественной системы координат, которая использовалась для описания материального макромира, однако данный факт практически не приблизил нас к пониманию феномена индивидуального и группового поведения. Но если вещественные числа, как показала практика, не подходят для решения данной задачи, то, в силу теоремы Островского, единственным выходом является использование  $p$ -адической системы координат. Уместно привести высказывание одного из известных исследователей биофизики С.В. Козырева: «Неэффективность математических методов в биологии может быть связана именно с тем, что к биологии пытались применять, как и к физике, методы вещественного анализа, в то время как базовые модели биологии, возможно, должны выражаться на ультраметрическом языке». Примечательным является тот факт, что адические координаты

естественным образом задают ультраметрическую (неархимедову) топологию пространства. Одним из первых обратил внимание на возможность применения  $p$ -адического анализа к проблеме моделирования поведения А.Ю. Хренников в работе [11], которая во многом послужила отправной точкой для настоящего исследования.

Наши дальнейшие рассуждения будут исходить из предположения: следствие из теоремы Островского является отражением дуализма «материя-дух» в природе. Вещественные числа описывают материальный макроскопический мир и движение объектов в нем,  $p$ -адические — ментальные пространства и динамические процессы в них. При этом прослеживаются очевидные аналогии в структуре и свойствах ментального и  $p$ -адического пространства (см. таблицу 1).

Таблица 1. Некоторые важные аспекты ментального пространства в контексте сравнения  $p$ -адического и вещественного исчисления

Ментальное пространство	$p$ -адические числа	Вещественные числа
Четко выраженная иерархия понятий, образов, чувств. Существуют несопоставимые объекты $\Rightarrow$ частичная упорядоченность	Отношение частичного порядка. Иерархическая древовидная структура	Однородность. Все точки физического пространства $\mathbb{R}^3$ равноправны
Не выполняется аксиома Архимеда: $\forall d, D (d, D \in \mathbb{R}_+) \exists n \in \mathbb{N}: (n-1)d \leq D \leq nd$	Неархимедова (ультраметрическая) геометрия пространства. Выполняется усиленное неравенство треугольника $ c  \leq \max( a ,  b )$	Выполняется аксиома Архимеда и неравенство треугольника: $ c  \leq  a  +  b $
Дискретность мыслей, образов, идей	Дискретность	Непрерывность
Фундаментальное свойство ментальных пространств — несвязность	Несвязность пространства	Связность пространства

**4. Структура и основные элементы модели индивидуального и группового поведения.** В целом разрабатываемая нами модель индивидуального и группового поведения будет опираться на предложенную З. Фрейдом структуру личности, рассматривающую последнюю в единстве таких составляющих, как бессознательное «Оно» (id), сознательное «Я» (ego) и надсознательное «Сверх-Я» (super-ego), которое является носителем традиций и ценностей, передающихся из поколения в поколение и трудно поддающихся изменениям. Но если для Фрейда природное и культурное пересекались лишь в фокусе «Я», становящегося при этом сферой не столько их единства, сколько борьбы, то современная психология делает акцент на «сквозной» функциональной и генетической зависимости всех трех компонентов. Бессознательное представляет собой не просто энергетический комплекс чисто природных инстинктов, но не

в меньшей степени детерминировано социальной средой, культурными и языковыми программами. Одновременно на уровне группового и массового поведения можно говорить о существовании многообразных социально-психологических феноменов, репрезентирующих бессознательное, поэтому мы не можем исключить из рассмотрения ни один из названных компонентов.

Важным элементом разработанной модели индивидуального и группового поведения является управляющий центр сознания (УЦС), который обрабатывает возникающие потребности и поступающие на вход внешние информационные стимулы, после чего формулирует задачи и посылает их в область бессознательного (рисунок 1). Поиск решения задач, поставленных УЦС, происходит в области бессознательного, где работает сложная динамическая система.

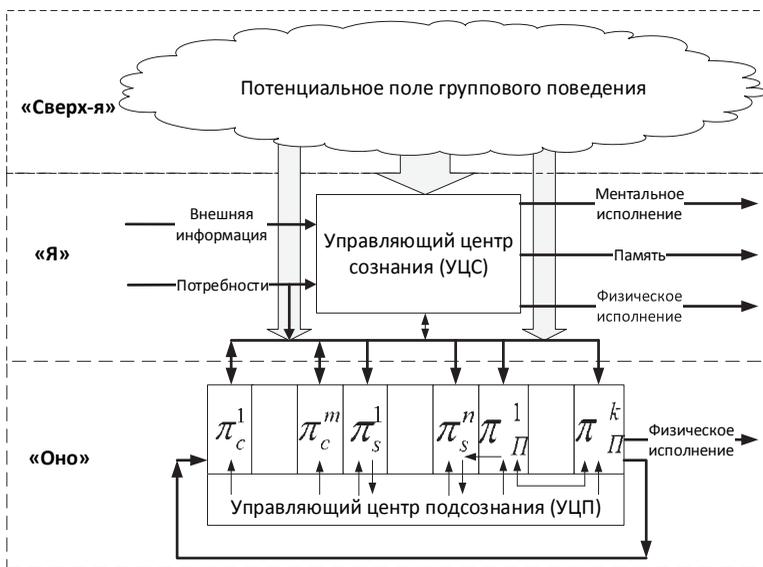


Рис 1. Структура модели индивидуального и группового поведения

Ее работа начинается с  $l$ -состояния  $x_0$  (или группы  $l$ -состояний  $U_0$ ), которое сообщается УЦС. Математически это соответствует выбору начальной точки  $x_0$  (или окрестности  $U_0$ ). Отправляясь от этой начальной точки  $x_0$ , мыслительный процессор  $\pi$ , находящийся в области бессознательного, генерирует с большой скоростью огромное число новых  $l$ -состояний:  $x_1 = f(x_0), \dots, x_{n+1} = f(x_n), \dots$  Эти  $l$ -состояния не используются сознанием. Сознание (а именно УЦС) управляет только некоторыми исключительными моментами в работе динамической системы в области бессознательного. Это различные режимы стабили-

зации. Важнейшие из них — аттракторы, которые рассматриваются сознанием как возможные решения задачи. Могут также возникать циклы ( $c \rightarrow b \rightarrow \dots \rightarrow c \rightarrow a$ ), которые порождают сигналы к остановке динамической системы. Если УЦС не может принять какое-либо решение, тогда он посылает новое начальное  $l$ -состояние  $x'_0$  в область бессознательного или меняет режим работы мыслительного процессора. Математически смена режима может быть описана как смена функции  $f(x)$ , определяющей динамическую систему. Таким образом, мы можем описывать процесс формирования поведенческих реакций как работу семейства динамических систем  $f_{\{\alpha\}}(x)$ , где параметр  $\alpha$  выбирается сознанием. Подходы к учету в нашей модели эффектов группового поведения, возникающих в результате действия соответствующего потенциального поля, более подробно рассмотрены в разделе 6 настоящей работы.

Введем дополнительно следующие понятия и определения. Символ  $\tau$  будет использоваться для обозначения мыслящих систем. Мыслящие системы оперируют с информационными состояниями ( $l$ -состояниями). Иерархические семейства  $l$ -состояний образуют  $l$ -объекты, которые мы будем называть ассоциациями. Семейства ассоциаций образуют  $l$ -объекты высшего уровня. Они будут называться идеями. Множество  $l$ -состояний ментального пространства  $X_l$  мыслящей системы  $\tau$  в нашей модели имеет структуру  $p$ -адического дерева:  $X_l = \mathbb{Z}_p$ . Таким образом, в нашей математической модели ментальное пространство представляется как ультраметрическое пространство  $(\mathbb{Z}_p, \rho_p)$ . Поясним сказанное схематичным изображением участка произвольного ментального пространства  $x$ , для  $p = 3$  (рисунок 2).

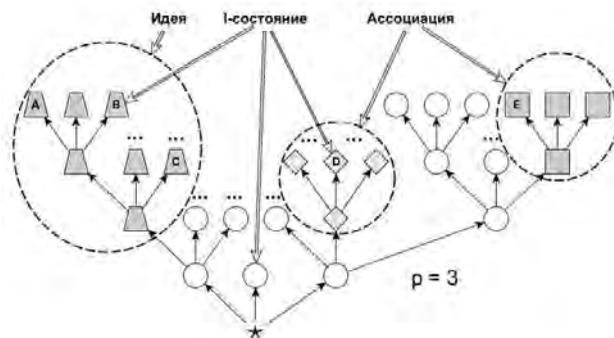


Рис. 2. Представление ментального пространства  $X_l$  мыслящей системы  $\tau$  в виде 3-адического дерева

Топология ментального пространства, задаваемого моделью, имеет следующую особенность: два  $l$ -состояния  $x$  и  $y$  близки, если они имеют достаточно длинный общий корень. Значение  $p$ -адической метрики между двумя информационными состояниями может быть вычислено как  $p^{-n}$ , где  $n$  — длина общего корня для двух состояний. Так, например, значения  $p$ -адической метрики между информационными состояниями  $A$  и  $B$ , вложенными в одну и ту же ассоциацию и идею:  $|A - B|_3 = 3^{-3} = 1/27$ . В то же время значение метрики для состояний  $B$  и  $C$ , составляющих одну и ту же идею, но принадлежащих разным ассоциациям, равно  $1/9$  ( $|B - C|_3 = 3^{-2}$ ). Соответственно,  $|D - E|_3 = 1/3$ ,  $|A - E|_3 = 1$ .

**5. Моделирование динамики поведенческих реакций.** Для того чтобы построить математическую динамическую модель индивидуального и группового поведения, необходимо описать взаимодействия между  $l$ -состояниями. Мы представляем эти взаимодействия, пользуясь преобразованиями пространства  $X_l$ , которые порождают новое  $l$ -состояние  $x = g(x_1, \dots, x_n)$ . Математическое описание функций взаимодействия информационных состояний является нетривиальной задачей. В настоящее время мы не знаем достоверно типы преобразований иерархических деревьев, которые описывают взаимодействия между  $l$ -состояниями в мозгу человека. Знание таких законов и их формальное описание позволило бы предсказать (контролировать) поведение мыслящей системы  $\tau$ . Например, мы предлагаем  $\tau$  начальную идею  $x_0$ , принадлежащую области притяжения  $A(x_a)$ . Тогда мы можем быть уверены в том, что  $\tau$  после некоторых размышлений придет к мысли  $x_a$ . Наша математическая модель дает правило нахождения  $x_a$ : эта идея ( $l$ -состояние в простейшей модели поведения) должна иметь общий начальный отрезок с  $x_a$  в закодированном представлении.

Таким образом, основной проблемой на пути прогнозирования индивидуального и группового поведения является поиск корректных динамических законов  $f_s(x)$ , описывающих работу отдельных процессов мышления. Следует подчеркнуть, что мы ни в коем случае не можем утверждать, что поведение индивида или группы на самом деле определяется этими (или подобными) законами;  $f_s(x)$  можно рассматривать только в качестве математических абстракций, описывающих (с некоторым приближением) внешние проявления поведенческих реакций. Каким же образом могут быть найдены эти динамические законы? Уместно предположить, что в данном случае можно использовать физическую аналогию и применить к ментальным процессам принцип наименьшего действия Гамильтона, которому подчиняются все фундаментальные взаимодействия и являющийся, таким образом, одним из наи-

более универсальных законов природы. В классической механике действие для системы с одной степенью свободы определяется формулой:

$$S[q] = \int L(q(t), \dot{q}(t), t) dt,$$

где  $L(q(t), \dot{q}(t), t)$  — лагранжиан системы, зависящий от обобщенной координаты  $q(t)$ , ее первой производной  $\dot{q}(t)$ , а также от времени  $t$ .

Если задан лагранжиан системы, то с помощью вариационного исчисления можно установить, как именно будет двигаться тело, сначала получив уравнения движения — уравнения Эйлера — Лагранжа, а затем решив их. Это позволяет не только обобщить формулировку механики, но и выбирать наиболее удобные координаты для каждой определенной задачи, не ограничиваясь декартовыми. Интересна также и аналогия с квантовыми процессами, когда частица движется из начального состояния в конечное сразу по всем мыслимым траекториям (которых, очевидно, бесконечное число). В этом случае амплитуда вероятности перехода из одного заданного состояния в другое является суммой амплитуд по всем этим траекториям. Таким образом, возможные проблемы на пути формального описания поведенческих реакций связаны с поиском аналога функций Лагранжа или Гамильтона для ментального фазового пространства.

Для проверки адекватности полученных теоретических результатов существует только одна возможность: задокументировать реальные поведенческие реакции отдельных индивидов и групп для большого класса начальных условий  $x_0$  и сравнить эти результаты с прогнозами полученными с помощью теоретических рассмотрений. В рамках настоящей работы мы можем рассмотреть лишь некоторые простейшие преобразования. Тем не менее эти преобразования на  $p$ -адическом дереве, как будет показано ниже, вполне могут моделировать некоторые существенные черты разумного поведения, в том числе группового.

Последним шагом в построении математической модели индивидуального и группового поведения является описание эволюционного процесса в пространстве  $I$ -состояний. Поведение рассмотрим как динамическую систему  $x_n = f(x_{n-1})$  на пространстве  $I$ -состояний  $X_I$ . Начиная с  $I$ -состояния  $x_0$ , мы получаем цепь  $I$ -состояний  $x_0, x_1, \dots, x_n, \dots$ , которые внешне проявляются как поведенческие реакции. Нас интересует непрерывное отображение  $f: X_I \rightarrow X_I$ . В соответствии с нашим определением близости  $I$ -состояний,  $f$  отображает  $I$ -состояния  $x$  и  $y$ , имеющие длинный общий корень, в  $I$ -состояния  $x' = f(x)$  и  $y' = f(y)$ , которые также обладают длинным общим корнем. Эта «общекорневая» гладкость динамических законов дает возможность поднять

динамику  $I$  – состояний до динамики ассоциаций (пучков ветвей, обладающих общим корнем), а затем и идей (семейств пучков ветвей).

Динамика ментальных процессов в предлагаемой нами модели может быть описана следующим образом: начальное  $I$  – состояние  $x_0$  посылается в область бессознательного, где итерируется некоторой динамической системой, определяемой отображением  $f: \mathbb{Z}_p \rightarrow \mathbb{Z}_p$ . Атрактор передается в сознание, он и будет решением задачи  $x_0$ . Процесс мышления совершается динамической системой:

$$x_{n+1} = f(x_n); x_n \in X_I,$$

где  $X_I$  — конфигурационное пространство динамической системы. Начиная с  $I$  – состояний  $x_0$ , мы получаем цепь  $I$  – состояний  $x_0, x_1, \dots, x_n, \dots$ . В рамках разработанной модели мы рассматриваем формальную теорию ментальной механики по аналогии с ньютоновской механикой. Аналогом материального пространства  $X_{\text{мат}}$  для этой математической модели является ментальное пространство  $X_I$ . Мыслящая система  $\tau$  описывается как преобразователь информации:  $I$  – состояние  $q \in X_I$  находится в процессе постоянной эволюции. Мыслящая система  $\tau$  производит преобразования  $q \rightarrow q' \rightarrow q'' \rightarrow \dots$ . Временной параметр этой эволюции является также  $I$  – параметром, а именно ментальным временем системы  $\tau, t \in X_I$ . Активность  $\tau$  порождает траекторию  $q(t)$  в ментальном пространстве  $X_I$ . Будем считать, что траектория  $q(t)$  эволюции  $I$  – состояния определяется силами и начальными условиями. Как и в ньютоновской механике, мы вводим скорость  $v(t)$  изменения  $I$  – состояния  $q(t)$ . Она может вычисляться как производная в ментальном пространстве  $X_I$  величины  $q(t)$  по ментальному времени  $t$ , для соответствующих дифференциальных исчислений.

Пусть «ментальная масса» мыслящей системы  $\tau$  равна 1. Тогда мы можем отождествлять скорость  $v$  с импульсом  $p = mv = v$ . Будем говорить, что  $p$  — мотивация, изменяющая  $I$  – состояние  $q(t)$ . Предположим, что ментальная динамика в  $X_I$  описывается с помощью  $I$  – аналога второго закона Ньютона. Тогда траектория  $p(t)$  мотивации системы  $\tau$  описывается уравнением:

$$\dot{p}(t) = f(t, q), \quad p(0) = p_0, \quad t, q, p \in X_I,$$

где  $f(t, q)$  —  $I$  – сила, порожденная внешними источниками информации, в частности, другими мыслящими системами. Если начальная мотивация  $p_0$  и  $I$  – сила  $f(t, q)$  известны, то мотивация  $p(t)$  может быть найдена в каждый момент ментального времени  $t$  интегрированием

уравнения, приведенного выше. Траектория  $q(t)$  эволюции  $l$ -состояния может быть найдена интегрированием уравнения:

$$\dot{q}(t) = p(t), \quad q(0) = q_0, \quad t, q, p \in X_l.$$

### 6. Пример 2-адического описания динамики поведения.

Пусть абитуриент рассматривает  $n$  вариантов выбора специальности в ВУЗе. Для каждой из специальностей имеется метка  $\alpha \in \{0,1\}$ . Если абитуриент не проходит на выбранную специальность по баллам, то метка  $\alpha$  принимает значение 0, и соответственно,  $\alpha = 1$ , если количество баллов достаточно для поступления на данную специальность. Множество специальностей упорядочено по их месту в индивидуальной иерархии ценностей абитуриента:

$$B_0, B_1, \dots, B_{n-1},$$

где  $B_0$  — «специальность мечты»,  $B_1$  — чуть менее привлекательна, чем  $B_0$ , и т.д. Тогда состояние намерений абитуриента относительно рассматриваемых специальностей можно описать  $p$ -адическими натуральными числами:

$$x = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot 2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot 2^{n-1},$$

где  $\alpha_j$  — метка специальности  $B_j$ .

Пусть процесс мышления, ответственный за выбор специальности, описывается динамической системой

$$f_s(x) = x^s.$$

Процесс мышления будет различаться при различных значениях параметра  $s$ .

Пусть  $s = 2$ . Допустим, что абитуриент имеет начальное состояние  $x_0$ . Возникают две возможности:

1) Если начальное состояние принадлежит 2-адическому шару с радиусом  $1/2$  и центром в точке 0 ( $x_0 \in U_{1/2}(0)$ ), т.е.  $\alpha_0 = 0$ , тогда итерации  $x_n$  сходятся к аттрактору  $\alpha_0 = 0$ .

2) Если начальное состояние лежит на сфере радиуса 1 с центром в точке 0 (принадлежит шару с радиусом  $1/2$  и центром в точке 1,  $x_0 \in S_1(0) = U_{1/2}(1)$ ), т.е.  $\alpha_0 = 1$ , тогда итерации  $x_n$  сходятся к аттрактору  $\alpha_0 = 1$  (см. рисунок 3).

Описанные ситуации весьма часто встречаются в реальном поведении индивидов. Так, например, в первом случае, когда абитуриент не имеет возможности поступить на наиболее привлекательную для него специальность, он воспринимает это как своего рода трагедию и принимает решение отказаться от всех остальных вариантов.

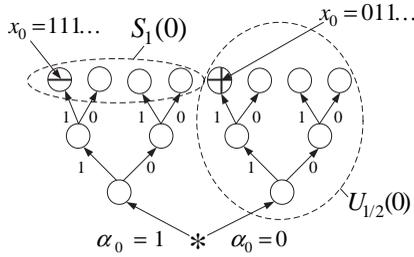


Рис. 3. Пример 2-адического описания динамики поведения

Действительно, пусть  $x_0 = 011 \dots$ . Тогда, в соответствии с правилами умножения  $p$ -адических чисел:

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0^2 = 001001 \dots \\ x_2 &= x_1^2 = 000010001 \dots \\ x_n &= 000000000 \dots \end{aligned}$$

Во втором случае, когда количество баллов достаточно для поступления на «специальность мечты», абитуриент также отказывается от всех остальных вариантов, но уже по иной причине — его возможности совпадают с желаемым результатом и выбор однозначен. Продемонстрируем это эволюцией намерений, начиная с состояния  $x_0 = 111 \dots$

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0^2 = 1000110 \dots \\ x_2 &= x_1^2 = 1000011010 \dots \\ x_n &= 100000000 \dots \end{aligned}$$

Пусть теперь параметр  $s = 3$ . В этом случае поведение индивида обладает более сильной нелинейностью. Если  $x_0 \in U_{1/2}(0)$ , тогда результат работы динамического процессора  $f_3(x) = x^3$  совпадает с соответствующим исходом при  $s = 2$  (с той же психологической интерпретацией). Однако если  $x_0 \in S_1(0)$ , тогда процесс выбора может стать достаточно хаотичным и непредсказуемым, поскольку в данном случае точка  $\alpha_0 = 1$  не является аттрактором. Это центр диска Зигеля  $U_{1/2}(1)$ . Таким образом, хотя  $B_0$  всегда имеет метку 1, метки других специальностей  $B_1, \dots, B_{n-1}$  могут меняться хаотично. В нашей интерпретации данная ситуация означает, что несмотря на возможность поступить на специальность  $B_0$ , он не может решиться на это (по некоторым причинам, например, из-за несогласия родителей). В этой ситуации подсознание непрерывно изучает другие возможности, но эти поиски не имеют видимого успеха, так как метки  $\alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$  могут изменяться хаотично. Для выхода из сложившейся ситуации возможны два варианта: изменение начального  $I$ -состояния  $x_0$  и изменение параметра  $s$ .

Таким образом, динамическая модель, основанная на  $p$ -адическом пространстве, может обладать богатой структурой уже для мономиальных функций  $f_s(x) = x^s, s = 2, 3 \dots$  на  $\mathbb{Z}_p$ . Здесь существуют аттракторы, диски Зигеля, циклы. Простое число  $p$  (основание системы кодирования) играет роль параметра динамической системы. Поведение итераций зависит от этого параметра. При этом необходимо подчеркнуть, что поведение «2-адической мыслящей системы» может сильно отличаться от поведения «5-адической мыслящей системы», несмотря на использование одной и той же динамической функции (например,  $x \rightarrow x^2$ ).

**7. Учет эффектов группового поведения.** Моделирование эффектов группового поведения, повсеместно наблюдаемых в повседневной жизни, требует от нас введения особого потенциального поля, способного взаимодействовать с информационными состояниями отдельных индивидов (см. рисунок 1). В механике Ньютона сила  $f(q), q \in X_{\text{мат}}$  называется потенциальной, если существует функция  $V(q)$  такая, что  $f(q) = -dV(q)/dq$ , при этом функция  $V(q)$  называется потенциалом. Работа потенциальной силы не зависит от траектории перемещения объекта. Мы используем точно такую же терминологию в ментальной механике. Здесь функции силы  $I$  и потенциала  $V$  определяются на пространстве  $I$ -состояний  $X_I$ . Потенциал  $V(q), q \in X_I$ , является  $I$ -потенциалом,  $I$ -полем, которое взаимодействует с мыслящей системой  $\tau$ . Такие поля являются классическими когнитивными полями. Необходимо подчеркнуть, что ментальное время  $t$  не обязательно совпадает с физическим временем  $t_{\text{физ}}$ . Оно соответствует внутренней шкале  $I$ -процесса. Наш сознательный опыт показывает, что периоды ментальной эволюции, которые являются достаточно длительными по  $t_{\text{физ}}$  шкале, могут быть очень короткими по шкале  $t$  и наоборот.

Важнейшими атрибутами группового поведения являются прямое давление на инакомыслящих, самоцензура (подавление в самом себе сомнений в правильности выбранного группой решения) и иллюзия единодушия, которая создается в результате действия самоцензуры в каждом из членов группы. Таково, например, поведение членов закрытой религиозной общины или тоталитарной секты. В нашей модели это может быть проиллюстрировано следующим образом. Пусть  $\tau_1, \dots, \tau_N$  — семейство мыслящих систем с ментальными пространствами  $X_{I,1}, \dots, X_{I,N}$ . Введем ментальное пространство  $X_I$  этого семейства мыслящих систем, полагая  $X_I = X_{I,1} \times \dots \times X_{I,N}$ . Элементами этого пространства являются векторы  $I$ -состояний  $q = (q_1, \dots, q_N)$  индивидуальных мыслящих систем  $\tau_j$ . Предположим, что существует  $I$ -потенциал  $V(q_1, \dots, q_N)$ , который порождает информационные силы  $f_j(q_1, \dots, q_N)$ . Потенциал  $V$  порождается как  $I$ -взаимодействиями мыслящих систем  $\tau_1, \dots, \tau_N$ , так и

внешними  $l$  – полями. Эволюция мотивации  $p_j(t)$  и информационного состояния  $q_j(t)$   $j$ -й мыслящей системы  $\tau_j$  описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{p}_j(t) &= f_j(t, q_1, \dots, q_N), & p_j(0) &= p_{0j}, \\ \dot{q}_j(t) &= p_t(t), & q(0) &= q_{0j}, \quad t, q, p \in X_I. \end{aligned}$$

Пусть, например,  $X_{I,1} = X_{I,2} = \mathbb{Z}_p$ . Тогда  $X_I = \mathbb{Z}_p \times \mathbb{Z}_p = \mathbb{Z}_p^2$ . Пусть потенциал ментального поля имеет вид:

$$V(q_1, q_2) = \lambda(q_1 - q_2)^2,$$

где  $\lambda$  – некоторая  $l$  – постоянная, заданная  $p$  – адическим числом. Тогда движение систем  $\tau_1$  и  $\tau_2$  в ментальном пространстве не является независимым. Индивидуальные состояния мыслящих систем в этом случае синхронизируются, подчиняясь действию информационной силы, «притягивающей» их в точку с наименьшей разностью потенциалов. Силу этой зависимости определяет постоянная  $\lambda$ . По мнению автора, такой вид потенциального поля возникает, например, при исполнении приверженцами суфистского течения в исламе совместной молитвы — так называемого «громкого зикра», итогом которого является одновременный переход десятков членов общины в измененное состояние сознания.

Мы также можем формально описать групповое поведение с обратной зависимостью, если, например:

$$V(q_1, q_2) = L - \lambda(q_1 - q_2)^2,$$

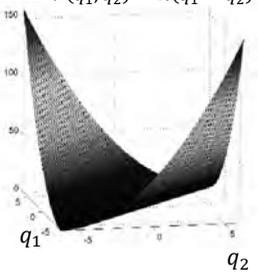
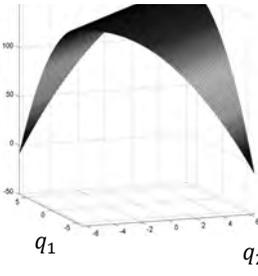
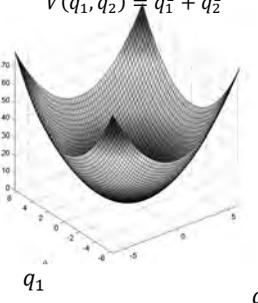
где  $L$  — начальный уровень антагонизма. Такой модели потенциального поля соответствует поведение групп болельщиков на футбольном матче, когда эмоциональный подъем сторонников одной команды неизбежно вызывает примерно равную по силе негативную эмоциональную реакцию группы болельщиков команды-соперника. В этом случае групповые сознания находятся во взаимодействии с отрицательной связью.

Если

$$V(q_1, q_2) = q_1^2 + q_2^2,$$

то движения систем  $\tau_1$  и  $\tau_2$  являются независимыми. Такое потенциальное поле может возникать при совместной медитации группы буддистов. В этом случае ментальные состояния мыслящих систем стремятся перейти в состояние с наименьшим потенциалом, но при этом не синхронизируются друг с другом. Проиллюстрируем приведенные примеры (см. таблицу 2).

Таблица 2. Возможный вид потенциала поля группового поведения

<p>а) зависимое поведение мыслящих систем</p>	$V(q_1, q_2) = \lambda(q_1 - q_2)^2$ 	<p>Групповая молитва «громкий зикр»</p> 
<p>б) поведение с обратной зависимостью</p>	$V(q_1, q_2) = L - \lambda(q_1 - q_2)^2$ 	<p>Эмоциональное состояние болельщиков соперничающих футбольных команд</p> 
<p>в) независимое поведение мыслящих систем</p>	$V(q_1, q_2) = q_1^2 + q_2^2$ 	<p>Групповая медитация в практике буддизма</p> 

**8. Заключение.** Таким образом, математическое моделирование поведенческих реакций в  $p$ -адической системе координат может быть использовано в качестве базиса для разработки алгоритмического и программного обеспечения системы мониторинга и прогнозирования эффекта непосредственного, накопленного и отложенного деструктивного информационно-психологического воздействия на персонал объектов критически важной инфраструктуры, а также население страны в целом.

## Литература

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации // № Пр-1895. 2000.
2. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики // М.: Эдиториал УРСС. 2003. 999 с.
3. Пенроуз Р. Тени разума. В поисках науки о сознании. Часть II: Новая физика, необходимая для понимания разума // Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2005. 352 с.
4. Александров А.А. Интегративная психология // СПб.: Питер. 2009. 352 с.
5. Гнидко К.О., Ломако А.Г., Жолус Р.Б. Обнаружение визуальных контаминантов на основе вычисления перцептивного хэша // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 39. С. 193–211.
6. Боревиц З.И., Шафаревич И.Р. Теория чисел // М.: Наука. 1985. 504 с.
7. Михайлов А.П., Петров А.П. Поведенческие гипотезы и математическое моделирование в гуманитарных науках // Математическое моделирование. 2011. Вып. 23. № 6. С. 18–23.
8. Алексеев А.О., Алексеева И.Е. Математическое моделирование предпочтений экономических субъектов (агентов) // Управление экономическими системами. 2015. № 4. С. 76.
9. Sent A.D., Roisenberg M., Freitas Filho P.J. Simulation of Crowd Behavior Using Fuzzy Social Force Model // Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference WSC '15. USA: IEEE Press. 2015. pp. 3901–3912.
10. Zhao Y. et al. Crowd macro state detection using entropy model // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2015. vol. 431. pp. 84–93.
11. Хренников А.Ю. Моделирование процессов мышления в р-адических системах координат // М.: ФИЗМАТЛИТ. 2004. 296 с.

## References

1. *Doktrina informacionnoj bezopasnosti Rossijskoj Federacii* [Information Security Doctrine of Russian Federation] no. Pr-1895. 2000. (In Russ.).
2. Penrouz R. *Novyj um korolja. O komp'juterah, myshlenii i zakonah fiziki* [The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and The Laws of Physics] M.: Jeditorial URSS. 2003. 999 p. (In Russ.).
3. Penrouz R. *Teni razuma: V poiskah nauki o soznanii. Chast' II: Novaja fizika, neobhodimaja dlja ponimaniya razuma* [Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness] Moskva-Izhevsk: Institut komp'juternyh issledovaniy. 2005. 352 p. (In Russ.).
4. Aleksandrov A.A. *Integrativnaja psihologija* [Integrative Psychology] Spb.: Piter. 2009. 352 p. (In Russ.).
5. Gnidko K.O., Lomako A.G., Zholus R.B. [Detection of visual contaminants on the basis of perceptual hash calculation]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceeding*. 2015. no. 39. pp. 193–211. (In Russ.).
6. Borevich Z.I., Shafarevich I.R. *Teorija chisel* [Numbers Theory] M.: Nauka. 1985. 504 p. (In Russ.).
7. Mihajlov A.P., Petrov A.P. [Behaviral hypotheses and mathematical modelling in humanitarian sciences]. *Matematischeskoe modelirovanie – Mathematical Model*. 2011. vol. 23. no. 6. pp. 18–23. (In Russ.).
8. Alekseev A.O., Alekseeva I.E. [Mathematical modelling of preferences of economical subjects (agents)]. *Upravlenie jekonomichesкими sistemami – Management of Economic Systems*. 2015. vol. 4. p.76.

9. Sent A.D., Roisenberg M., Freitas Filho P.J. Simulation of Crowd Behavior Using Fuzzy Social Force Model. Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference WSC '15. USA: IEEE Press. 2015. pp. 3901–3912.
10. Zhao Y. et al. Crowd marco state detection using entropy model. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2015. vol. 431. pp 84–93.
11. Hrennikov A.Ju. *Modelirovanie processov myshlenija v p-adicheskikh sistemah koordinat* [Modeling of processes of thinking in p-adic coordinates]. M.: FIZMATLIT. 2004. 296 p. (In Russ.).

**Гнидко Константин Олегович** — к-т техн. наук, докторант, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: информационно-психологическая безопасность, распознавание образов, извлечение знаний из неструктурированных массивов данных. Число научных публикаций — 27. [greeny598@gmail.com](mailto:greeny598@gmail.com); ул. Ждановская, 13, 197198, Санкт-Петербург; р.т.: +7(812) 237-19-60.

**Gnidko Konstantin Olegovich** — Ph.D., doctoral student, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: information-psychological security, image recognition, data mining. The number of publications — 27. [greeny598@gmail.com](mailto:greeny598@gmail.com); 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(812) 237-19-60.

## РЕФЕРАТ

### *Гнидко К.О.* **Моделирование индивидуального и группового поведения в $p$ -адических системах координат для решения задач информационной безопасности.**

Разработка системы мониторинга и прогнозирования эффекта непосредственного, накопленного и отложенного деструктивного информационно-психологического воздействия на персонал критически важных объектов инфраструктуры государства и населения страны в целом является актуальной задачей обеспечения информационной безопасности Российской Федерации. Ключевым элементом разрабатываемой системы должна стать формальная математическая модель, способная отражать наиболее существенные аспекты индивидуального и группового поведения и прогнозировать динамику их развития.

Особая (неархимедова) структура и свойства (иерархичность, дискретность, несвязность) ментального пространства вынуждают использовать для разработки модели систему координат, отличную от вещественной. В силу теоремы Островского, единственной альтернативой является ультраметрическая  $p$ -адическая система координат. Формальное описание динамических законов взаимодействия информационных состояний, по аналогии с ньютоновской механикой, позволяет предсказать (контролировать) изменение ментальных состояний и поведение мыслящей системы. Эффекты группового поведения в разработанной модели учтены путем введения потенциального поля, вид которого определяет индивидуальные поведенческие реакции.

## SUMMARY

### *Gnidko K.O.* **Modeling of Individual and Group Behavior in $P$ -adic Coordinate Systems in Order to Solve Information Security Problems.**

Development of a system for monitoring and predicting the effect of direct, accumulated and deferred destructive information-psychological impact on the personnel of critical infrastructure of the state and the population as a whole is an important task of ensuring the information security of the Russian Federation. A key element of the system under development should be a formal mathematical model that can reflect the most important aspects of individual and group behavior as well as predict dynamics of their development.

Special (non-Archimedean) structure and properties (hierarchy, discreteness, incoherence) of mental space make it necessary to develop a model based on the coordinate system other than the real. As per the Ostrovsky Theorem, the only alternative is the ultrametric  $P$ -adic coordinate system. A formal description of the dynamic interaction of mental informational states, similar to the Newtonian mechanics, allows predicting (controlling) changes in mental states and behavior of thinking systems. Effects of group consciousness in the model developed are accounted for by the introduction of a potential field, which determines the type of individual behavioral reactions.

В.Ф.Волков, А.П. КОВАЛЕВ, С.А. ПОТРЯСАЕВ, В.И. САЛУХОВ  
**АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ  
ПРИ РАЗВЕРТЫВАНИИ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

---

*Волков В.Ф., Ковалев А.П., Потрясаев С.А., Салухов В.И.* Алгоритм оперативного управления ресурсами при развертывании систем информационного обеспечения сложных технических комплексов.

**Аннотация.** Рассматривается задача управления расходом ресурсов в процессе развертывания систем информационного обеспечения сложных технических комплексов (СТК). Применение СТК по целевому назначению, как и процесс соответствующего информационного обеспечения, обычно ограничено жесткими директивными сроками, поэтому любая задержка недопустима. Ее устранение может быть реализовано часто только за счет привлечения дополнительных информационных ресурсов на последующих этапах. Разработанный алгоритм базируется на принципе оптимальности Р. Беллмана, позволяющем определять не окончательный план корректировки, а разрабатывать гибкую программу управляющих воздействий, зависящих от конкретного исхода каждого этапа, длительность которого превысила заданный норматив. Данная программа может быть реализована в соответствующих системах поддержки принятия решений, а также включена в имитационные модели процессов развертывания и применения СТК. В статье описывается детальный алгоритм оптимальной корректировки, соответствующий нормальному распределению продолжительности каждого из этапов.

**Ключевые слова:** адаптивная корректировка, информационное обеспечение, ретроспективная развертка, принцип оптимальности, условно - оптимальное управление, дополнительные ресурсы.

*Volkov V.F., Kovalev A.P., Potryasaev S.A., Salukhov V.I.* Algorithm of Sources Management in Deploying of Information Support Systems For Complicated Technical Complexes.

**Abstract.** The paper discusses a task of sources consumption management in the process of deploying information support systems for complicated technical complexes (CTC). Application of CTC as well as the process of appropriate information support are usually limited by the exact prescribed terms, so any delay is not allowable. The delay may be eliminated more often only by involving additional information sources at later stages. The developed algorithm is based on Bellman principle of optimality that allows one to define not the final correction schedule, but to operate a flexible program of control actions, depending on the concrete result at every stage, duration of which exceeds a defined norm. This program can be used in the appropriate decision support systems and can be included in the simulation models of CTC deploying and applying. The paper describes a detailed algorithm for optimal correction, corresponding to the normal distribution of stages durations.

**Keywords:** adaptive correction; information support; retrospective scan; the principle of optimality; suboptimal management; additional resources.

---

**1. Введение.** Рассмотрим процесс управления сложными техническими комплексами (СТК), функционирующими по жесткому временному регламенту. Оперативные характеристики системы информационного обеспечения СТК определяются требованиями

вышестоящих уровней управления, а специфика задач, решаемых потребителями, может ограничить функционирование СТК пределами одного технологического цикла. Примерами такого рода СТК являются комплексы доведения распорядительной информации в организационных структурах, системы блокирования потенциально опасных объектов, системы оповещения, производственные и транспортные управляющие комплексы и т.д. На практике вследствие влияния случайных или неучтенных факторов всегда существует риск не уложиться в заданный потребителями целевой информации срок доставки (получения) целевой информации. На стадиях развертывания систем информационного обеспечения (РСИО) возникают аналогичные ситуации [1, 2, 7, 9, 15]. Один из возможных подходов к расчету данных рисков заключается в последовательном уточнении значений вероятностей успешного выполнения задачи информационного обеспечения (либо задачи РСИО) с учетом фактического времени, затраченного на предыдущие этапы.

**2. Постановка задачи.** Обозначим  $z_{nl}$  — плановое (нормативное) значение продолжительности всего цикла развертывания системы информационного обеспечения (РСИО);  $\hat{t}_i$  — продолжительность  $i$ -го этапа,  $i = (1, N)$ , т.е.  $\sum_{i=1}^N \hat{t}_i^{nl} = z_{nl}$ .

Будем полагать, что параметры распределения величин  $\hat{t}_i$  и  $\hat{z} = \sum_{i=1}^N \hat{t}_i$  однозначно связаны с соответствующими директивными характеристиками.

Пусть первый этап процесса РСИО был реализован за время  $t_1^*$ , причем  $t_1^* > t_1^{nl}$ , т.е. величина  $t_1^* - t_1^{nl}$  - это величина задержки (опоздания) и продолжительность выполнения задачи РСИО подлежит уточнению:  $\hat{z}_1 = \hat{z} / t_1^* = t_1^* + \hat{t}_2 + \hat{t}_3 + \dots + \hat{t}_N$ , где  $\hat{z} / t_1^*$  — оценка ожидаемой продолжительности выполнения задачи, учитывающая факт опоздания после завершения первого этапа.

Обозначим  $R_{t_1}^*$  — риск невыполнения требований потребителя (заказчика) по сроку развертывания системы информационного обеспечения СТК. Очевидно,  $R_{t_1}^* = 1 - \gamma_{t_1}^*$ , где  $\gamma_{t_1}^*$  — вероятность выполнения задачи РСИО, вычисляемая с учетом

опоздания на первом этапе. Применив аппарат теории характеристических функций [4, 12], получим:

$$\gamma_{z_1}^* = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ju(\hat{t}-t_1^*)} du \cdot \prod_{i=2}^N e^{jux} \varphi_{t_i}^*(x; A_{<K_i>}) dx, \text{ где:}$$

$$\varphi_{t_1}^* = \int_0^{z_{nl}} \varphi_{z_1}^*(t) dt, \quad j^2 = -1.$$

При невыполнении неравенства  $\gamma_{t_1}^* \geq \gamma_{dur}$ , где  $\gamma_{dur}$  — директивное значение, на оставшихся этапах необходимо проведение дополнительных оперативных мероприятий по обеспечению гарантированного выполнения задачи РСИО с требуемой вероятностью  $\gamma_{dur}$  в заданный срок  $z_{nl}$ . В результате этих мероприятий в конечном итоге произойдет корректировка параметров  $A_{<K_i>}$  оставшихся этапов. В данной статье ограничимся рассмотрением корректировки только одного последующего этапа.

Обозначим  $Y_{<K_2>}$  — дополнительно привлекаемые ресурсы, т.е.  $A'_{<K_2>} = A_{<K_2>} + Y_{<K_2>}$ ;  $f^{(2)}$  — функция зависимости стоимости  $\Delta S^{(2)}$  корректировки от значений дополнительных ресурсов, т.е.  $\Delta S^{(2)} = f^{(2)}(Y_{<K_2>})$ .

Тогда вектор корректировок должен обеспечивать выполнение равенства  $\gamma_{t_i} = \gamma_{dur}$ .

Пусть реализовано  $(\nu - 1)$  этапов, т.е.

$$\hat{z} / T_{(\nu-1)}^* = \hat{z}_{\nu-1} = \sum_{i=1}^{\nu-1} \hat{t}_i^* + \hat{t}_{\nu} + \dots + \hat{t}_N, \text{ тогда риск невыполнения задачи}$$

информационного обеспечения в заданный срок с учетом исхода  $(\nu - 1)$ -го этапов определяется по формуле:

$$R_{<\nu-1>}^* = 1 - \int_0^{z_{nl}} \gamma_{\hat{z}/T_{<\nu-1>}}^*(t) dt, \text{ где}$$

$$\gamma_{\hat{z}/T_{<\nu-1>}}^* = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ju(t - \sum_{i=1}^{\nu-1} \hat{t}_i^*)} du \cdot \prod_{i=\nu}^N e^{jux} \varphi_{t_i}^*(x; A_{<K_i>}) dx.$$

Задача оптимальной корректировки процесса РСИО формулируется следующим образом. Требуется определить такие



Пусть после корректировки параметров  $M[\hat{t}_2], \sigma[\hat{t}_2]$  реализован 2-ой этап и  $\gamma_2^* < \gamma$ . Тогда стоимость дополнительно используемых на 3-ем этапе ресурсов будет пропорциональна суммарной величине «опоздания»:  $(\hat{t}_1^* - m_1 + \hat{t}_2^* - m_2)$ .

Аналогично,  $\Delta s^{(4)} \sim \hat{t}_1^* - m_1 + \hat{t}_2^* - m_2 + \hat{t}_3^* - m_3$ .

Выберем в качестве параметра состояния  $\hat{x}$  величину «опоздания». Это дискретная случайная величина, принимающая значения:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \hat{t}_1^* - m_1; \\ \hat{x}_2 &= \hat{t}_1^* - m_1 + \hat{t}_2^* - m_2; \\ \hat{x}_3 &= \hat{t}_1^* - m_1 + \hat{t}_2^* - m_2 + \hat{t}_3^* - m_3 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

**4. Алгоритм динамической корректировки.** Вероятность своевременного информационного обеспечения с учетом исхода  $\hat{t}_1^*$  первого этапа равна:

$$\Delta s^{(2)} \sim \hat{t}_1^* - t_1^{nl} = \hat{t}_1^* - m_1$$

$$\gamma_1^* = \frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{z_1^{nl} - \hat{t}_1^* - m_2 - m_3 - m_4}{\sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \sqrt{2}} \right) + 1 \right], \quad (3)$$

где  $\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ .

При  $\gamma_1^* < \gamma$ :

$$m_2' = m_2 + y_1, \quad \sigma_2' = \sigma_2 + y_1', \quad \text{т.е. } Y_{(K_2)} = \langle y_1 y_1' \rangle^T. \quad (4)$$

Затраты на корректировку равны:  $\Delta \hat{s}^{(2)} = \Delta s^{(2)}(\hat{x}_1, y_1, y_1')$ , а компоненты вектора корректировки должны удовлетворять равенству:

$$\frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{z_1^{nl} - \hat{t}_1^* - m_2 - y_1 - m_3 - m_4}{\sqrt{(\sigma_2 + y_1')^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} \sqrt{2}} \right) + 1 \right] = \gamma \quad \text{или} \quad y_1' = \psi_1(y_1, \hat{t}_1^*). \quad (5)$$

Пусть  $t_2 = t_2^{**} = t_2^*(y_1, y_1')$ . Вероятность  $\gamma_2^{**}$  равна:

$$\gamma_2^{**} = \frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{z^{nl} - t_1^* - t_2^{**} - m_3 - m_4}{\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_4^2} \sqrt{2}} \right) + 1 \right]. \quad (6)$$

При  $\gamma_2^{**} < \gamma$ :

$$\left. \begin{aligned} m_3' &= m_3 + y_2, \sigma_3' = \sigma_3 + y_2'; \\ Y_{\langle K_3 \rangle} &= \langle y_2, y_2' \rangle^T; \\ \Delta \hat{s}^{(3)} &= \Delta s^{(3)}(\hat{x}_2, y_2, y_2'). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Введем понятие «суммарного показателя затрат на корректировку», после реализации и корректировки третьего этапа он равен:

$$\hat{\eta}_{2,3}(\hat{x}_1, y_1, y_1', y_2, y_2') = \Delta s^{(2)}(\hat{x}_1, y_1, y_1') + \Delta s^{(3)}(\hat{x}_2, y_2, y_2'), \quad (8)$$

где компоненты  $y_2, y_2'$  вектора корректировки на третьем этапе удовлетворяют равенству:

$$\frac{1}{2} \left[ \Phi \left( \frac{z^{nl} - t_1^* - t_2^{**} - m_3 - y_2 - m_4}{\sqrt{(\sigma_3 + y_2')^2 + \sigma_4^2} \sqrt{2}} \right) + 1 \right] = \gamma \text{ или } y_2' = \psi_2(y_2, t_1^*, t_2^{**}). \quad (9)$$

Аналогично рассуждая, получим задачу определения оптимальных (в смысле выбранного критерия) значений вектора корректировки. Заметим, что обратить в минимум величину  $\hat{\eta}_{2,3,4}$  нельзя, т.к. при любой нашей корректировке суммарные затраты  $\hat{\eta}_{2,3,4}$  (а также и затраты  $\Delta \hat{s}^{(v)}$  на каждом шаге) остаются случайной величиной. Однако мы можем выбрать такую корректировку, при которой среднее значение  $M[\hat{\eta}_{2,3,4}]$  стоимости дополнительных используемых ресурсов будет минимально.

**5. Функция дополнительных затрат.** Пусть  $t_1 = t_1^*$ . Чтобы «уложиться» в заданное время  $z^{nl}$ , мы должны каким-то образом распределить «опоздание»  $x_1 = t_1^* - m_1$  по оставшимся этапам. Если мы хотим компенсировать это «опоздание»  $x_1$  на втором этапе, то,

очевидно, должны проводить такую корректировку параметров распределения его продолжительности, которая уменьшит и математическое ожидание  $\bar{t}_2$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\hat{t}_2}$ , т.е. должно быть:

$$\begin{aligned}\Delta\bar{t}_2 &= \bar{t}'_2 - \bar{t}_2 < 0, \\ \Delta\sigma_{\hat{t}_2} &= \sigma'_{\hat{t}_2} - \sigma_{\hat{t}_2} < 0.\end{aligned}$$

При этом очевидно, стоимость корректировки пропорциональна модулям величин  $\Delta\bar{t}_2, \Delta\sigma_{\hat{t}_2}$ , т.е.  $\Delta s^{(2)} \sim |\Delta\bar{t}_2|$ ;  $\Delta s^{(2)} \sim |\Delta\sigma_{\hat{t}_2}|$ , но  $\Delta\bar{t}_2 = y_1$ ,  $\Delta\sigma_{\hat{t}_2} = y'_1$ .

Можно доказать, что среднее значение суммарного показателя эффективности корректировки равно:

$$\eta_{2,3,4}(x_1, y_1, y'_1, y_2, y'_2, y_3, y'_3) = \sum_{v=1}^3 c_v^x x_v + c_v^{\Delta m} y_v^2 + c_v^{\Delta\sigma} y'_v,$$

где

$$\begin{aligned}x_1 &= t_1^* - m_1, y'_1 = \psi_1(y_1, t_1^*), \\ x_2 &= x_1 + y_1, y'_2 = \psi_2(y_2, t_1^*, t_2^{**}), \\ x_3 &= x_2 + y_2, y'_3 = \psi_3(y_3, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{**}).\end{aligned}\tag{10}$$

**6. Составление и решение рекуррентных функциональных уравнений.** Сформулируем задачу оптимизации корректировки процесса ИО для рассматриваемого примера. Требуется определить такие значения  $\tilde{y}_1, \tilde{y}'_1, \tilde{y}_2, \tilde{y}'_2, \tilde{y}_3, \tilde{y}'_3$  компоненты вектора корректировки на каждом шаге, которые дают минимум среднего суммарного показателя затрат на корректировку (10):

$$\eta_{2,3,4}(x_1, \tilde{y}_1, \tilde{y}'_1, \tilde{y}_2, \tilde{y}'_2, \tilde{y}_3, \tilde{y}'_3) = \min_{\{Y\}}(x_1, \tilde{y}_1, \tilde{y}'_1, \tilde{y}_2, \tilde{y}'_2, \tilde{y}_3, \tilde{y}'_3) = \mu$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned}y'_1 &= \psi_1(y_1, t_1^*), \\ y'_2 &= \psi_2(y_2, t_1^*, t_2^{**}), \\ y'_3 &= \psi_3(y_3, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{**}).\end{aligned} \right\}.\tag{11}$$

Для отыскания решения задачи введем в рассмотрение функцию:

$$\mu_N(x) = \min_{\{Y\}} \eta_{2,3,\dots,N}(x, y_1, y'_1, \dots, y_{N-1}, y'_{N-1}). \quad (12)$$

Пусть  $\mu_1(x)$  — средние минимальные затраты на корректировку программы работ в одношаговой операции, начинающейся в состоянии  $x$ .

Для второго этапа (первого шага):

$$\mu_{1(x)} = \min_{\{y_1, y'_{1y}\}} \Delta s^{(2)}(x, y_{1y}, y'_{1y}), \quad (13)$$

при  $y'_{1y} = \psi_1(y_{1y}, t_1^*)$ .

Далее переходим к 2-х шаговой операции:

$$\mu_2(x) = \min_{\{y_{2y(x)}, y'_{2y(x)}\}} \left[ \Delta s^{(2)}(x, y_{2y}, y'_{2y}) + \mu_1(x + \underbrace{\tilde{y}_{1y}}_{x_2}) \right]$$

и к 3-х шаговой операции, объединяя при этом 2-й и 3-й шаги в один шаг. Тогда в соответствии с принципом оптимальности [4]:

$$\left. \begin{aligned} \mu_3(x) &= \min_{y_{31}, y'_{31}} \Delta s^{(2)}(x_2, y_{31}, y'_{31} + \mu_2(x_2)), \\ y'_{3y} &= \psi_1(y_{3y}, t_1^*). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Величина  $\mu_2(x_2)$  определяется, так же как  $\mu_2(x_1)$ , однако на вспомогательные переменные  $y_{21}, y'_{21}$  накладывается ограничение  $y'_{21} = \psi_2(y_{21}, t_1^*, t_2^{**})$ , а на вспомогательные переменные  $y_{22}, y'_{22}$  используемые для определения  $\mu_1(x_3)$  — ограничение  $y'_{22} = \psi_3(y_{22}, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{**})$ :

$$\left. \begin{aligned} \mu_2(x_2) &= \min_{\{y_{21}, y'_{21}\}} \left[ \Delta s^{(3)}(x_2, y_{21}, y'_{21}) + \mu_1(x_3) \right]; \\ y'_{21} &= \psi_2(y_{21}, t_1^*, t_2^{**}), x_2 = x_1 + y_{1y}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_1(x_3) &= \min_{\{y_{22}, y'_{22}\}} \Delta s^{(4)}(x_3, y_{22}, y'_{22}); \\ y'_{22} &= \Psi_3(y_{22}, t_1^*, t_2^{**}, t_3^{**}), x_3 = x_2 + y_{22}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Рекуррентные соотношения (14), (15), (16) соответствуют ретроспективной развертке (обратному ходу) алгоритма, а значения:

$$\tilde{y}_{3y}(x), \tilde{y}'_{3y}(x), \tilde{y}_{2y} = \tilde{y}_{21}, \tilde{y}'_{2y} = \tilde{y}'_{21}, \tilde{y}_{1y}(x) = y_{22}, \tilde{y}'_{1y}(x) = y'_{22}$$

являются условно-оптимальными значениями компонентов вектора корректировки.

Решив последовательно функциональные уравнения (14), (15), (16), при  $x = x_1 = t_1^* - m_1$ , определяем минимальные средние дополнительные затраты на информационное обеспечение:

$$\mu = \mu_3(x_1). \quad (17)$$

Затем, построив прямую развертку (прямой ход алгоритма), определяем оптимальные значения компонент вектора корректировки.

Оптимальная корректировка на 2-ом этапе:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_1 &= \tilde{y}_3(x_1), \\ \tilde{y}'_1 &= \tilde{y}'_3(x_1). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Оптимальная корректировка на 3-ем этапе:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_2 &= \tilde{y}_{2y}(x_1), \\ \tilde{y}'_2 &= \tilde{y}'_{2y}(x_1). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Оптимальная корректировка на 4-ом этапе:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{y}_3 &= \tilde{y}_{1y}(x_1), \\ \tilde{y}'_3 &= \tilde{y}'_{1y}(x_1). \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

**7. Заключение.** Из вышеизложенного метода управления следует, что найденная оптимальная корректировка (18–20) является адаптивной и зависит от того, как будет развиваться случайный процесс информационного обеспечения.

Мы не определили жесткую «программу корректировки», но указали для каждой фазы процесса то «управление», которым следует отвечать на любой случайный исход предыдущей фазы.

Представленный алгоритм может быть переработан для других видов закона распределения продолжительности каждой из фаз, а также для вариантов с перестановкой этапов (например, вследствие изменения приоритетов или при целенаправленной рандомизации чередования фаз). Точность оценивания выигрыша от оптимизации в основном будет определяться степенью адекватности зависимостей, используемых при расчете затрат  $\Delta \hat{s}^{(v)}$ .

### Литература

1. *Александров А.Э., Якушев Н.В.* Стохастическая постановка динамической транспортной задачи с задержками с учетом разброса времени доставки // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН. 2006. № 12–13. С. 5–14.
2. *Арчибальд Р.Д.* Управление высокотехнологичными программами и проектами // М.: ДМК Пресс. 2010. 464 с.
3. *Бородинова И.А., Сараев Л.А.* Стохастические транспортные задачи // Вестник Самарского Госуниверситета. 2010. № 7(81). С.1–20.
4. *Вентцель Е.С.* Элементы динамического программирования // М.: Наука. 1964. 176 с.
5. *Грушин Д.А.* Построение модели идентификации рисков при реализации компонентов системы // Системы управления бизнес-процессами. 2014. №13. С. 10–15.
6. *Елисеев А.С., Гитман М.Б.* Оценка устойчивости производственного плана с учетом стохастичности ресурсных ограничений // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН. 2013. №42. С. 252–272.
7. *Заренков В.А.* Управление проектами: учебное пособие // СПб.: ГАСУ. 2010. 350 с.
8. *Иконникова А.Д., Соколов Б.В.* Динамическая модель планирования, модернизации и функционирования информационной системы // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2008. №11. С.62–69.
9. *Мэддон Дж.* Сто правил руководителей проекта НАСА. URL: [www.twirpx.com/file/1295724](http://www.twirpx.com/file/1295724) (дата обращения: 15.09.2015).
10. *Парамонов И.Ю., Смагин В.А., Харин В.Н.* Оценка эффективности функционирования информационной системы в условиях техногенного риска // Изв. высш. учебн. заведений: Приборостроение. 2015. № 3(58). С. 167–172.
11. *Петухов Г.Б., Якушин В.И.* Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем // М.: АСТ. 2006. 502 с.
12. *Соловьева И.В., Соколов Б.В.* Алгоритм коррекции планов работы корпоративной информационной системы на основе метода позиционной оптимизации // Труды СПИИРАН. 2012. № 20. С. 153–164.
13. *Толмачёв С.Г.* Принятие проектных решений на основе нечеткого отношения предпочтения // Информационно-управляющие системы. 2014. № 5(72). С. 42–51.
14. *Фридман А.Я., Курбанов В.Г.* Ситуационное моделирование надежности и безопасности промышленно-природных систем // Информационно-управляющие системы. 2014. № 4(71). С. 32–41.

15. Фроленков К.В. Уточнение оценок вероятностей при локальном апостериорном выводе в алгебраической байесовской сети в случае неточного свидетельства // Труды СПИИРАН. 2013. № 24. С. 152–164.

## References

1. Aleksandrov A.E., Jakushev N.V. [Stochastic formulation of the dynamic transport problem with delays in view of time scatter]. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Complex system management*. M. IPU RAN. 2006. vol. 12–13. pp. 5–14. (In Russ.).
2. Archibal'd R.D. *Upravlenie vysokotekhnologichnymi programmami i proektami* [High tech programs and projects management]. M.: DMK Press Publ. 2010. 464 p. (In Russ.).
3. Borodinova I.A., Saraev L.A. [Stochastic transport problems]. *Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta – Vestnik of Samara State University*. 2010. vol. 7(81). pp. 1–20. (In Russ.).
4. Ventcel' E.S. *Jelementy dinamicheskogo programmirovaniya* [Elements of dynamic programming]. M.: Nauka Publ. 1964. 176 p. (In Russ.).
5. Grushin D.A. [Construction of risk identification model on system components realization]. *Sistemy upravleniya biznes-processami – Business Process Management Systems*. 2014. vol. 13. pp. 10–15. (In Russ.).
6. Eliseev A.S., Gitman M.B. [Assessment of production plan stability in view of sources limits stochastics]. *Upravlenie bol'shimi sistemami – Complex system management*. Moscow: IPU RAN. 2013. vol. 42. pp. 252–272. (In Russ.).
7. Zarenkov V.A. *Upravlenie proektami: uchebnoe posobie* [Project management: tutorial]. SPb.: GASU. 2010. 350 p. (In Russ.).
8. Ikonnikova A.D., Sokolov B.V. [Dynamic model of information systems scheduling, modernization and functioning] *Izv. vyssh. uchebn. Zavedenij: Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2008. no. 11, pp.62–69. (In Russ.).
9. Madden J. *Sto pravil rukovoditelej proekta NASA* [One Hundred Rules for NASA Project Managers]. Available at: [www.twirpx.com/file/1295724](http://www.twirpx.com/file/1295724) (accessed 15.09.2015). (In Russ.).
10. Paramonov I.U., Smagin V.A., Harin V.N. [Evaluation of information system functioning effectiveness in conditions of technogenic risk]. *Izv. vyssh. uchebn. zavedenij: Priborostroenie – Journal of Instrument Engineering*. 2015. vol. 3(58). pp. 167–172. (In Russ.).
11. Petuhov G.B., Jakunin V.I. *Metodologicheskie osnovy vneshnego proektirovaniya celenapravlennyh processov i celeustremlennyh sistem* [Methodological basics of purposeful processes and systems external projecting]. M. AST Publ. 2006. 502 p. (In Russ.).
12. Solovyova I.V., Sokolov B.V. [Algorithm of corporative informational system functioning schedules correction by means of positional optimization method]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2012. vol. 20. pp. 153–164. (In Russ.).
13. Tolmachyov S.G. [Project decisions making by means of unclear preference relation]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. SPb. 2014. vol. 5(72). pp. 42–51. (In Russ.).
14. Fridman A.J., Kurbanov V.G. [Situational modeling of industrial and natural systems reliability and safeness]. *Informacionno-upravljajushhie sistemy – Information and Control Systems*. 2014. vol. 4(71). pp. 32–41. (In Russ.).
15. Frolenkov K.V. [Clarification of probability values assessment at local a posteriori conclusion in Bayes algebraic net in case of inaccurate evidence]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 24. pp. 152–164. (In Russ.).

**Волков Валерий Федорович** — д-р воен. наук, профессор, профессор кафедры системного анализа и управления, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: теория эффективности, исследование операций, системный анализ. Число научных публикаций — 250. valfedvolkov@gmail.com; ул. Ждановская 13, Санкт-Петербург, 197198; р.т.: +7(951)652-32-63.

**Volkov Valery Fedorovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of systems analysis and control department, Mozhaisky Military Space Academy. Research interests: theory of effectiveness, operations research, system analysis. The number of publications — 250. valfedvolkov@gmail.com; 13, Zhdanovskaya street, St.-Petersburg, 197198, Russia; office phone: +7(951)652-32-63.

**Ковалев Александр Павлович** — д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: системный анализ, теория надежности, модели и методы принятия решений в сложных организационных системах с использованием аэрокосмических данных. Число научных публикаций — 150. kbarsenal@peterlink.ru, <http://www.litsam.ru>; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-01-03, Факс: +7(812)328-44-50.

**Kovalev Alexander Pavlovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, Honored scientist of the Russian Federation, leading researcher of laboratory for information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: system analysis, reliability theory, models and methods of decision making in complex organizational systems using aerospace data. The number of publications — 150. kbarsenal@peterlink.ru, <http://www.litsam.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-01-03, Fax: +7(812)328-44-50.

**Потрясаев Семен Алексеевич** — к-т техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: разработка научных основ теории управления структурной динамикой сложных организационно-технических систем. Число научных публикаций — 40. spotryasaev@gmail.com; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: (812)328-0103, Факс: (812)328-4450.

**Potryasaev Semen Alekseevich** — Ph.D., senior researcher of laboratory for information technologies in systems analysis and modeling, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: analyses of systems, reliability theory, mathematical models and methods of decision-making support in complex technical-organizational systems with the use of aerospace data. The number of publications — 40. spotryasaev@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: (812)328-0103, Fax: (812)328-4450.

**Салухов Владимир Иванович** — к-т техн. наук, доцент, руководитель исследовательской группы информационных технологий в образовании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: информационные технологии в образовании, управление

жизненным циклом инфотелекоммуникационных систем, анализ и разработка систем поддержки принятия решений на базе современных информационных технологий. Число научных публикаций — 50. vsaluhov@bk.ru; 14-я линия В.О., д. 39, Санкт-Петербург, 199178; p.t.: +7(812)3280382.

**Salukhov Vladimir Ivanovich** — Ph.D., associate professor, head of research group of information technologies in education, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: research and information technologies in education, lifecycle management infocommunication systems, analysis and development of support systems and decision making on the basis of modern information technologies. The number of publications — 50. vsaluhov@bk.ru; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)3280382.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации: СПбГПУ (мероприятие 6.1.1), ИТМО (субсидия 074–U01), гранта РФФИ № 16-19-00199, грантов РФФИ (№ 16-57-00172-Бел\_а, 16-07-00779, 16-08-01068, 16-07-01277, 15-07-08391, 15-08-08459, 16-08-00510, 16-07-00925) Программы фундаментальных научных исследований ОНИТ РАН (проект № 2.11).

**Acknowledgements.** Work is executed at financial support of the leading universities of the Russian Federation: STU (activity 6.1.1), the ITMO University (grant 074–U01), grant RSF № 16-19-00199, RFBR grants (No. 16-57-00172-Bela, 16-07-00779, 16-08-01068, 16-07-01277, 15-07-08391, 15-08-08459, 16-08-00510, 16-07-00925), Program of fundamental scientific research ONIT Russian Academies of Sciences (grant 2.11).

## РЕФЕРАТ

### *Волков В.Ф., Ковалев А.П., Потрясаев С.А., Салухов В.И.* **Алгоритм оперативного управления ресурсами при развертывании систем информационного обеспечения сложных технических комплексов.**

Рассматривается задача управления расходом ресурсов в процессе развертывания систем информационного обеспечения (РСИО) сложных технических комплексов (СТК). Применение СТК по целевому назначению, как и процесс соответствующего информационного обеспечения, обычно ограничено жесткими директивными сроками, поэтому любая задержка недопустима. Ее устранение может быть реализовано часто только за счет привлечения дополнительных информационных ресурсов на последующих этапах. Разработанный алгоритм базируется на принципе оптимальности Р. Беллмана, позволяющем определять не окончательный план корректировки, а разрабатывать гибкую программу управляющих воздействий, зависящих от конкретного исхода каждого этапа, длительность которого превысила заданный норматив. Данный алгоритм может быть реализован в соответствующих системах поддержки принятия решений, а также включен в имитационные модели процессов развертывания и применения СТК. В статье описывается детальный алгоритм оптимальной корректировки, соответствующий нормальному распределению продолжительности каждого из этапов. В качестве "индикатора" рассматривается величина риска невыполнения требований потребителя (заказчика) по сроку развертывания системы информационного обеспечения СТК, в качестве параметра состояния — величина «опоздания».

Выбранный показатель уточняется после определения оценки ожидаемой продолжительности выполнения задачи с учетом отставания, возникшего после очередного этапа. Корректировка реализуется по критерию минимизации дополнительно привлекаемых информационных ресурсов при ограничении на риск невыполнения задач РСИО в заданный срок. На примере четырехэтапного процесса РСИО для варианта одношаговой корректировки приводится аналитическое решение. Такой вариант может иметь место не только для РСИО, но и для самого процесса ИО СТК: например, первый этап — предварительное получение информации от внешних источников; второй этап — априорное получение информации от собственных средств; третий этап — оперативное получение информации от собственных средств; четвертый этап — контроль факта исполнения запланированных действий. Представленный алгоритм может быть переработан для других видов закона распределения продолжительности каждой из фаз, а также для вариантов с перестановкой этапов (например, вследствие изменения приоритетов или при целенаправленной рандомизации чередования фаз). Точность оценивания выигрыша от оптимизации в основном будет определяться степенью адекватности зависимостей, используемых при расчете затрат на корректировку.

## SUMMARY

### *Volkov V.F., Kovalev A.P., Potryasaev S.A., Salukhov V.I.* **Algorithm of Sources Management in Deploying of Information Support Systems for Complicated Technical Complexes.**

The paper discusses a task of sources consumption management in the process of deploying information support systems for complicated technical complexes (CTC). Application of CTC as well as the process of the corresponding information support are usually limited by the exact prescribed terms, so any delay is not allowable. The delay may be eliminated more often only by involving additional information sources at later stages. The developed algorithm is based on Bellman principle of optimality that allows one to define not the final correction schedule, but to operate a flexible program of control actions, depending on the concrete result at every stage, duration of which exceeds a defined norm. This program can be used in the appropriate decision support systems and can be included in the simulation models of CTC deploying and applying. The paper describes a detailed algorithm for optimal correction, corresponding to the normal distribution of stages durations. An “indicator” is represented by the risk magnitude of failure to comply with customer’s requirements as to duration of information support system deploying, and a state parameter is represented by the value of “delay”. The selected indicator is specified after assessing the expected duration of task performing, considering the delay that occurs after the next stage. Correction is carried out according to the criterion of minimization of additional information sources, when restricted to the risk of failure of information support system deploying in a given period. The paper presents an analytical solution in terms of the four-stage information support system deploying process for one-step correction option. Such an option can take place not only for information support systems deploying, but also for the process of CTC information support: for example, the first stage is prior obtaining of information from external sources; the second stage is prior obtaining of information from own funds; the third stage is operational obtaining of information from own funds; the fourth stage is the control of scheduled operations performing. The submitted algorithm can be reworked for other distribution laws of stage durations and for options with permutation of stages (for example, because of the priority changes or targeted randomization of phase sequence). The accuracy of estimating a gain from optimization will be basically determined by the degree of adequacy of the dependencies used for calculating costs of adjustment.

Д.В. ИВАНЬКО, А.А. КАРПОВ  
**АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КАМЕР ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКОЙ ВИДЕОИНФОРМАЦИИ**

---

*Иванько Д.В., Карпов А.А. Анализ перспектив применения высокоскоростных камер для распознавания динамической видеоинформации.*

**Аннотация.** Рассматриваются актуальные и перспективные направления по использованию высокоскоростных камер. Обсуждается возможность применения высокоскоростных камер в области человеко-машинного взаимодействия для автоматического распознавания динамической видеоинформации (в том числе визуальной речи диктора). Выделяются основные задачи взаимодействия, решаемые с помощью высокоскоростных камер, такие как: автоматическое чтение речи по губам диктора, обнаружение моргания, распознавание микровыражений. Обозначаются возможные проблемы, связанные с внедрением высокоскоростных видеокамер. Анализируется состояние области исследований на настоящий момент и доказывается, что имеется высокая актуальность развития данного научно-технического направления. Предлагаются многообещающие области применения и задачи организации человеко-машинного взаимодействия с применением высокоскоростной видеосъемки. Основными направлениями являются аудиовизуальное распознавание слитной речи и чтение речи по губам диктора. В ходе дальнейших исследований планируется реализация подобной многомодальной системы аудиовизуального распознавания речи для русского языка с использованием микрофона и высокоскоростной видеокамеры JAI Pulnix.

**Ключевые слова:** высокоскоростная видеокамера, компьютерное зрение, аудиовизуальное распознавание речи, аудиовизуальная база данных, чтение по губам, динамическая видеоинформация.

*Ivanko D.V., Karpov A.A. An Analysis of Perspectives for Using High-Speed Cameras in Processing Dynamic Video Information.*

**Abstract.** In this paper, we review the actual and perspective areas of use of high-speed video cameras. We discuss the possibility of applying high-speed cameras in the field of human-computer interaction to detect dynamic video information (including visual speech). We also describe main tasks, which can be solved with high-speed cameras, such as: automatic lip-reading, eye blink detection, facial micro-expression recognition, etc. We identify potential challenges associated with introduction of high-speed video cameras and analyze the conditions of research area. Besides, we analyze state-of-the-art in the field at the moment and prove that there is an urgent need for further scientific and technical developments in this area. According to it we propose some advanced applications and tasks in the human-computer interaction domain, where high-speed video capturing can be useful, such as audio-visual continuous speech recognition and automatic reading speech by lips. In further research, we will implement such a multimodal system for audio-visual Russian speech recognition using a microphone and a high-speed video camera JAI Pulnix.

**Keywords:** high-speed video camera, computer vision, audio-visual speech recognition, audio-visual data corpus, lip-reading, dynamic video information.

---

**1. Введение.** В последние годы высокоскоростные видеокамеры, обеспечивающие получение видеоданных с частотой более 50 кадров в секунду, и соответствующее оборудование активно

применяются для решения различных задач в научных исследованиях, контроле и промышленности. На их основе также разрабатываются технологии для обработки и анализа изображений: от простых систем машинного зрения до интеллектуальных средств контроля сложными динамическими процессами. Устройства, предназначенные для высокоскоростной видеосъемки, существенно отличаются от бытовых, охранных и Интернет видеокамер. В силу того, что научные и промышленные видеокамеры имеют высокую чувствительность в различных областях спектра и лучшую скорость съемки, то передают изображения без сжатия. Возможно использование скоростных видеокамер в комбинации с лазерами, специальной оптикой, средствами ввода, обработки и анализа сигналов. Подобные видеокамеры используются для измерений, диагностики и контроля динамических объектов, быстро движущихся или изменяющихся во времени. Промышленные видеокамеры обеспечивают высокоскоростную съемку на промышленных предприятиях, например, в конвейерах. Машинное зрение дает возможность не только обнаруживать существующие дефекты объектов, но и оценивать их размеры, вести статистику, записывать и выдавать результат работы за определенный отчетный период. Высокоскоростная камера способна инспектировать как плоские поверхности, так и детали сложных меняющихся форм, что позволяет существенно улучшить качество сборки и упаковки, повысить производительность и снизить процент брака в готовой продукции.

Благодаря быстрому технологическому прогрессу в последние годы появилось множество типов высокоскоростных видеокамер, а также их ценовая доступность улучшилась. Поэтому актуальной задачей становится использование таких камер в задачах распознавания и обработки динамической информации, имеющей визуальное представление.

## **2. Направления использования высокоскоростных камер.**

Первоначально для записи быстропротекающих событий высокоскоростные видеокамеры использовали пленку, но на сегодняшний день подобные устройства являются полностью электронными и используют либо устройство с зарядовой связью (англ. charge-coupled device, CCD), либо КМОП-матрицу (англ. CMOS, active pixel sensor).

Скоростная видеосъемка, как правило, используется для визуализации процессов, которые в обычных условиях недоступны для человеческого глаза, так как протекают слишком быстро. Скоростные

видеокамеры находят, в частности, следующие применения ([http://tm.spbstu.ru/Высокоскоростная\\_видеокамера](http://tm.spbstu.ru/Высокоскоростная_видеокамера)):

1) Научно-исследовательские задачи: регистрация и видеосъемка быстропротекающих процессов, скоростная съемка испытаний, гидродинамика.

2) Оборонная промышленность и испытательные полигоны: испытания вооружений и средств защиты, баллистика, съемка взрыва, траектория полета пули и т.д.

3) Авиация и космос: скоростная видеосъемка при испытаниях газотурбинных двигателей, съемка запусков ракет, аэродинамика, испытания авиационных кресел.

4) Настройка и диагностика скоростных производственных линий (конвейеров), поиск неисправностей: упаковка и производство сигарет, пластиковых бутылок и т.п.

5) Автомобильная промышленность: испытания автомобилей и подушек безопасности.

6) Спорт и медицина: биомеханика, анализ движений спортсмена и отдельных его органов и мышц.

7) Телевидение и киноиндустрия: съемка спецэффектов, рекламы, замедленная съемка спортивных соревнований и т.д.

8) Системы и интерфейсы для анализа действий и поведения пользователей при человеко-машинном взаимодействии.

Помимо классификации высокоскоростных видеокамер в зависимости от области применения, также интересно рассмотреть их классификацию по скорости видеосъемки:

1) До 500 кадров в секунду. Подобная видеосъемка используется для исследования объектов живого мира, в большинстве машин и механизмов, для баллистических исследований и т.д.

2) До 40000 кадров в секунду. Подобная видеосъемка используется в физике, химии горения и взрыва, космической и авиационной технике, бионике и т.д.

3) Видеосъемка с частотой до нескольких миллионов кадров в секунду. Используется в исследованиях лазерных излучений, по быстрому горению и взрывам, диагностике плазмы и пр.

Последние достижения в области электронно-оптических приборов обеспечивают временное разрешение видеосъемки менее чем в пятьдесят пикосекунд, что эквивалентно более чем 20 млрд кадров в секунду.

**3. Возможности применения высокоскоростных видеокамер в области человеко-машинного взаимодействия.** Особую актуальность для систем управления различными техническими

устройствами, подвижными объектами, роботами и смартфонами приобретают интеллектуальные средства человеко-машинного взаимодействия, основанные на наиболее естественных для пользователя модальностях (способах коммуникации), таких как естественная речь, жесты, позы и движения рук и тела, мимика, эмоции и т.д.

Наряду с голосовым человеко-машинным взаимодействием, основанным на технологиях автоматического распознавания и синтеза речи, большой популярностью пользуются также такие направления, как: распознавание поз, движений, жестов и элементов жестового языка, эмоций, мимики и др. с целью последующего использования полученной информации для организации более эффективного взаимодействия с пользователем. При разработке систем, предназначенных для работы с людьми с ограниченными возможностями, остро встает вопрос организации эффективного способа человеко-машинного взаимодействия и, в частности, наиболее полного использования получаемой видеoinформации. В подобных задачах применение высокоскоростных камер помогает значительно улучшить показатели работы системы, например, в ассистивных технологиях для людей с ограниченными возможностями или в системах распознавания жестового языка для глухих и слабослышащих людей. Далее мы остановимся на основных направлениях применения скоростных видеокамер для средств человеко-машинного взаимодействия и биометрических систем более подробно.

#### 1) Обнаружение моргания.

Одной из биометрических задач, для решения которой могут успешно применяться высокоскоростные видеокамеры, является автоматическое обнаружение моргания. Этот вопрос более подробно освещается в работах [1] и [2]. Моргание (естественное закрытие и открытие век) является жизненно важным для поддержания целостности (влажности) поверхности глаза. Такие характеристики, как продолжительность моргания и скорость, могут значительно варьироваться в зависимости от состояния здоровья глаз человека. При этом процесс моргания настолько быстр, что необходимы специальные методы для его видеозахвата и распознавания. В работе [1] высокоскоростная камера использовалась для записи и обнаружения моргания 25 добровольцев; данные были записаны с частотой 600 кадров в секунду. Используя полученную информацию, данное исследование выделило четыре фазы одного цикла моргания: закрывание (динамический процесс), закрытое состояние, начальное

открытие и основное открытие. Анализ изображений с высокоскоростной камеры был использован для расчета глазной диафрагмы, пиковой скорости моргания, средней скорости и продолжительности моргания. После чего было произведено сравнение с данными, полученными с помощью других методов, ранее использовавшихся для оценки произвольного моргания. Было определено, что один цикл моргания занимает приблизительно  $572 \pm 25$  мс. При этом процесс закрытия происходит гораздо быстрее открытия (250 мс против 160 мс). Закрытое состояние глаз имеет минимальную продолжительность, а стадия основного открытия — максимальную. В сравнении с результатами других методов, использование высокоскоростной камеры является наиболее надежным и предоставляющим необходимую информацию более полно. По результатам исследования высокоскоростная камера успешно применяется для диагностики таких заболеваний, как блефароспазм, щитовидная болезнь глаз, миопатический птоз и т.д. [2].

Кроме того, моргание или подмигивание могут являться полезными сигналами при организации человеко-машинного взаимодействия, например, в ассистивных технологиях, предназначенных для полностью парализованных людей.

## 2) Распознавание микровыражений.

Известным фактом является полезность анализа микровыражений лица в задачах обнаружения враждебных намерений или опасного поведения людей [3]. Микровыражения — это непродолжительные и произвольные движения мышц, появляющиеся на лице человека, когда он пытается скрыть или подавить свои эмоции. Обычно они появляются в ситуациях с высоким внутренним напряжением человека.

Существует техническая проблема в распознавании микровыражений, заключающаяся в том, что средняя их продолжительность по времени составляет от  $1/3$  до  $1/25$  секунды. Это обуславливает необходимость применения высокоскоростной камеры: скорость записи в 200 кадров в секунду обеспечивает как минимум 10 кадров на любое движение лица, тем самым значительно повышая вероятность автоматического обнаружения микровыражений.

В работе [4] высокоскоростная камера использовалась для определения произвольной мимики и представлялся метод распознавания микровыражений на видеозаписях. На первом этапе высокоскоростная камера используется для записи данных со скоростью 200 кадров в секунду. На втором этапе изображения лиц разбиваются на несколько графических областей (регионов), и движение каждого

региона распознается на основе 3D-ориентированного гистограммного дескриптора (3D-gradients orientation histogram descriptor) [4]. В этой работе представлены результаты распознавания 13 микровыражений человека. Использование высокоскоростной камеры позволило исследователям разработать уникальные признаки на основе трех фаз микровыражений: фаза сжатия (сокращение мышц), фаза действия (движение мышц) и фаза высвобождения (расслабление мышц).

### 3) Автоматическое чтение речи по губам диктора.

На сегодняшний день эффективность систем автоматического распознавания речи, применяемых в контролируемых условиях (например, офисы), достигла относительно высокого уровня. Тем не менее, если система работает в среде, отличной от той, в которой она была обучена, ее эффективность значительно снижается из-за внешнего акустического шума. Чтобы преодолеть эту проблему необходимо добавить дополнительную информацию из других каналов коммуникации, которые не попадают под воздействие акустического шума. Визуальная информация является естественным источником дополнительной речевой информации, так как люди также используют ее в своей повседневной жизни. Визуальные сигналы очень важны для лучшего восприятия и понимания произносимой речи, например, глядя в лицо собеседнику, нам легче понимать его речь. Сигналы от визуальных и слуховых каналов дублируют и дополняют друг друга, что помогает правильно воспринимать речь во многих сложных ситуациях, например, при воздействии динамических акустических шумов, или когда одновременно говорят несколько человек. Также известно, что слабослышащие и пожилые люди, а также неносители языка в большей степени опираются на визуальную информацию, выражаемую движениями губ и лицевыми мышцами, чем на акустическую. В науке хорошо известен также «эффект Мак-Гурка» [5], когда правильное восприятие произносимых диктором звуков речи и слогов возникает только при объединении акустической и визуальной информации от артикуляции губ, но не по отдельности.

Научные исследования показывают хорошие результаты также для аудиовизуального (многомодального) распознавания речи в случае изменения отношения аудиосигнал/шум. Однако, независимо от метода, используемого для извлечения визуальных признаков речи, существует большая разница между аудио- и видеосигналами, поскольку видеосигнал оцифровывается с частотой 25-30 кадров в секунду (frames per second — fps), в то время как аудиоданные обычно имеют частоту значительно выше (от 8000 до 44100 Гц). Очевидным решением данной проблемы является интерполяция более

«медленного» видеосигнала в соответствии с более «быстрым» аудиосигналом. Однако в этом случае возникает вопрос: какое количество полезной информации теряется в случае выполнения интерполяции. И что произойдет в том случае, если использовать видеопоток с более высокой частотой дискретизации.

Известным фактом является то, что добавление визуальной информации улучшает качество автоматического распознавания речи. Тем не менее, используемая частота дискретизации стандартных видеоданных (25-30 кадров в секунду) значительно меньше частоты сегментирования аудиосигналов при автоматическом распознавании речи (100-200 сегментов в секунду). Основываясь на данном факторе, применение высокоскоростных камер с частотой следования кадров (100-200 fps) в задаче автоматического распознавания речи является актуальной.

В работе [6] анализируется доля потерянной информации о речи из-за низкой частоты дискретизации. Эксперименты проводились в двух сценариях с применением высокоскоростной видеокамеры (модель FASTCAM-APX RS 250K): 1) при использовании записей, сделанных с помощью высокоскоростной видеокамеры; 2) на речи, синтезированной с использованием виртуальной «говорящей головы». Оба эксперимента проводились как для медленного (четкое проговаривание и артикуляция), так и для быстрого (естественного) темпов речи. Результаты показывают, что в случае низкой скорости речи потери полезной информации не столь существенны, чтобы оправдать затраченные ресурсы при работе с высокой скоростью записи видеоданных. Тем не менее при высокой или нормальной скорости речи вероятность потери полезной информации в сигнале гораздо выше. Таким образом, в этом случае необходимо использовать высокие скорости видеозаписи. Этот результат можно объяснить тем, что при медленном темпе речи наши видимые органы речеобразования (в частности, губы и язык) делают более широкие и полные движения (иногда даже наблюдается гиперартикуляция) по сравнению со случаем, когда скорость речи является высокой. Также во время высокого темпа речи виземы (конфигурация формы губ при произнесении звуков речи — фонем) содержат меньше полезной информации для слушающего. Следовательно, с помощью более высокой скорости видеозаписи возможно захватывать больше необходимой информации о речи диктора. В работе [6] делается вывод, что частота видеоданных, равная 15 fps, является слишком низкой скоростью записи для распознавания, а частота 25 fps является слишком низкой скоростью для

высокого/нормального темпа речи (слитной речи). При этом частота дискретизации свыше 250 fps будет являться излишней, т.к. уже не несет никакой дополнительной информации. Таким образом, оптимальной для задач автоматического анализа и распознавания визуальной или аудиовизуальной речи можно считать частоту от 60 до 200 кадров в секунду.

В работах [7, 8] высокоскоростная видеокамера (модель Pike F032C) применяется для задач автоматического чтения голландской речи по губам диктора (без использования аудиоинформации). Представленные эксперименты основаны на корпусе видеоданных, записанных с частотой дискретизации 100 кадров в секунду. Используемый в данной работе корпус NDUTAVSC является наибольшим корпусом голландской речи, предназначенным для исследования чтения речи по губам. Для параметризации входных видеоданных в работе используется активная модель внешнего вида (англ. Active Appearance Model, AAM). Данная модель [9] обеспечивает определение набора геометрических признаков высокого уровня, который применяется при обучении системы распознавания объектов для решения следующих задач: распознавание последовательности цифр фиксированной длины, распознавание случайной последовательности слов, распознавание слитной речи и др. Также в работе исследуется вопрос влияния высокоскоростной записи на эффективность распознавания речи в целом. В работе делается вывод, что при высоком темпе речи необходимо использовать значительно большую скорость записи видеоданных, чем стандартные 25 кадров в секунду.

В работе [8] использовалась видеокамера модели Pike F032C производства AVT. Камера обладает возможностью записи видео в черно-белом режиме с частотой 200 кадров в секунду с максимальным разрешением 640×480 пикселей. При более низком оптическом разрешении скорость записи может быть увеличена. В работе детально рассмотрен процесс создания системы чтения речи по губам на основе данных, собранных с применением высокоскоростной видеокамеры.

В таблице 1 приведено сравнение технических характеристик высокоскоростных видеокамер, которые использовались исследователями при решении различных задач биометрии и в распознавании речи.

Наличие представительного корпуса речевых данных является фундаментом любой успешной системы автоматического распознавания, основанной на статистическом моделировании. В работе [10] проводится сравнительный анализ существующих

корпусов данных. Выявляются их недостатки, и делается вывод о необходимости создания больших корпусов с более сложной структурой. В работе приводятся принципы, опираясь на которые, происходит построение корпуса, адекватного прикладной задаче. Было рассчитано, что при частоте дискретизации видео в 25 fps в среднем приходится только 3 кадра на одну визему (при этом на некоторые виземы приходится не более 1 кадра). Корпус записан с частотой 100 Гц и включает в себя данные голландской речи в высоком темпе (т.е. более 160 слов в минуту) при среднем числе видеок кадров на визему около 8.

Таблица 1. Технические характеристики рассматриваемых видеокамер

Наименование	Grasshopper 0.3 MP Color [1,2]	Phantom v7.3 [3]	Pike F032C [7, 8]	JAI PulnixRMC-6740GE [12, 13]
Разрешение (пикселей)	640 × 480	800 × 600	640 × 480	640 × 480
Максимум кадров/сек.	200	6688	208	200
Требования к питанию	8 – 30 DC	100 – 240 AC 20 – 36 DC	8 – 36 DC	12 DC
Вес (грамм)	104	3175	250	194
Стоимость (USD)	≥ 3 495	≥ 9 999	≥ 2 150	≥ 4 000
Изображение				

В научной литературе представлен также корпус данных NDUTAVSC (The New Delft University of Technology Audio Visual Speech Corpus), содержащий большой набор слов и фонетически богатых фраз. В каждой сессии записи дикторов-добровольцев просили произнести случайные предложения, случайный набор цифр, случайный набор букв, открытые вопросы. Фразы были разделены по категориям: нормальный темп речи, быстрый темп, шепотная речь и др. Корпус состоит из 10,5 часов слитной речи 66 дикторов (20 женщин и 46 мужчин). В статье [11] также описан корпус данных английской речи, записанный с использованием повышенной скорости записи в 60 кадров в секунду.

В недавних российских работах [12] и [13] была также представлена идея создания аудиовизуального корпуса русской речи при помощи высокоскоростной видеокамеры (JAI Pulnix RMC-6740GE) и динамического микрофона (Oktava МК-012), в которых предлагаются новые способы синхронизации и интеграции данных из независимых источников. На рисунке 1 показана общая архитектура предложенной многомодальной системы распознавания аудиовизуальной речи [14].

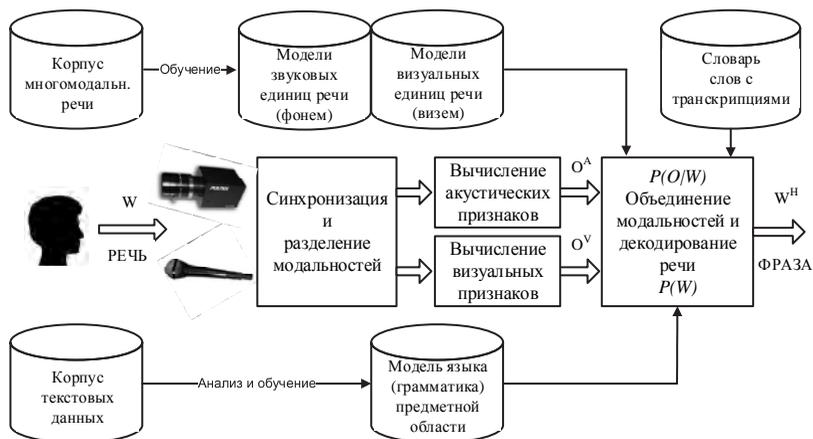


Рис.1. Архитектура многомодальной системы распознавания аудиовизуальной речи

В работе [14] приводится реализация автоматической системы многомодального (по аудио- и видеоинформации) распознавания речи на основе методов объединения информации с применением весовых коэффициентов аудио- и видеомодальностей речи. В [15] более подробно рассматриваются возможные стратегии объединения модальностей и анализируются методы интеграции многомодальной информации с целью обнаружить наиболее эффективный способ объединения разнородной информации (визуальной, акустической, текстовой и иных типов).

В работе [16] рассматривается возможность создания универсальной ассистивной технологии и интерфейса для людей с ограниченными возможностями здоровья, где использование высокоскоростной камеры в блок распознавания речи и динамических изображений может повысить качество функционирования всей системы.

**4. Заключение.** На сегодняшний день применение высокоскоростных видеокамер оправдывает себя в решении многих задач человеко-машинного взаимодействия и биометрии. Среди них можно выделить такие направления, как: автоматическое чтение речи по губам диктора и аудиовизуальное распознавание речи, построение многомодальных корпусов слитной речи, обнаружение моргания, распознавание эмоций и микровыражений.

Применение высокоскоростных камер, помимо медицинских исследований по обнаружению моргания, также представляет интерес в таких задачах, как биометрическая идентификация человека, определение витальности (проверка, что человек на видео живой), защита биометрических систем идентификации и верификации личности от несанкционированных взломов (спуфинг атак) с использованием информации о процессе моргания. Несмотря на свою актуальность, подобные исследования в литературе пока не описаны, таким образом, можно утверждать, что данная область открыта для исследований.

Автоматическое распознавание видимой речи по губам, также как и аудиовизуальное распознавание речи, являются очень актуальными направлениями исследований на сегодняшний день. Создаваемые системы распознавания нуждаются в представительных корпусах речи для обучения, однако, на настоящий момент существует крайне мало аудиовизуальных корпусов речевых данных, записанных с помощью высокоскоростной видеокамеры. Основываясь на этом факте, можно сделать вывод о том, что применение высокоскоростных камер в задачах распознавания речи только делает первые шаги в науке, и имеется острая потребность в создании видео и многомодальных корпусов речевых данных для реализации эффективных систем распознавания.

Таким образом, существующие на данный момент аппаратные технологии позволяют записывать данные с очень высокой частотой кадров (до нескольких тысяч кадров в секунду). Однако затраты на оборудование и ресурсы, необходимые для хранения и обработки высоких скоростей записи, пока еще достаточно высоки для их массового применения. Но можно с уверенностью предсказать, что уже через 3-5 лет высокоскоростные видеокамеры будут распространены повсеместно, в том числе в мобильных устройствах и смартфонах.

Основываясь на актуальности направления комплексирования автоматического чтения речи по губам диктора и распознавания речи, авторами в дальнейшем планируется реализация многомодальной системы аудиовизуального распознавания слитной русской речи

с использованием микрофона и промышленной высокоскоростной видеокамеры JAI Pulnix RMC-6740GE, обеспечивающей частоту кадров до 200 fps.

## Литература

1. *Kwon K., Shipley R.J., Edirisinghe M., Ezra D.G., Rose G., Best S.M., Cameron R.E.* High-speed camera characterization of voluntary eye blinking kinematics // *Journal of the Royal Society Interface*. 2013. vol. 10. no. 85. pp. 86–91.
2. *Ohzeki K.* Video analysis for detecting eye blinking using a high-speed camera // *Proc. 40<sup>th</sup> Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC)*. USA. 2006. Part. 1. pp. 1081–1085.
3. *Bettadapura V.* Face expression recognition and analysis: the state of the art // *Tech. Report*. College of Computing. USA, Georgia Institute of Technology. 2012. pp. 1–27.
4. *Polykovsky S., Kameda Y., Ohta Y.* Facial micro-expressions recognition using high speed camera and 3D-gradient descriptor // *Proc. 3rd International Conference on Crime Detection and Prevention (ICDP)*. Japan. 2009. pp. 1–6.
5. *McGurk H., MacDonald J.* Hearing lips and seeing voices // *Nature*. 1976. vol. 264. no. 5588. pp. 746–748.
6. *Chitu A.G., Rothkrantz L.J.M.* The Influence of Video Sampling Rate on Lipreading Performance // *Proc. International Conference on Speech and Computer SPECOM 2007*. Russia. 2007. pp. 678–684.
7. *Chitu A.G., Driel K., Rothkrantz L.J.M.* Automatic lip reading in the Dutch language using active appearance models on high speed recordings // *Text, Speech and Dialogue* / Ed. by Sojka P., Horák A., Kopeček I., Pala K. Brno: Springer LNCS (LNAD). 2010. vol. 6231. pp. 259–266.
8. *Chitu A.G., Rothkrantz L.J.M.* On dual view lipreading using high speed camera // *Proc. 14<sup>th</sup> Annual Scientific Conference Euromedia*. Belgium. 2008. pp. 43–51.
9. *Biswas A., Sahu P.K., Bhowmick A., Chandra M.* AAM based features for multiple camera visual speech recognition in car environment // *Proc. 3rd International Conference on Recent Trends in Computing*. 2015. vol. 57. pp. 614–621.
10. *Chitu A.G., Rothkrantz L.J.M.* Dutch multimodal corpus for speech recognition // *Proc. LREC 2008 Workshop on Multimodal Corpora*. Morocco. 2008. pp. 56–59.
11. *Potamianos G., Graf H.P., Cosatto E.* An image transform approach for HMM based automatic lipreading // *Proc. IEEE International Conference on Image Processing*. USA. 1998. vol. 3. pp. 173–177.
12. *Karpov A., Ronzhin A., Kipyatkova I.* Designing a Multimodal Corpus of Audio-Visual Speech using a High-Speed Camera // *Proc. 11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Signal Processing*. China. 2012. pp. 519–522.
13. *Karpov A., Kipyatkova I., Zelezny M.* A framework for recording audio-visual speech corpora with a microphone and a high-speed camera // *Proc. International Conference on Speech and Computer SPECOM 2014*. Serbia. 2014. vol. 8773, pp. 50–57.
14. *Карпов А.А.* Реализация автоматической системы многомодального распознавания речи по аудио- и видеоинформации // *Автоматика и Телемеханика*. 2014. Вып. 75. № 12. С. 125–138.
15. *Басов О.О., Карпов А.А.* Анализ стратегий и методов объединения многомодальной информации // *Информационно-управляющие системы*. СПб.: ГУАП. № 2. 2015. С. 18–30.
16. *Karpov A., Ronzhin A.* A Universal Assistive Technology with Multimodal Input and Multimedia Output Interfaces // *Universal Access in Human-Computer Interaction* /

Ed. by. Stephanidis C., Antona M. Heidelberg: Springer. 2014. vol. 8513. pp. 369–378.

## References

1. Kwon K., Shipley R.J., Edirisinghe M., Ezra D.G., Rose G., Best S.M., Cameron R.E. High-speed camera characterization of voluntary eye blinking kinematics. *Journal of the Royal Society Interface*. 2013. vol. 10. no. 85. pp. 86–91.
2. Ohzeki K. Video analysis for detecting eye blinking using a high-speed camera. Proc. 40<sup>th</sup> Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ACSSC). USA. 2006. Part. 1. pp. 1081–1085.
3. Bettadapura V. Face expression recognition and analysis: the state of the art. Tech. Report. College of Computing, USA, Georgia Institute of Technology. 2012. pp 1–27.
4. Polykovsky S., Kameda Y., Ohta Y. Facial micro-expressions recognition using high speed camera and 3D-gradient descriptor. Proc. 3rd International Conference on Crime Detection and Prevention (ICDP). Japan. 2009. pp. 1–6.
5. McGurk H., MacDonald J. Hearing lips and seeing voices. *Nature*. 1976. vol. 264. no. 5588, pp. 746–748.
6. Chitu A.G., Rothkrantz L.J.M. The Influence of Video Sampling Rate on Lipreading Performance. Proc. International Conference on Speech and Computer SPECOM 2007. Russia. 2007. pp. 678–684.
7. Chitu A.G., Driel K., Rothkrantz L.J.M. Automatic lip reading in the Dutch language using active appearance models on high speed recordings. Text, Speech and Dialogue. Ed. by Sojka P., Horák A., Kopeček I., Pala K. Brno: Springer LNCS (LNAI). 2010. vol. 6231. pp. 259–266.
8. Chitu A.G., Rothkrantz L.J.M. On dual view lipreading using high speed camera. Proc. 14<sup>th</sup> Annual Scientific Conference Euromedia. Belgium. 2008. pp. 43–51.
9. Biswas A., Sahu P.K., Bhowmick A., Chandra M. AAM based features for multiple camera visual speech recognition in car environment. Proc. 3rd International Conference on Recent Trends in Computing, 2015. vol. 57. pp. 614–621.
10. Chitu A.G., Rothkrantz L.J.M. Dutch multimodal corpus for speech recognition. Proc. LREC 2008 Workshop on Multimodal Corpora. Morocco. 2008. pp. 56–59.
11. Potamianos G., Graf H.P., Cosatto E. An image transform approach for HMM based automatic lipreading. Proc. IEEE International Conference on Image Processing, USA. 1998. vol. 3. pp. 173–177.
12. Karpov A., Ronzhin A., Kipyatkova I. Designing a Multimodal Corpus of Audio-Visual Speech using a High-Speed Camera. Proc. 11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Signal Processing. China. 2012. pp. 519–522.
13. Karpov A., Kipyatkova I., Zelezny M. A framework for recording audio-visual speech corpora with a microphone and a high-speed camera. Proc. International Conference on Speech and Computer SPECOM 2014. Serbia. 2014. vol. 8773, pp. 50–57.
14. Karpov A. An automatic multimodal speech recognition system with audio and video information. *Automation and Remote Control*. 2014. vol. 75. no. 12. pp. 125–138.
15. Basov O.O., Karpov A.A. [An analysis of the strategies and methods of combining multimodal information]. *Analiz strategij i metodov ob'edinenija mnogomodal'noj informacii – Information and Control Systems*. 2015. no. 2, pp. 18–30.
16. Karpov A., Ronzhin A. A Universal Assistive Technology with Multimodal Input and Multimedia Output Interfaces. Universal Access in Human-Computer Interaction. Ed. by Stephanidis C., Antona M. Heidelberg: Springer. 2014. vol. 8513. pp. 369–378.

**Иванько Денис Викторович** — аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

(Университет ИТМО). Область научных интересов: автоматическое распознавание речи, многомодальные интерфейсы, аудиовизуальное распознавание речи. Число научных публикаций — 3. denis.ivanko11@gmail.com; Kronverkskiy prospect, 49, Saint-Petersburg, 197101.; p.t.: +7(812)328-0421.

**Ivanko Denis Viktorovich** — Ph.D. student, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: automatic speech recognition, multimodal interfaces, audio-visual speech recognition. The number of publications — 3. denis.ivanko11@gmail.com; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +7(812)328-0421.

**Карпов Алексей Анатольевич** — д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией речевых и многомодальных интерфейсов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: речевые технологии, многомодальные интерфейсы, автоматическое распознавание речи, аудиовизуальная обработка речи. Число научных публикаций — 220. karpov@iias.spb.su; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; p.t.: +7(812)328-0421, Факс: +7(812)328-7081.

**Karpov Alexey Anatolievich** — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, head of the speech and multimodal interfaces laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: automatic speech recognition, multimodal interfaces, audio-visual speech recognition. The number of publications — 220. karpov@iias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-0421, Fax: +7(812)328-7081.

**Поддержка исследований.** Исследование выполнено при финансовой поддержке фонда РФФИ (проект № 15-07-04415-а) и Совета по грантам Президента РФ (проект № МД-3035.2015.8).

**Acknowledgements.** The research is financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No. 15-07-04415-a) and by the Council for Grants of the President of Russia (Project No. MD-3035.2015.8).

## РЕФЕРАТ

*Иванько Д.В., Карнов А.А.* **Анализ перспектив применения высокоскоростных камер для распознавания динамической видеоинформации.**

В последние годы высокоскоростные видеокамеры, обеспечивающие получение видеоданных с частотой более 50 кадров в секунду (frames per second (fps) > 50 Гц) и соответствующее оборудование активно применяется для решения различных задач в научных исследованиях, контроле и промышленности. Актуальной задачей становится использование таких камер в задачах распознавания и обработки динамической информации, имеющей визуальное представление.

В статье рассматриваются перспективные направления использования высокоскоростных видеокамер. Обсуждается возможность применения высокоскоростных камер в области человеко-машинного взаимодействия для автоматического распознавания динамической видеоинформации (в том числе визуальной речи диктора). Выделяются основные задачи взаимодействия, решаемые с помощью высокоскоростных камер, такие как: автоматическое чтение речи по губам диктора, обнаружение моргания глаз человека, обнаружение микровыражений лица. Обозначаются возможные проблемы, связанные с внедрением высокоскоростных видеокамер.

По результатам исследования предлагаются перспективные области применения и задачи организации человеко-машинного взаимодействия с применением высокоскоростной видеосъемки, основным из которых являются аудиовизуальное распознавание слитной речи и чтение речи по губам диктора. В ходе дальнейших исследований планируется реализация подобной многомодальной системы аудиовизуального распознавания речи для русского языка с использованием микрофона и высокоскоростной видеокамеры JAI Pulnix.

## SUMMARY

### ***Ivanko D.V., Karpov A.A. An Analysis of Perspectives for Using High-Speed Cameras in Processing Dynamic Video Information.***

Recently high-speed video cameras which provide video data with a frequency more than 50 fps (frames per second) > 50 Hz) and the appropriate equipment is actively used for different tasks in scientific research, monitoring and industry. A perspective goal is to use these high-speed cameras for speech recognition tasks and processing of dynamic information that has a visual representation.

In this paper, we review the actual and perspective areas of use of high-speed video cameras. We discuss the possibility of applying high-speed cameras in the field of human-computer interaction to detect dynamic video information (including visual speech). We also describe main tasks, which can be solved with high-speed cameras, such as: automatic lip-reading, eye blink detection, facial micro-expression recognition, etc. We identify potential challenges associated with introduction of high-speed video cameras and analyze the conditions of research area.

We analyze state-of-the-art in the field at the moment and according to it we propose some advanced applications and tasks in the human-computer interaction domain, where high-speed video capturing can be useful, such as audio-visual continuous speech recognition and automatic reading speech by lips. In further research, we will implement such a multimodal system for audio-visual Russian speech recognition using a microphone and a high-speed video camera JAI Pulnix.

В.Н. ДРОЗДОВ, А.А. АБДУЛЛИН  
**ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ С НУЛЯМИ  
ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ**

---

*Дроздов В.Н., Абдуллин А.А.* **Проблемы управления объектами с нулями передаточной функции.**

**Аннотация.** Нули объектов управления являются причиной возникновения сложностей при проектировании регуляторов для таких объектов. Это влияние, в частности, проявляется в безредукторных приводах с упругой нагрузкой, конечномерные модели которых имеют нули. В текущей литературе трудности проектирования регуляторов объясняются ослаблением свойств управляемости или наблюдаемости объектов с нулями. В статье показывается, что свойства управляемости и наблюдаемости не могут объяснить трудности построения регуляторов для объектов с нулями, т.к. эти свойства не инвариантны к выбору базиса. Предлагается вместо свойств управляемости и наблюдаемости рассматривать свойство полноты объекта. Близость объекта к вырождению, к потере полноты, определяет трудности проектирования регуляторов. Анализируется один из способов регуляризации процедуры синтеза - редукция модели объекта.

**Ключевые слова:** количественные меры управляемости и наблюдаемости, полнота объекта, вырожденность объекта, синтез регулятора, регуляризация синтеза, безредукторный привод, упругий объект.

*Drozдов V.N., Abdullin A.A.* **Control Problems of Objects with Zeros of the Transfer Function.**

**Abstract.** Zeros of the control objects are the cause of difficulties in control system design process. In particular, this effect takes place in direct drive servo with elastic coupling whose finite-dimensional models have zeros. In modern literature, these difficulties are associated with the attenuation of controllability and observability of the objects with zeros. This article shows that controllability and observability properties could not explain the problem of the control system design process for objects with zeros because these properties are not invariant to the choice of basis. It is proposed to consider the completeness property of the object instead of the controllability and observability properties. The proximity of the object to singularity or to a loss of the completeness determines the difficulty of the control system design process. The article analyzes one of the methods to regularize the control system synthesis procedure.

**Keywords:** quantitative measures of controllability and observability, completeness of the object, singularity of the object, synthesis of the controller, regularization of the synthesis, direct drive servo, object with elastic coupling.

---

**1. Введение.** Основное внимание исследователей, занимающихся разработкой регуляторов состояния, традиционно сосредоточено на распределении собственных чисел в проектируемой системе. Однако игнорирование наличия нулей у объекта управления может привести к нежелательным последствиям. На этот факт, в частности, обратили внимание специалисты, работающие с безредукторным приводом. Отказ от понижающих редукторов повлек за собой существенное влияние упругих свойств объектов управления на свойства электропривода [1–5]. Упругие конструкции являются

объектами с распределёнными параметрами, модели которых имеют вид дифференциальных уравнений в частных производных. При решении практических задач в подобных случаях строятся аппроксимирующие модели в виде обыкновенных дифференциальных уравнений [1–5]. Особенность конечномерных моделей объектов с упругими связями состоит в том, что они имеют нули.

Наличие нулей влияет на такие важные характеристики системы, как матрицы управляемости и наблюдаемости. Введённые в обиход теории управления Р. Калманом [6], эти матрицы позволяют устанавливать свойства управляемости и наблюдаемости динамических систем. При введении понятий управляемости и наблюдаемости Калман обходит вниманием вопрос количественной меры управляемости и наблюдаемости. Однако от числовых характеристик этих матриц, в сильной степени зависят результаты процедуры синтеза регуляторов. В связи со сказанным в последнее время появились работы, в которых предпринимаются попытки построения количественных мер управляемости и наблюдаемости объектов [2, 7–15]. Более того, на основании сравнения мер управляемости и наблюдаемости принимаются решения о выборе структуры регулятора [2, 13].

Количественные меры управляемости и наблюдаемости в перечисленных работах связываются с какими-либо числовыми характеристиками матриц управляемости  $\mathbf{P}_c$  и наблюдаемости  $\mathbf{P}_o$  в некотором исходном или первичном базисе. Определение первичного базиса остаётся за кадром, а свойства указанных матриц меняются кардинальным образом при изменении базиса в пространстве состояний анализируемого объекта. Замена матриц управляемости и наблюдаемости грамианами кардинально ничего не меняет, т.к. грамиан управляемости равен  $\mathbf{G}_c = \mathbf{P}_c \mathbf{P}_c^T$ , а грамиан наблюдаемости  $\mathbf{G}_o = \mathbf{P}_o^T \mathbf{P}_o$  [16].

## 2. Управляемость и наблюдаемость объектов с нулями.

Матрицы управляемости и наблюдаемости непрерывных объектов:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \\ y = \mathbf{C}\mathbf{x}, \end{cases} \quad (1)$$

а также дискретных объектов:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{m+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_m + \mathbf{B}u_m, \\ y_m = \mathbf{C}\mathbf{x}_m, \end{cases} \quad (2)$$

с одномерным входом и одномерным выходом, как известно [6], равны:

$$\mathbf{P}_c = [\mathbf{B} \quad \mathbf{A}\mathbf{B} \quad \dots \quad \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}], \quad \mathbf{P}_o = \left[ \mathbf{C}^T \quad (\mathbf{C}\mathbf{A})^T \quad \dots \quad (\mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1})^T \right]^T.$$

Выполним преобразование базиса согласно выражению  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{M}\mathbf{x}$  в пространстве состояний объектов (1) и (2), матрицы модели состояния объектов в новом базисе будут:

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{M}\mathbf{A}\mathbf{M}^{-1}, \quad \tilde{\mathbf{B}} = \mathbf{M}\mathbf{B}, \quad \tilde{\mathbf{C}} = \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}.$$

Матрицы управляемости и наблюдаемости в новом базисе:

$$\tilde{\mathbf{P}}_c = [\tilde{\mathbf{B}} \quad \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{B}} \quad \dots \quad \tilde{\mathbf{A}}^{n-1}\tilde{\mathbf{B}}], \quad \tilde{\mathbf{P}}_o = \left[ (\tilde{\mathbf{C}})^T \quad (\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}})^T \quad \dots \quad (\tilde{\mathbf{C}}\tilde{\mathbf{A}}^{n-1})^T \right]^T$$

или

$$\tilde{\mathbf{P}}_c = \mathbf{M}\mathbf{P}_c, \quad \tilde{\mathbf{P}}_o = \mathbf{P}_o\mathbf{M}^{-1}. \quad (3)$$

Выбирая различные базисы, будем получать различные свойства матриц управляемости и наблюдаемости. Отсюда следует, что употреблять выражения «управляемость объекта» или «наблюдаемость объекта» надо с осторожностью. Правильнее будет судить об управляемости или наблюдаемости соответствующей пары матриц  $(\mathbf{A}, \mathbf{B})$  или  $(\mathbf{A}, \mathbf{C})$ . Тем более сомнительным является принятие в качестве основы метода синтеза регулятора количественную оценку степени управляемости или степени наблюдаемости объекта управления.

Напрашивается вывод, что вместо управляемости и наблюдаемости целесообразно рассматривать некоторое инвариантное свойство объекта, не зависящее от выбора базиса в пространстве состояний. Характеристикой такого свойства может служить матрица:

$$\mathbf{P}_{oc} = \mathbf{P}_o\mathbf{P}_c. \quad (4)$$

В соответствии с (3):

$$\tilde{\mathbf{P}}_{oc} = \tilde{\mathbf{P}}_o\tilde{\mathbf{P}}_c = \mathbf{P}_o\mathbf{M}^{-1}\mathbf{M}\mathbf{P}_c = \mathbf{P}_o\mathbf{P}_c = \mathbf{P}_{oc}.$$

Матрицы такого типа называются матрицами Ганкеля. Эта матрица инвариантна относительно преобразования базисов и имеет прозрачный физический смысл, она описывает эксперимент Ганкеля, характеризующий связь пространств прошлых входных и будущих

выходных сигналов [12, 16–19]. Содержание эксперимента Ганкеля удобнее всего проиллюстрировать для дискретного объекта (2). Решение разностного уравнения (2) при нулевом начальном состоянии имеет вид:

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}u_0 + \mathbf{A}^{n-2}\mathbf{B}u_1 + \dots + \mathbf{A}\mathbf{B}u_{n-2} + \mathbf{B}u_{n-1}.$$

Преобразуем последнее выражение следующим образом:

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{P}_c \mathbf{u}, \quad \mathbf{u}^T = [u_0 \quad u_1 \quad \dots \quad u_{n-1}]. \quad (5)$$

Пусть теперь  $u_n = u_{n+1} = \dots = 0$  и будем вычислять выходной сигнал системы, тогда получим:

$$\begin{aligned} y_n &= \mathbf{C}\mathbf{x}_n, \\ y_{n+1} &= \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{x}_n, \\ &\dots \\ y_{2n-1} &= \mathbf{C}\mathbf{A}^{n-1}\mathbf{x}_n. \end{aligned}$$

Представим вектор значений выходного сигнала в виде  $\mathbf{y} = \mathbf{P}_o \mathbf{x}_n$ ,  $\mathbf{y}^T = [y_{n+1} \quad y_{n+2} \quad \dots \quad y_{2n-1}]$ . Воспользовавшись (5), это выражение запишем в виде:

$$\mathbf{y} = \mathbf{P}_o \mathbf{P}_c \mathbf{u} = \mathbf{P}_{oc} \mathbf{u}. \quad (6)$$

Ганкелев оператор с матрицей (4), в отличие от передаточной функции, не только отображает пространство входных сигналов в пространство выходных, но и характеризует степень (интенсивность) участия различных собственных подпространств объекта в этой процедуре отображения. Эта степень участия оценивается сингулярными числами матрицы (4). Сама матрица согласно [20] называется матрицей полноты объекта. В том случае, когда матрица  $\mathbf{P}_{oc}$  не вырождена, объект называется полным, он полностью управляем и полностью наблюдаем, независимо от базиса. Если же  $\text{rang}(\mathbf{P}_{oc})$  меньше размерности пространства состояний, то объект вырождается, степень знаменателя передаточной функции становится меньше размерности пространства состояний. По этой причине матрицу  $\mathbf{P}_{oc}$  можно назвать также матрицей вырожденности. Приближение определителя матрицы вырожденности к нулю говорит об ослаблении связи между пространствами входа и выхода.

Проиллюстрируем сказанное простейшим примером. Рассмотрим управление объектом с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{s+a}{(s+b)(s+c)}. \quad (7)$$

Для получения модели состояния представим структурную схему объекта в следующем виде (рисунок 1).

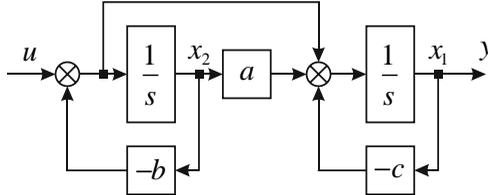


Рис. 1. Структурная схема объекта в первом базисе

Матрицы модели состояния объекта в этом базисе равны:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -c & a-b \\ 0 & -b \end{bmatrix}, \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_1 = [1 \ 0]. \quad (8)$$

Матрица управляемости объекта и её определитель равны:

$$\mathbf{P}_{c,1} = \begin{bmatrix} 1 & a-b-c \\ 1 & -b \end{bmatrix}, d_{c,1} = c-a. \quad (9)$$

Матрица наблюдаемости объекта и её определитель равны:

$$\mathbf{P}_{o,1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -c & a-b \end{bmatrix}, d_{o,1} = a-b. \quad (10)$$

Из (9) следует, что при  $a \rightarrow c$  в случае изменения параметров объект становится неуправляемым. В структурной схеме на рисунке 1 неуправляемой становится координата состояния  $x_1$ . Согласно (10) при  $a \rightarrow b$  объект становится ненаблюдаемым. В структурной схеме на рисунке 1 ненаблюдаемой становится координата состояния  $x_2$ .

Выполнив преобразование координат в пространстве состояний исследуемого объекта с матрицей преобразования:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{a-c} \begin{bmatrix} b-c & a-b \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с (3) получим в новом базисе матрицу управляемости и её определитель:

$$\mathbf{P}_{c_{II}} = \begin{bmatrix} 1 & -c \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, d_{c_{II}} = 1.$$

В этом базисе объект всегда будет представляться полностью управляемым.

Матрица наблюдаемости объекта и её определитель во втором базисе будут:

$$\mathbf{P}_{o_{II}} = \begin{bmatrix} 1 & a-b \\ a-b-c & b^2-ab \end{bmatrix}, d_{o_{II}} = (a-b)(c-a). \quad (11)$$

Из (11) следует, что при совпадении нуля  $a$  с любым из полюсов оказывается ненаблюдаемой координата состояния, соответствующая этому полюсу.

В каноническом управляемом базисе матрица управляемости объекта и её определитель равны:

$$\mathbf{P}_{c_{III}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -b-c \end{bmatrix}, d_{c_{III}} = -1.$$

Естественно, что в этом случае объект всегда будет представляться полностью управляемым.

Матрица наблюдаемости объекта и её определитель в этом базисе:

$$\mathbf{P}_{o_{III}} = \begin{bmatrix} a & 1 \\ -bc & a-b-c \end{bmatrix}, d_{o_{III}} = (a-b)(a-c).$$

Отсюда следует, что объект будет восприниматься как ненаблюдаемый при совпадении нуля с любым из полюсов.

В каноническом наблюдаемом базисе матрица наблюдаемости равна матрице управляемости объекта в каноническом управляемом базисе,

$$\mathbf{P}_{o_{IV}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -b-c \end{bmatrix}, d_{o_{IV}} = -1,$$

следовательно, объект всегда будет восприниматься как полностью наблюдаемый.

Матрица управляемости объекта в этом базисе соответственно будет:

$$\mathbf{P}_{c_{IV}} = \begin{bmatrix} a & -bc \\ 1 & a-b-c \end{bmatrix}, d_{c_{IV}} = (a-b)(a-c).$$

Отсюда следует, что объект будет восприниматься как неуправляемый при совпадении нуля с любым из полюсов.

На этом простом примере видно, что говорить о количественных мерах управляемости и наблюдаемости объекта не имеет смысла. Допустимо рассматривать количественные меры управляемости и/или наблюдаемости соответствующих пар матриц.

Матрица вырожденности  $\mathbf{P}_{oc}$  и её определитель для данного объекта в любом базисе одни и те же:

$$\mathbf{P}_{oc} = \begin{bmatrix} 1 & a-b-c \\ a-b-c & c(b+c-a)-ab+b^2 \end{bmatrix}, d_{oc} = (a-b)(a-c).$$

Приближение нуля к любому из полюсов устремляет определитель матрицы вырожденности к нулю, при этом ослабляется связь между пространствами входа и выхода. При нулевом значении определителя матрицы вырожденности объект вырождается, теряет полноту. Некоторые подпространства перестают участвовать в передаче входного сигнала. В передаточной функции это соответствует уменьшению степени её знаменателя.

Заметим, что объекты управления, не имеющие нулей, не могут быть вырожденными. Действительно, матрица полноты объекта, не имеющего нулей, имеет треугольный вид, побочная диагональ которой заполнена коэффициентом передачи  $k$  объекта, а над побочной диагональю стоят нули, определитель такой матрицы равен  $\pm k^n$ .

**3. Влияние нулей объекта на свойства регулятора.** Исходя из выражения (6), связывающего пространства входов и выходов объекта, можно предположить, что синтез регулятора, алгоритм которого вычисляет управление, обеспечивающее надлежащее изменение выходного сигнала, связан с обращением матрицы полноты  $\mathbf{P}_{oc}$ .

Исследуем эту проблему на примере того же простейшего объекта с передаточной функцией (7). Выполним синтез регулятора состояния:

$$u = -\mathbf{Kx} \tag{13}$$

для различных базисов пространства состояний объекта в предположении, что измеряется только выходная величина объекта.

В первом базисе, соответствующем структурной схеме на рисунке 1, элементы матрицы **K** равны

$$\begin{aligned} k_{1\_I} &= \frac{\gamma_1 \gamma_2 + c(\gamma_1 + \gamma_2) + c^2}{a - c}, \\ k_{2\_I} &= \frac{\gamma_1 \gamma_2 + a(\gamma_1 + \gamma_2) + ac + ab - bc}{c - a}, \end{aligned} \quad (14)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2$  — желаемые собственные числа замкнутой системы.

Согласно рисунку 1 в данном базисе измеряется только координата  $x_1$ , поэтому для реализации модального регулятора необходимо применить наблюдатель пониженной размерности [21]. В результате выполнения процедуры синтеза наблюдателя пониженной размерности преобразуем закон управления (13) к виду

$$\begin{cases} \dot{w} = (a_o + b_o n_{2\_I}) w + (b_o n_{1\_I} + 1) y, \\ u = n_{2\_I} w + n_{1\_I} y, \end{cases}$$

где  $n_{1\_I} = \frac{a_o + b}{a - b} k_{2\_I} - k_{1\_I}$ ,  $n_{2\_I} = -\frac{(a_o + b)(a_o + c)}{a - b} k_{2\_I}$ .

Из полученных выражений следует, что параметры  $n_{1\_I}$ ,  $n_{2\_I}$  регулятора обратно пропорциональны определителю матрицы полноты **P**<sub>oc</sub>. В случае близости матрицы к вырождению возникают проблемы, аналогичные решению линейной алгебраической задачи при плохой обусловленности матрицы этой задачи [22].

Проверим, можно ли избежать этой проблемы при изменении базиса пространства состояний объекта.

Для базиса, соответствующего структурной схеме на рисунке 2, коэффициенты матрицы обратных связей модального управления, вычисленные стандартным методом, имеют вид

$$k_{1\_II} = -(\gamma_1 + \gamma_2) - b - c, \quad k_{2\_II} = \gamma_1 \gamma_2 + b(\gamma_1 + \gamma_2) + b^2.$$

Поскольку выходной сигнал  $y$  не совпадает ни с одной переменной состояния в данном базисе, то для реализации закона модального управления необходимо строить наблюдатель полной

размерности. Выполнив стандартную процедуру синтеза наблюдателя полной размерности, получим алгоритм регулятора в виде:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = (\mathbf{A}_{II} - \mathbf{B}_{II}\mathbf{K}_{II} - \mathbf{RC}_{II})\bar{x} + \mathbf{R}y, \\ u = -\mathbf{K}_{II}\bar{x}, \end{cases}$$

где элементы матрицы  $\mathbf{R}$  равны:

$$r_{1-I} = \frac{c(\delta_1 + \delta_2) + c^2 + \delta_1\delta_2}{a-b}, \quad r_{2-II} = \frac{ab + ac - bc + a(\delta_1 + \delta_2) + \delta_1\delta_2}{(a-c)(b-a)},$$

а  $\delta_1, \delta_2$  — желаемые собственные числа матрицы состояния наблюдателя. Здесь также один из коэффициентов регулятора обратно пропорционален определителю матрицы вырожденности.

Для канонического управляемого базиса элементы матрицы обратных связей модального регулятора не зависят от нуля  $a$  и равны

$$k_{1-III} = -bc + \gamma_1\gamma_2, \quad k_{2-III} = -(b + c + \gamma_1 + \gamma_2).$$

В каноническом управляемом базисе, как и во втором базисе, выходной сигнал  $y$  не совпадает ни с одной переменной состояния, поэтому для реализации регулятора состояния необходимо строить наблюдатель полной размерности. Элементы матрицы входа наблюдателя по ошибке оценивания имеют вид:

$$r_{1-III} = \frac{ab + ac - bc + a(\delta_1 + \delta_2) + \delta_1\delta_2}{(a-c)(b-a)},$$

$$r_{2-III} = \frac{b^2(a-c) + c^2(a-b) + abc + (ab + ac - bc)(\delta_1 + \delta_2) + a\delta_1\delta_2}{(a-c)(a-b)}.$$

И в этом базисе коэффициенты регулятора обратно пропорциональны определителю матрицы вырожденности объекта.

Для канонического наблюдаемого базиса элементы матрицы обратных связей модального регулятора определяются из соотношений:

$$k_{1-IV} = \frac{\gamma_1\gamma_2 - bc + a(b + c + \gamma_1 + \gamma_2)}{(a-b)(c-a)},$$

$$k_{2-IV} = \frac{bc^2 + b^2c + (ac + bc + ac)(\gamma_1 + \gamma_2) + a(\gamma_1\gamma_2 + b^2 + c^2 - bc)}{(a-b)(c-a)}.$$

В данном базисе измеряется только одна переменная состояния  $x_2$ , поэтому для реализации модального регулятора необходимо синтезировать наблюдатель пониженной размерности. В результате выполнения процедуры синтеза наблюдателя пониженной размерности, найдём значения параметров наблюдателя:

$$n_{1\_IV} = a_o k_{2\_IV} - k_{1\_IV}, \quad n_{2\_IV} = (a_o + b)(a_o + c)k_{1\_IV}.$$

Здесь коэффициенты регулятора также обратно пропорциональны определителю матрицы вырожденности объекта.

Обратимся теперь к объекту с упругими связями. Типичная передаточная функция двух массового объекта управления с парой комплексно сопряжённых нулей  $-\alpha_1 \pm j\omega_1$ , парой комплексно сопряжённых полюсов  $-\alpha_2 \pm j\omega_2$  и одним вещественным полюсом  $-b$  имеет вид [1-3, 5]:

$$W(s) = \frac{s^2 + 2\alpha_1 s + m_1^2}{(s+b)(s^2 + 2\alpha_2 s + m_2^2)}, \quad m_1^2 = \alpha_1^2 + \omega_1^2, \quad m_2^2 = \alpha_2^2 + \omega_2^2.$$

Матрицы модели состояния объекта, соответствующие этой передаточной функции, равны:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -m_2^2 & -2\alpha_2 & 1 \\ 0 & 0 & -b \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} m_1^2 - m_2^2 & 2\alpha_1 - 2\alpha_2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Матрица управляемости объекта:

$$\mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -2\alpha_2 - b \\ 1 & -b & b^2 \end{bmatrix}.$$

Определитель этой матрицы равен минус единице и не зависит от нулей объекта, следовательно, в этом базисе объект всегда будет представляться полностью управляемым.

Матрица наблюдаемости объекта излишне громоздка, поэтому не будем её приводить. Определитель этой матрицы равен

$$d_o = (b^2 - 2\alpha_1 b + m_1^2) \left( 4(\alpha_1 - \alpha_2)(\alpha_1 m_2^2 - \alpha_2 m_1^2) + (m_1^2 - m_2^2)^2 \right). \quad (15)$$

Матрица вырожденности объекта также излишне громоздка, отметим только, что определитель произведения матриц равен произведению определителей перемножаемых матриц, поэтому определитель матрицы вырожденности упругого объекта с точностью до знака совпадает с (15).

При равенстве комплексных нулей и комплексных полюсов определитель равен нулю. В случае вещественного полюса  $b$  объект может потерять свойство полноты при условии:

$$b = -\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - m_1^2} \Rightarrow b = -\alpha_1 \pm j\omega_1,$$

т.е. когда комплексно сопряжённые нули неограниченно приближаются к вещественному полюсу  $b$ .

Элементы матрицы обратных связей в законе управления (13) не зависят от нулей упругого объекта. Это ожидаемый результат вследствие постоянного значения определителя матрицы управляемости. В данном базисе выходной сигнал  $y$  не совпадает ни с одной переменной состояния, поэтому для реализации закона модального управления необходимо строить наблюдатель полной размерности. Рассчитанные параметры наблюдателя излишне громоздки, поэтому не будем их приводить. Отметим только, что знаменатели этих коэффициентов совпадают с определителем (15) матрицы вырожденности.

Из рассмотренных примеров следует, что при стремлении объекта к вырождению, в частности, в случае приближения нулей объекта к полюсам, требуются всё большие по модулю коэффициенты регулятора, обеспечивающего выполнение требований к качеству проектируемой системы.

**4. Редуцирование модели объекта с нулями.** Наличие расположенных близко друг от друга нулей и полюсов объекта приводят к появлению больших коэффициентов регулятора. Дело осложняется тем, что параметры каждого конкретного объекта отличаются от номинальных, а системы с большими коэффициентами регулятора, как правило, обладают повышенной чувствительностью к изменению параметров объекта. Задача синтеза регулятора становится плохо обусловленной. Задачи, близкие к вырождению, относят к некорректным. Решение некорректных задач предусматривает их регуляризацию. Проблеме регуляризации процедуры синтеза пока что не уделяется должного внимания. Наиболее распространённым является метод редуцирования модели объекта [12, 14, 16, 17, 23–25].

Простейшим способом редуцирования является сокращение близких нуля и полюса модели и синтез регулятора для модели

меньшей размерности. Однако в действительности ноль и полюс точно совпадают друг с другом в редких случаях. Использование регулятора, синтезированного для модели меньшей размерности, приводит к появлению полюсов, отличных от заданных.

Исследуем эту проблему для простого объекта с передаточной функцией (7). Используем канонический наблюдаемый базис. Пусть полюс  $b$  и ноль  $a$  расположены близко друг к другу, такие ноль и полюс часто называют диполем [11]. Опустим этот диполь, тогда редуцированный объект вместо (7) будет иметь передаточную функцию:

$$W_{r1}(s) = \frac{1}{(s+c)}.$$

Для этого объекта используем регулятор состояния:

$$u = -k_{r1}y, \quad (16)$$

где  $-c - k_{r1} = \gamma_{r1} \Rightarrow k_{r1} = -c - \gamma_{r1}$ .

В действительности матрица состояния замкнутой системы при несовпадении значений нуля и полюса будет:

$$\mathbf{F}_{r1} = \begin{bmatrix} 0 & -bc - k_{r1}a \\ 1 & -b - c - k_{r1} \end{bmatrix}.$$

Воспользовавшись выражением для коэффициента обратной связи, преобразуем матрицу состояния к виду:

$$\mathbf{F}_{r1} = \begin{bmatrix} 0 & -bc + ac + a\gamma_{r1} \\ 1 & \gamma_{r1} - b \end{bmatrix}.$$

Собственные числа этой матрицы равны:

$$s_{1,2} = 0.5 \left( -b + \gamma_{r1} \pm \sqrt{b^2 + 2\gamma_{r1}(2a-b) + \gamma_{r1}^2 + 4c(a-b)} \right).$$

В случае равенства нулю размера диполя,  $a = b$ , одно собственное число  $s_1 = -b$ , а другое собственное число  $s_2 = \gamma_{r1}$ , что соответствует собственным числам с учётом редуцирования объекта.

В случае не равенства нулю размера диполя появляются ошибки собственных значений матрицы состояния замкнутой системы:

$$\Delta s_1 = 0.5 \left( b + \gamma_{r1} - \sqrt{b^2 + 2\gamma_{r1}(2a-b) + \gamma_{r1}^2 + 4c(a-b)} \right),$$

$$\Delta s_2 = 0.5 \left( -b - \gamma_{r1} + \sqrt{b^2 + 2\gamma_{r1}(2a-b) + \gamma_{r1}^2 + 4c(a-b)} \right).$$

Введём обозначение  $\rho_1 = a - b \Rightarrow b = a - \rho_1$ .

С учётом введённых обозначений приращения корней характеристического полинома преобразуются к виду:

$$\Delta s_1 = 0.5 \left( a - \rho_1 + \gamma_{r1} - \sqrt{(a - \rho_1)^2 + 2\gamma_{r1}(a + \rho_1) + \gamma_{r1}^2 + 4c\rho_1} \right),$$

$$\Delta s_2 = 0.5 \left( -a + \rho_1 - \gamma_{r1} + \sqrt{(a - \rho_1)^2 + 2\gamma_{r1}(a + \rho_1) + \gamma_{r1}^2 + 4c\rho_1} \right).$$

Разложим полученные выражения в ряд Тейлора в окрестности  $\rho_1 = 0$ :

$$\Delta s_1 = -\frac{c + \gamma_{r1}}{a + \gamma_{r1}} \rho_1 + \dots,$$

$$\Delta s_2 = \frac{c + \gamma_{r1}}{a + \gamma_{r1}} \rho_1 - \dots$$

Из этих выражений следует оценка сверху допустимого значения размера диполя при сокращении нуля и полюса:

$$\rho_1 < \frac{a + \gamma_{r1}}{c + \gamma_{r1}} \Delta s. \quad (17)$$

Приведенный пример носит иллюстративный характер. Проблема регуляризации процедуры синтеза регуляторов для объектов с нулями требует тщательного исследования.

**5. Заключение.** Наличие нулей конечномерных моделей объектов с упругими связями приводит к появлению трудностей при проектировании регуляторов для таких объектов. Попытка обойти эти трудности, опираясь на количественные меры управляемости и наблюдаемости объекта, не приводят к успеху. Свойства управляемости и наблюдаемости не являются инвариантами объекта и по этой причине не могут определять трудности проектирования регуляторов. Инвариантом объекта является свойство полноты

объекта. Трудности проектирования регуляторов возникают в том случае, когда объект близок к вырождению, к потере свойства полноты. Возникает ситуация, аналогичная решению плохо обусловленной линейной алгебраической задачи. По аналогии с решением этой задачи можно говорить о регуляризации процедуры синтеза регуляторов для плохо обусловленных объектов. Одним из таких методов регуляризации является редуцирование модели объекта, но далеко не единственным.

Разработка методов регуляризации процедуры синтеза регуляторов для объектов с нулями является в высокой степени актуальной задачей.

### Литература

1. *Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г.* Автоматизированный электропривод с упругими связями // СПб.: Энергоатомиздат. 1992. 288 с.
2. *Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.* Робастное модальное управление технологическими объектами // Иваново: ГОУВПО «Ивановский электротехнический университет им. В.И. Ленина». 2006. 256 с.
3. *Путов В.В., Шульдюко В.Н.* Адаптивные и модальные системы управления нелинейными упругими механическими объектами // СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2007. 244 с.
4. *Балковой А.П., Цаценкин В.К.* Прецизионный электропривод с вентильными двигателями // М.: Издательский дом МЭИ. 2010. 328 с.
5. *Абдуллин А.А., Дроздов В.Н.* Управление объектами с упругими связями // Вестник СПГУТД. Серия 1. Естественные и технические науки. 2012. № 2. С. 36–39.
6. *Калман Р.* Об общей теории систем управления // Труды I Конгресса ИФАК. М. 1961. Т.2. С. 521–547.
7. *Ушаков А.В., Оморов Р.О.* Оценка потенциальной параметрической чувствительности желаемой динамической модели в задаче модального управления // Изв. вузов. Электромеханика. 1982. № 7. С. 800–805.
8. *Ушаков А.В., Оморов Р.О.* Оценка параметрической чувствительности линейных объектов управления по степени управляемости и наблюдаемости // Изв. вузов. Электромеханика. 1984. № 8. С. 53–58.
9. *Мальшиенко А.М.* Определение индексов каузальности управляемых динамических систем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1990. № 1. С. 32–36.
10. *Кириллов О.Е., Лисиенко В.Г.* Количественный анализ управляемости и его применение к приближённой декомпозиции линейных динамических систем. // Автоматика и телемеханика. № 1. 1997. С. 47–56.
11. *Гайдук А.Р.* Синтез систем управления при слабо обусловленной полноте объектов // Автоматика и телемеханика. 1997. №9. С. 133–144.
12. *Балонин Н.А.* Новый курс теории управления движением // СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та. 2000. 160 с.
13. *Анисимов А.А.* Разработка методов структурно-параметрического синтеза, оптимизации и настройки систем автоматического управления технологическими объектами // Автореферат диссертации на соискание учёной степени д.т.н. Иваново: ГОУВПО «Ивановский электротехнический университет им. В.И. Ленина». 2013. 34 с.

14. *Жаров М.М., Русаков С.Г.* Алгоритмы редукции моделей, сохраняющие структурную разреженность в задачах схемотехнического анализа // Проблемы разработки перспективных микро- и нанозлектронных систем. М.: ИПИМ РАН. 2014. Часть I. С. 111–116.
15. *Воронин А.В.* Квалитметрия достижимости и возмущаемости линейных динамических систем // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 5. С. 74–78.
16. *Пеллер В.В.* Операторы Ганкеля и их приложения // М.: НИЦ РХД. 2005. 1028 с.
17. *Glover K.* All Optimal Hankel Norm Approximation of Linear Multivariable Systems and Their  $L_2$ -error Bounds // International Journal of Control. 1984. vol. 39. no. 6. pp. 1145–1193.
18. *Мироновский Л.А.* Ганкелев оператор и ганкелевы функции линейных систем // Автоматика и телемеханика. 1992. № 9. С. 73–86.
19. *Балонин Н.А., Мироновский Л.А.* Спектральные характеристики линейных систем на ограниченном интервале времени // Автоматика и телемеханика. 2002. №6. С. 3–22.
20. *Уонэм М.* Линейные многомерные системы управления: Геометрический подход // М.: Наука, 1980. 376 с.
21. *Кузовков Н.Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства // М.: Машиностроение. 1976. 184 с.
22. *Севастьянов Л.А., Ловецкий К.П., Ланев Е.Б.* Регулярные методы и алгоритмы расчета обратных задач в моделях оптических структур // М.: РУДН. 2008. 135 с.
23. *Суздаль В.С., Епифанов Ю.М.* Редукция модели при синтезе регуляторов для управления кристаллизацией // ВЕЖПТ. 2011. Т. 2. № 3 (50). С. 31–34.
24. *Бойченко В.А. и др.* Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры // Управление большими системами: сборник трудов. 2007. № 19. С. 23–126.
25. *Safonov M.G. Chiang R.Y.* A Schur Method for Balanced Model Reduction // IEEE Transactions on Automatic Control. 1989. vol. 34. no. 7. pp. 729–733.

## References

1. *Borcov Ju.A., Sokolovskij G.G.* *Avtomatizirovannyj jelektroprivod s uprugimi svjazjami* [Automated electric drive with elastic coupling]. SPb.: Energoatomizdat. 1992. 288 p. (In Russ.).
2. *Tjutikov V.V., Tararykin S.V.* *Robastnoe modal'noe upravlenie tehnologicheskimi obe"ktami* [Robust modal control of technological objects]. Ivanovo: ISPU Publ. 2006. 256 p. (In Russ.).
3. *Putov V.V., Shulud'ko V.N.* *Adaptivnye i modal'nye sistemy upravlenija nelinejnymi uprugimi mehanicheskimi ob"ektami* [Adaptive and modal control systems of nonlinear elastic mechanical objects]. SPb.: SPb ETU "LETI" Publ. 2007. 244 p. (In Russ.).
4. *Balkovoj A.P., Cacenkin V.K.* *Precizionnyj jelektroprivod s ventil'nymi dvigateljami* [Precision electric drive with brushless motor]. M.: MPEI Publ. 2010. 328 p. (In Russ.).
5. *Abdullin A.A., Drozdov V.N.* [Control systems for objects with elastic coupling]. *Vestnik SPGUTD. Serija 1. Estestvennye i tehnicheckie nauki – Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series. 1. Natural and engineering sciences.* 2012. vol. 2. pp. 36–39. (In Russ.).
6. *Kalman R.* [On the general theory of control systems]. *Trudy I Kongressa IFAK* [International Federation of Automatic Control Congress: Collected papers]. Moscow. 1961. vol. 2. pp. 521–547. (In Russ.).

7. Ushakov A.V., Omorov R.O. [Evaluation of potential parametric sensitivity of desired dynamic model for the problem of modal control]. *Izv. vuzov. Elektromehanika – Proceedings of the higher educational institutions: Electromechanics*. 1982. vol. 7. pp. 800–805. (in Russ.).
8. Ushakov A.V., Omorov R.O. [Parametric sensitivity evaluation of linear objects on the degree of controllability and observability]. *Izv. vuzov. Elektromehanika – Proceedings of the higher educational institutions: Electromechanics*. 1984. vol. 8. pp. 53–58. (in Russ.).
9. Malyshenko A.M. [Determining causality index of controlled dynamic systems]. *Izv. AN SSSR. Tehnicheskaja kibernetika – USSR Academy of Science. Technical cybernetics*. 1990. no. 1. pp. 32–36. (in Russ.).
10. Kirillov O.E., Lisienko V.G. [Quantitative analysis of controllability and its application to approximate decomposition of linear dynamic systems]. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and telemechanics*. 1997. no. 1. pp. 47–56. (In Russ.).
11. Gajduk A. R. [Synthesis of control systems at ill-conditioned completeness of objects]. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and telemechanics*. 1997. vol. 9. pp. 133–144. (In Russ.).
12. Balonin N.A. *Novyj kurs teorii upravlenija dvizheniem* [New course on the theory of motion control]. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta. 2000. 160 p. (In Russ.).
13. Anisimov A.A. *Razrabotka metodov strukturno-parametricheskogo sinteza, optimizacii i nastrojki sistem avtomaticheskogo upravlenija tehnologicheskimi ob'ektami: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchjonoj stepeni d.t.n.* [Development of methods of structural and parametric synthesis, optimization and tuning of automatic control systems of technological objects: abstract of the thesis for the degree of Dr.Sci.]. Ivanovo: ISPU Publ. 2013. 34 p. (In Russ.).
14. Zharov M.M., Rusakov S.G. [Model reduction algorithms which retain structural sparseness in the circuit analysis problems]. *Problemy razrabotki perspektivnyh mikro- i nanojelektronnyh sistem. Sbornik trudov* [Problems of development of advanced micro- and nanoelectronic systems. Collected papers]. Moscow: IPPM RAS Publ. 2014. vol. 1. pp. 111–116.
15. Voronin A.V. [Qualimetry of accessibility and disturbance of linear dynamic systems]. *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta – Proceedings of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. vol. 323. no. 5. pp. 74–78. (In Russ.).
16. Peller V.V. *Operatory Gankelja i ih prilozhenija* [Hankel operators and their applications]. M.: NIC RHD. 2005. 1028 p. (In Russ.).
17. Glover K. All Optimal Hankel Norm Approximation of Linear Multivariable Systems and Their  $L_{\mu}$ -error Bounds. *International Journal of Control*. 1984. vol. 39. no. 6. pp. 1145–1193.
18. Mironovskij L.A. [Hankel operator and Hankel functions of linear systems]. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and telemechanics*. 1992. no. 9. pp. 73–86. (In Russ.).
19. Balonin N.A., Mironovskij L.A. [Spectral characteristics of linear systems in a limited time interval]. *Avtomatika i telemekhanika – Automatics and telemechanics*. 2002. vol. 6. pp. 3–22. (In Russ.).
20. Uonjem M. *Linejnye mnogomernye sistemy upravlenija: Geometricheskij podhod* [Linear multi-dimensional control systems: Geometric approach]. M.: Nauka. 1980. 376 p. (In Russ.).
21. Kuzovkov N.T., *Modal'noe upravlenie i nabljudajushhie ustrojstva* [Modal control and observers]. M.: Mashinostroenie. 1976. 184 p. (In Russ.).
22. Sevast'janov L.A., Loveckij K.P., Laneev E.B. *Reguljarnye metody i algoritmy rascheta obratnyh zadach v modeljah opticheskikh struktur* [Regular methods and

- algorithms for the calculation of inverse problems in the models of optical structures]. M.: PFUR Publ. 2008. 135 p.
23. Suzdal' V.S., Epifanov Ju.M. [Model reduction at synthesis of controllers for crystallization control]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologij – East European Journal of advanced technologies*. 2011. vol. 2. no. 3 (50). pp. 31–34. (In Russ.).
  24. Bojchenko V.A., et al. [Some methods of synthesis of reduced order controllers with defined structure]. *Upravlenie bol'shimi sistemami: Sbornik trudov IPU RAN – Large-scale Systems Control: Proceedings of the Institute of Control Science of Russian Academy of Science*. 2007. vol. 19. pp. 23–126. (In Russ.).
  25. Safonov M.G. Chiang R.Y. A Schur Method for Balanced Model Reduction. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1989. vol. 34. no. 7. pp. 729–733.

**Дроздов Валентин Нилович** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (ИТМО). Область научных интересов: цифровое управление техническими системами, влияние нулей на регулятор, управление промышленным электроприводом. Число научных публикаций — 199. drozdovuprint@rambler.ru; Кронверкский проспект, 49, Санкт-Петербург, 197101; п.т.: 8(921)653-55-84.

**Drozdov Valentin Nilovich** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of electrical engineering and precision electromechanical systems department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: discrete control systems of technical objects, controllability and observability problems. The number of publications — 199. drozdovuprint@rambler.ru; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: 8(921)653-55-84.

**Абдуллин Артур Александрович** — к-т техн. наук, ассистент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (ИТМО). Область научных интересов: системы управления объектами с упругими связями, структурная и параметрическая идентификация. Число научных публикаций — 12. artur.abdullin@gmail.com; Кронверкский проспект, 49, Санкт-Петербург, 197101; п.т.: +79062763010.

**Abdullin Artur Aleksandrovich** — Ph.D., assistant of electrical engineering and precision electromechanical systems department, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: control systems of technical objects with elastic coupling, structural and parametric identification. The number of publications — 12. artur.abdullin@gmail.com; 49, Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; office phone: +79062763010.

## РЕФЕРАТ

### *Абдуллин А.А., Дроздов В.Н.* **Проблемы управления объектами с нулями передаточной функции.**

В статье рассматриваются проблемы проектирования систем управления объектами с упругими связями обусловленные наличием нулей конечномерных моделей таких объектов.

Показывается, что наличие нулей влияет на такие важные характеристики системы, как матрицы управляемости и наблюдаемости. На простом примере проиллюстрирована зависимость свойств матриц наблюдаемости и управляемости от выбора базиса в пространстве состояний анализируемого объекта. По этой причине допустимо рассматривать количественные меры управляемости и/или наблюдаемости лишь соответствующих пар матриц.

Предлагается рассматривать произведение матриц наблюдаемости и управляемости в качестве инвариантного свойства объекта, не зависящего от выбора базиса в пространстве состояний. Произведение матриц наблюдаемости и управляемости называется матрицей полноты объекта или матрицей вырожденности. Приближение определителя матрицы вырожденности к нулю говорит об ослаблении связи между пространствами входа и выхода.

Анализ влияния нулей объекта на структуру и параметры регулятора показал, что синтез регулятора, алгоритм которого вычисляет управление, обеспечивающее надлежащее изменение выходного сигнала, связан с обращением матрицы вырожденности. На простейшем примере показано, что при стремлении объекта к вырождению, в частности, в случае приближения нулей объекта к полюсам, требуются всё большие по модулю коэффициенты регулятора. При этом изменение базиса пространства состояний объекта не позволяет избежать этой проблемы.

Увеличение коэффициентов регулятора приводит к тому, что задача синтеза регулятора становится плохо обусловленной. Задачи, близкие к вырождению, относят к некорректным. Решение некорректных задач предусматривает их регуляризацию. Наиболее распространённым является метод редуцирования модели объекта. Простейшим способом редуцирования является сокращение близких нуля и полюса модели и синтез регулятора для модели меньшей размерности. Такой подход проиллюстрирован в статье на примере простого объекта второго порядка. Приведены выражения, показывающие, каким образом размер диполя влияет на ошибки собственных значений матрицы замкнутой системы при использовании редуцированной модели. Задаваясь значениями допустимых смещений полюсов, можно оценивать размер диполя, который может быть сокращён в процессе редуцирования модели.

## SUMMURY

### *Abdullin A.A., Drozdov V.N.* **Control Problems of Objects with Zeros of the Transfer Function.**

The article deals with the control system design process difficulties related to the presence of zeros in finite-dimensional models of the objects with elastic coupling.

It is shown that presence of zeros affects the controllability and observability matrices. Simple example illustrated that the controllability and observability matrices are dependent of the choice of basis in state-space of the analyzed object. Thus, it is acceptable to consider quantitative measures of controllability and observability only for specific pairs of matrices.

It is proposed to consider the multiplication of the controllability and observability matrices as a property of the object that is invariant to the choice of basis. The multiplication of the controllability and observability matrices is called completeness matrix or singularity matrix. Approaching zero determinant of the singularity matrix means the attenuation of the link between the input and output spaces.

The analysis of the impact of zeros on structure and parameters of the controller showed that its synthesis is associated with the inverse of the singularity matrix. A simple example showed that approaching the singularity, particularly in case of the proximity of zeros and poles, leads to the increase of the controller's coefficients. Changing the basis of the state space of the object is not the solution to this problem.

Due to the increase of the controller's coefficients, the problem of the synthesis becomes ill-conditioned. Problems close to singularity are referred to ill-posed problems. The solution of the ill-posed problems implies regularization. The most common method is the reduction of the object model. The simplest way assumes the reduction of closely spaced zero and pole of the model and synthesis of control system for the model of lower dimension. This approach is illustrated in the article for the simple object of the second order. Expressions, which show how the size of the dipole affects the eigenvalues errors of the closed loop state matrix due to the use of the reduced model, are given in the article. Assuming the value of the allowable displacement of the poles, it is possible to estimate the size of the dipole, which may be reduced in the process of reducing the model.

Ю.В. ДОРОНИНА, В.О. РЯБОВАЯ  
**МЕТОД МОДЕРНИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
ИХ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

---

*Дорогина Ю.В., Рябовая В.О. Метод модернизации информационных систем экологического мониторинга на основе анализа их функциональной нагрузки.*

**Аннотация.** В статье рассматривается метод модернизации информационных систем на основе анализа их функциональной нагрузки. Рассмотрены оценки структурно-функционального состава информационных систем экологического мониторинга для реализации и поиска оптимальных вариантов решения задач реструктуризации.

**Ключевые слова:** информационные системы, система мониторинга, реструктуризация, структурно-функциональный синтез, требование к системе, структура, избыточность.

*Doroina J.V., Ryabovaya V.O. Method for Modernizing Information Systems for Environmental Monitoring Based on Their Functionality.*

**Abstract.** The article aims to consider the modernization method of information systems based on the analysis of their functional capacity. Estimates of the structural and functional composition of environmental monitoring information systems for the realization and search of the optimal solutions to the problems of restructuring are considered.

**Keywords:** information systems; system of monitoring; restructuring; structurally functional synthesis; requirement to system; structure; redundancy.

---

**1. Введение.** Мониторинг и прогноз состояния экологической обстановки в Крымском регионе были и остаются важными научно-практическими задачами [1]. Существующие для их решения информационные системы экологического мониторинга (ИСЭМ), в том числе ориентированные на мониторинг водной среды, требуют постоянного совершенствования, что объясняется ухудшением качества среды обитания человека и необходимостью принятия срочных мер для анализа ситуации, с одной стороны, и новыми возможностями информационных систем и технологий — с другой.

Дадим определение некоторых терминов, используемых в дальнейшем. Под *реструктуризацией* информационной системы (ИС) понимается анализ и перестроение ИС с целью реализации ее в новом качестве [2]. В ИС выделяют три составляющие: функциональную (программное обеспечение), информационную (база данных) и подсистему управления функциональным и информационным блоками. *Модернизация* — улучшение ИС, исправление критичных ошибок при отсутствии кардинальных изменений в системе либо изменений, не связанных с изменением структуры. Основными причинами, требующими модернизации ИС, являются: ужесточение (повышение) требований к объему и

качеству информации, необходимой для принятия обоснованных решений соответствующими управленческими структурами; моральное и физическое устаревание ИС (информационных технологий, пользовательских и программных интерфейсов, износ аппаратных компонентов); причины организационного характера (связанные с окружением ИС, бизнес-процессами предприятия, пользователями системы, реализующими новые требования к ИС). Постоянного обновления (модернизации) требует и специализированный программный комплекс ИСЭМ (математические модели, используемые для анализа и прогноза).

Одной из основных проблем модернизации ИС является то, что она определена на концептуальном уровне и не зависит от какой-то одной программной технологии. Так, в [3] дается обзор методов модернизации ИС. К ним относятся: метод репликации баз данных, основанный на объектно-ориентированном подходе, методы оценки вариантов реинжиниринга ИС [4], методы извлечения знаний о существующей системе [5], методы трансформации (реконструкции) архитектуры ИС [6], методы автоматизации реинжиниринга программ [7, 8] и т.д. Область применения таких методов, характеризуется некоторым классом программных технологий. В наибольшей степени эта проблема исследуется в [2, 8, 9]. В тоже время, в [2] предлагается лишь «каркас», определяющий основной ход работ, в [9] даются рекомендации по выполнению основных видов деятельности по модернизации.

При возникновении новых требований (или их корректировки) к данным мониторинга (достоверность, своевременность и т.д.) и к работе самой системы (быстродействие, надежность, изменение частоты измерений, использование не всех элементов или введение новых) возможны проблемы структурного характера. Реализация некоторого требования, с ограничением по времени, может привести к преобразованию структуры системы (реструктуризации) и изменению функциональности исходной системы.

*Информационные системы экологического мониторинга с переменной структурой (ИСЭМ ПС)* — системы мониторинга, функционирующие «по требованию» (запросу) относительно измеряемых параметров с ограничением по времени проведения мониторинга, достоверности получаемой информации, надежности и габаритов системы (например, ИСЭМ разлива нефтепродуктов, ИСЭМ добычных и подготовительных забоев и т.д.). Структура ИСЭМ меняется в зависимости от требований к системе, но не автоматически (за неимением ко-

нечного множества структур), а с поэтапным уменьшением мощности множества допустимых вариантов решения и выбором единственного.

**2. Направление исследований.** В статье предлагается метод поэтапного структурного синтеза ИС, позволяющий реализовывать реструктуризацию (изменение состава структурных компонент ИС) в зависимости от текущего требования пользователя.

Для нахождения решения применяются два основных подхода [9]. Сущность первого подхода — исключить из анализа заведомо неприемлемые варианты решений (применение принципа Парето), тем самым сузив множество возможных альтернативных решений. Сущность второго подхода — использовать приемы и способы приведения многоцелевой задачи к типовой задаче с одним критерием. Под критериями эффективности ИСЭМ понимаются надежность системы, достоверность и своевременность информации. Представленные критерии характеризуются быстроедействием процесса мониторинга и точностью его результатов, своевременным информированием (получением, обработкой, выдачей информации), реализацией требований к ИСЭМ, снижением затрат на переоснащение системы.

Разработанный в работе метод (рисунок 1) применим для ИСЭМ общего назначения и основан на комплексе взаимосвязанных этапов: на первом этапе генерируются варианты, исходя из экспертных оценок и минимально-необходимых функций, реализующих  $i$ -ю задачу; на втором этапе производится уменьшение мощности множества на основе расчета оценок структурной значимости элементов ИСЭМ с учетом требований, возникающих в процессе функционирования (что позволяет определить степень влияния каждого из элементов системы на ее функциональность); на третьем этапе выбор единственного решения осуществляется путем определения оптимальных структур и параметров, обеспечивающих модификацию ИСЭМ с целью снижения структурной и функциональной избыточности. Для прореживания множества допустимых решений определяется эффективность полученных вариантов ИСЭМ на основе векторного подхода [10], при котором объект оценивается не в целом, а по результатам сравнения отдельных его свойств. Таким образом, появляется возможность формализации процесса принятия решений.



Рис. 1. Метод структурно-функционального синтеза (реструктуризации) ИСЭМ

Преимущество представленного метода, по сравнению с существующими [3-8], заключается в том, что он позволяет за счет более полного учета данных минимизировать функциональную избыточность элементов системы в составе одного решения по мере наращивания задач.

**3. Анализ работы ИСЭМ и критерии ее эффективности.** Загрязнение нефтью Черного моря, поверхностного слоя и донных отложений говорит о значительной устойчивой деградации экосистемы. Многие нефтедобывающие компании, в частности “Черноморнефтегаз”, заинтересованы в качественном экологическом мониторинге относительно своей деятельности. Для реорганизации ИСЭМ данного предприятия (рисунок 2), необходимо провести анализ данных, синтез, прогноз состояний, их оценку и т.п.

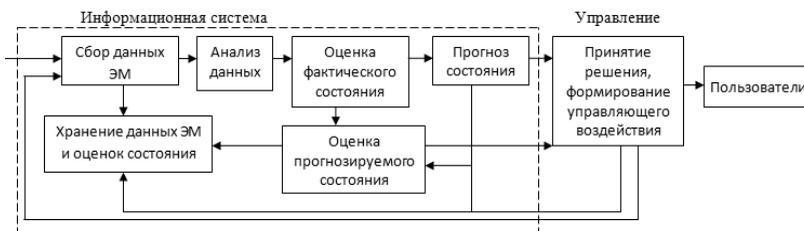


Рис. 2. Обобщенная структура информационной системы экологического мониторинга

На рисунке 2 показаны основные элементы ИСЭМ, соответствующие функциям своевременного обнаружения вредных компонентов и для сигнализации в том случае, если их концентрация превышает санитарные нормы, а также для контроля загрязнений.

Представленная ИСЭМ состоит из программных модулей и технических элементов, которые должны быть укомплектованы в корпус и перенесены на место разлива нефти. Превышение количества различных устройств (датчиков, обработчиков, радиотерминалов, преобразователей и т.д.) увеличивает время анализа данных (за счет программных модулей) и может не войти в корпус (за счет аппаратной части).

Данные о мониторинге состояния загрязнения Черного моря нефтяными углеводородами (среднегодовая и максимальная концентрация  $C^*$  (мг/л) и ПДК (предельно допустимая концентрация) загрязняющих веществ) в разных участках шельфа с 2012 г. по 2014 г. приведены в таблице 1. Данные получены в том числе на основании натуральных экспериментов, проведенных в Севастопольской гидрометеорологической обсерватории. Сбор и обработку представленных данных можно осуществить множеством способов, однако время модернизации ИСЭМ (в зависимости от поставленных целей) может быть различным.

Таблица 1. Данные о мониторинге состояния загрязнения Черного моря

Участки шельфа Черного моря	Измеряемые значения	2012		2013		2014	
		$C^*$ (мг/л)	ПДК	$C^*$ (мг/л)	ПДК	$C^*$ (мг/л)	ПДК
Юго-западный	Среднегод.	0,04	0,8	0,01	0,2	0,01	0,2
	Макс.	0,08	1,6	0,06	1,2	0,70	1,4
Юго-восточный	Среднегод.	0,17	3,4	0,26	5,2	0,24	5
	Макс.	0,78	15,6	0,86	17,2	0,66	13
Северо-западный	Среднегод.	0,14	2,8	0,17	3,4	0,23	5
	Макс.	1,1	22	0,78	15,6	0,88	18
Северо-восточный	Среднегод.	0,26	5,2	0,1	2	0,3	6
	Макс.	0,92	18,4	0,68	13,6	0,62	12
Прикерченский	Среднегод.	0,02	0,4	0,02	0,4	0,02	0,4
	Макс.	0,19	3,8	0,25	5	0,7	14

Добавление  $(n + 1)$ -го элемента может отрицательно сказаться на функциональности системы. Подобное возможно при реструктуризации ИСЭМ в реальном времени из-за существенного изменения исходных целей, например, срочной проверки концентрации нефти  $C^*(\text{мг/л})$  или превышении ПДК. В таком случае необходимо достичь не только максимального значения функции цели, но и минимального времени на реструктуризацию. При использовании предложенного в статье метода (рисунок 1) время этих мероприятий можно значительно сократить.

При анализе работы, ИСЭМ (с рисунка 2) рассматривается с точки зрения множеств элементов и их функций (рисунок 3).



Рис. 3. Обобщенная схема реструктуризации системы

Где  $G = \{g_1, \dots, g_m\}$  — исходное множество структурных компонент системы;  $F = \{f_1, \dots, f_n\}$  — исходное множество функций системы.  $G' = \{g'_1, \dots, g'_k\}$  — измененное множество структурных компонент системы (не обязательно непересекающееся с  $G$ ),  $F' = \{f'_1, \dots, f'_j\}$  — измененное множество функций системы (не обязательно непересекающееся с  $F$ );  $G' \in D$ , где  $D$  — множество допустимых вариантов ИСЭМ. Система мониторинга рассматривается в виде исходного множества

$$S = \langle F, G, R, \Theta, T \rangle, \quad (1)$$

где  $R$  — множество ресурсов (программных, аппаратных);  $\Theta$  — множество задач, решаемых системой;  $T$  — кортеж требований к системе.

Для описания функционирования системы с требованиями вводятся ряд параметрических ограничений на качество (достоверность, точность и т.п.) информации:  $\xi_{\tau_i}^X \geq \xi^X$ ,  $\xi_{\tau_i}^Y \geq \xi^Y$ , где  $X$  и  $Y$  — исходная и обработанная информация соответственно,  $\xi^X$  и  $\xi^Y$  — начальные показатели качества входных и выходных данных,  $\xi_{\tau_i}^X$  и  $\xi_{\tau_i}^Y$  — требуемые показатели качества входных и выходных данных мониторинга.

Требования к системе и уровень их важности могут быть представлены совокупностью:

$$T = \langle f_1, \dots, f_l; \xi_{\tau_i}^X, \xi_{\tau_i}^Y, t_i; g_1, \dots, g_k; R \rangle, \quad (2)$$

$$\tau_i = k^f \sum_1^n f_i + k^{\xi^X} (\max \xi^X) + k^{\xi^Y} (\max \xi^Y) + k^t (\min t_i) + k^g (\min g_k) + k^R (\min R_m)$$

где  $f_1, f_i$  — требуемые функции системы мониторинга;  $t_i$  — время реализации  $i$ -задачи мониторинга;  $g_1, \dots, g_k$  — запланированное множество структурных элементов системы (при необходимости);  $R$  — множество ресурсов ИСЭМ;  $k$  — показатель уровня важности требований (0 или 1).

При реализации реакции на требование система должна обеспечивать решение задач из множества допустимых  $F \subseteq \Theta$ , то есть ИСЭМ должна удовлетворять условию:

$$\Theta = \bigcup_{\forall k} \Theta_k(v_k) \mid \tau_i \rightarrow \left\{ F_{v_k}^{\tau_i} \right\}, \quad (3)$$

где  $v_k$  — некоторый вариант системы;  $\Theta_k(v_k)$  — множество задач для  $k$ -го варианта системы,  $k = \overline{1, K}$ ,  $K \in N$ ,  $\tau$  — совокупность требований, которые могут быть обслужены  $k$ -м вариантом системы;  $\tau_i$  — текущее требование к системе мониторинга;  $i = \overline{1, I}$ ,  $I \in N$  ( $K, N$  — множество натуральных чисел);  $\left\{ F_{v_k}^{\tau_i} \right\}$  — функциональность системы (множество функций, реализуемых  $k$ -м вариантом, исходя из требований  $\tau_i$ ,  $F_{v_k}^{\tau_i} = \{F_{\min}, F_1 \dots F_n\}$ ).

Для оценки и отбора вариантов ИСЭМ после реструктуризации применяется критериальный подход. Под *критериями эффективности* понимаются количественные показатели свойств объекта, числовые значения которых являются мерой качества оценки объекта по отношению к данному свойству. Для современных ИСЭМ одной из основных особенностей является то, что их параметры и структуры на различных этапах жизненного цикла изменяются под действием объективных и субъективных причин. Другими словами, происходит постоянная структурная динамика ИСЭМ [11]. В этих условиях для повышения (сохранения) уровня работоспособности и возможностей ИСЭМ необходимо осуществлять контроль за следующими критериями:

– *достоверность информации*

$$PD(t_i) = 1 - P_{i\_ош}(t_i), \quad (4)$$

где  $P_{i\_ош}(t_i)$  — вероятность ошибочной информации за время выполнения  $i$ -го требования  $t_i$ ;

– своевременность реализации  $i$ -го требования

$$P_T(t_i) = 1 - \frac{T_{fk}(t_i) + T_{rk}(t_i)}{2}, \quad (5)$$

где  $T_{fk}(t_i)$  — временной ресурс формирования решения,  $T_{rk}(t_i)$  — временной ресурс реализации решения,  $t_i$  — время выполнения  $i$ -го требования, при

$$T_{fk}(t_i) = \frac{t_{fk} - t_0}{T_M - T_m}, \quad T_{rk}(t_i) = \frac{t_{rk} - t_0}{T_M - T_m}, \quad (6)$$

где  $t_0$  — время получения информации,  $t_{fk}$  — время окончания формирования решений для  $k$ -й ситуации,  $t_{rk}$  — время реализации решения,  $T_M$  и  $T_m$  — максимальная и минимальная длительности периода времени от момента начала формирования решения до момента его реализации;

– надежность ИСЭМ

$$P_N(t_i) = \Pr\{t_i \leq t_s, \phi(x) = 1\}, \quad (7)$$

где  $t_s$  — общее время работы ИСЭМ или ее варианта,  $\phi(x) = 1$  — значение структурной функции системы в момент реализации требования.

Вычисление критериев осуществляется при ограничениях  $t_i \leq t_{cp}$ , где  $t_{cp}$  — среднее время выполнения  $i$ -го требования,  $T_{cj}$  — время цикла ИСЭМ ПС:

$$t_{cp} = \frac{t_s}{\sum_{i=1}^n \tau_i} = \frac{\sum_{j=1}^k T_{c_j}}{\sum_{i=1}^n \tau_i}. \quad (8)$$

Требуется построить такое множество вариантов ИСЭМ и выбрать единственное решение (по заданным требованиям  $\tau_i$ ), характеризуемых множествами  $F_{v_k}^{\tau_i}$  и  $\Theta_k(v_k)$ ,  $k \in \{1, \dots, K\}$ , при котором эффективность реструктурированной системы максимальна:

$$Es(\tau_i) = \varphi(G'(\tau_i), F'(\tau_i)) \rightarrow \max. \quad (9)$$

В представленной многокритериальной задаче, для аналитической оценки эффективности иерархических структур, предлагается применить метод вложенных скалярных свертков [10].

Коэффициенты приоритета определялись по формуле:

$$P_{ik}^{(j-1)} = c_{ik} / \sum_{i=1}^{n_k^{(j-1)}} c_{ik}, \quad k \in [1, n^{(j)}], j \in [2, m], \quad (10)$$

где  $P_{ik}^{(j-1)}$  —  $i$ -я компонента вектора приоритета критерия на  $(j-1)$ -м уровне иерархии при расчете оценки эффективности  $k$ -го свойства  $j$ -го уровня;  $c_{ik}$  — оценка значимости  $i$ -го элемента  $(j-1)$ -го уровня для  $k$ -го свойства  $j$ -го уровня (определяется экспертами или лицом, принимающим решения (ЛПР), по шкале баллов).

Качественная (лингвистическая) оценка варианта получается сопоставлением оценки из рекуррентной формулы (10) с обращенной нормированной фундаментальной шкалой [12].

**4. Метод решения задачи.** Пусть  $G'_{\min}$  — базовая структура ИСЭМ (рисунок 4) с минимально-необходимым множеством функций  $F_{\min} = \{f_{E\_ДАТ}, f_{E\_ПСД}, f_{E\_ОД}, f_{E\_ФП}, f_{E\_СД}, f_{E\_СК}, f_{E\_ОП}\}$ , необходимая для решения минимального множества задач  $\Theta^*_{\min}$ .

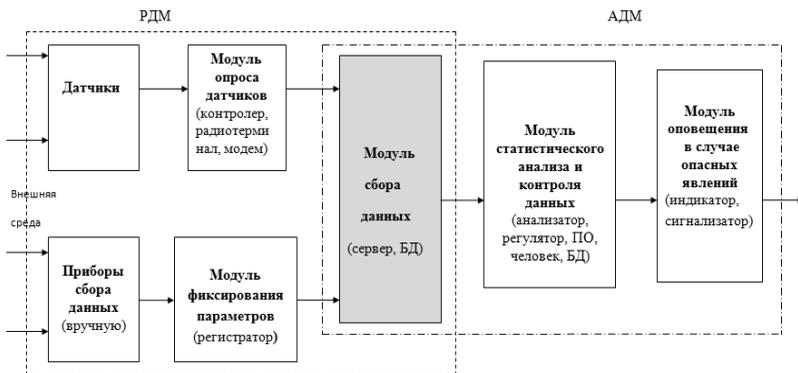


Рис. 4. Обобщенная структура ИСЭМ с минимально-необходимым множеством функций

При реализации  $(i+1)$ -задачи для ИСЭМ (рисунок 1), возможны:  $\Theta_{i+1} \rightarrow G_i \times G_{i+1}$  — структурная избыточность,  $\Theta_{i+1} \rightarrow F_i \times F_{i+1}$  — функциональная избыточность. В случае  $(i+1)$ -задачи рассматривается ИСЭМ с максимальной функциональностью  $F_{\max} = \{f_{E\_ДТ}, f_{E\_ПД}, f_{E\_КПД}, f_{E\_ФП}, f_{E\_ОД}, f_{E\_СД}, f_{E\_АП}, f_{E\_УП}, f_{E\_КК}, f_{E\_ОП}, f_{E\_ХП}, f_{E\_ПП}\}$  (рисунок 5), где  $E$  — взаимосвязанные между собой элементы системы, представленные программными модулями с определенным набором функций.

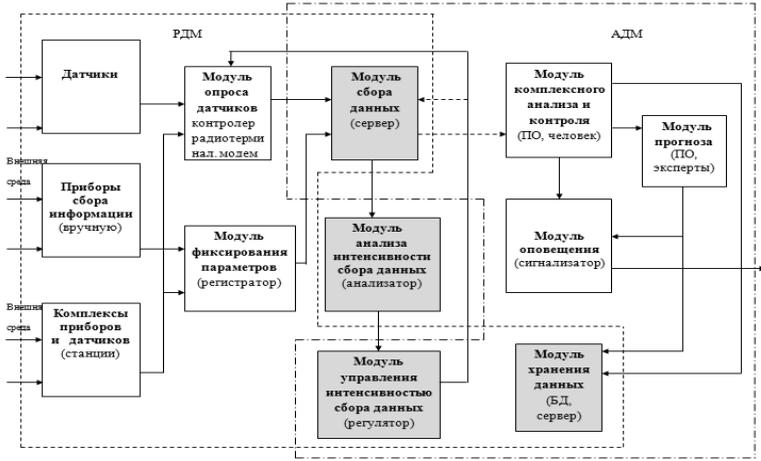


Рис. 5. ИСЭМ с максимальной функциональностью

Для формирования вариантов системы с различной функциональной нагрузкой применяется метод ранжировки экспертных оценок по отношению к каждому элементу. Ставится соответствие  $F_i$  и  $b_{ij}$ , где  $b_{ij}$  — весовые коэффициенты элементов системы:

$$b_{ij} = \frac{w_{ij}}{\sum_{i=1}^n w_{ij}}, \text{ при } w_{ij} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^l w_j, \quad (11)$$

где  $w_{ij}$  — вес элемента в системе,  $m$  — минимально-допустимое количество экспертов.

На основе этих соответствий строится аддитивный критерий:

$$E^F = \sum_{i=1}^n b_{ij} g_i.$$

Генерируется множество вариантов ИСЭМ с функциональностью  $F = \{F_{\min}, F_{g1} \dots F_{gn}\}$  где  $F_{\min}$  — минимально-необходимое множество функций в вариантах ИСЭМ.

Для нахождения единственного варианта решения, при увеличении числа элементов ИСЭМ и количества генерируемых вариантов, предложено использовать индексные (структурные) матрицы мер сходства и включения вариантов, с учетом установленного ЛПР функционального ограничения  $\Delta$  [9]. Под мерой понимается приращение числа элементов к числу структур ИСЭМ. Общий вид структурной матрицы для пары описаний  $S_i$  и  $S_j$ :

$$B = \left\| x_{ij} \right\|_{i=1, p}^{j=1, 2}. \quad (12)$$

На основе (12) рассчитываются матрицы мер сходства  $C(S_i, S_j)$  и включения  $W(S_i, S_j)$  (13,14):

$$C(S_1, S_2) = \frac{2 \sum_{i=1}^p x_{i1} x_{i2}}{\sum_{i=1}^p x_{i1} + \sum_{i=1}^p x_{i2}}, \quad (13)$$

где  $x_{i1}x_{i2}$  — одно из двух значений рассматриваемых вариантов структурной матрицы ИСЭМ 0 или 1;

$$W(S_2; S_1) = \frac{m(S_1 \cap S_2)}{m(S_1)}, \quad W(S_1; S_2) = \frac{m(S_1 \cap S_2)}{m(S_2)}, \quad (14)$$

где  $m(S) = \sum_{i=1}^p x_i$  — обозначение числа элементов множества,

$m(S_1 \cap S_2) = \sum_{i=1}^p x_{i1}x_{i2}$  — количество элементов пересечения двух множеств  $S_1$  и  $S_2$ .

Отношение сходства или включения задается в следующем виде:

$$\begin{aligned} < C_{\Delta}, J >= \{ S_i, S_j \in J \mid C(S_i, S_j) \geq \Delta \}, \\ < W_{\Delta}, J >= \{ S_i, S_j \in J \mid W(S_i, S_j) \geq \Delta \}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $\Delta$  — соответствующее, заданное ЛПР, значение меры включения  $W_{\min}$  или  $W_{\max}$ , или базовой меры включения  $W_{const}$ , при  $W_{\min} \neq 0$

$0 < W_{const} \leq 1$  или  $W_{min} < W_{const} \leq W_{max}$ . Значение  $W_{const}$ ,  $W_{min}$  и  $W_{max}$  определяются ЛПР, исходя из условий ( $v_k$  — наилучший (оптимальный) вариант решения для  $i$ -го требования):

$$\begin{aligned} G'(v_k) &\rightarrow \max_{v_k \in D'}, F'(v_k) \rightarrow \max_{v_k \in D}, \\ G'(v_k) &\rightarrow \min_{v_k \in D'}, F'(v_k) \rightarrow \max_{v_k \in D'}, \\ G'(v_k) &\rightarrow \min_{v_k \in D'}, F'(v_k) \rightarrow \min_{v_k \in D'}, \\ G'(v_k) &\rightarrow \max_{v_k \in D'}, F'(v_k) \rightarrow \min_{v_k \in D'}. \end{aligned}$$

При этом  $F^{RDM}$  — множество функций, необходимых для реализации заданного условия работы подсистемы регистрации данных (РДМ) в ИСЭМ,  $F^{RDM} \in F$ , а  $F^{ADM}$  — множество функций, необходимых для реализации заданного условия работы подсистемы анализа данных (АДМ) ИСЭМ, причем  $F^{ADM} \in F$  и  $F^{RDM} \cup F^{ADM} = F$ .  $f_i^{RDM}$  — множество функций, соответствующих  $ER_i$ . Аналогично,  $f_i^{ADM}$  — множество функций, соответствующих  $EA_j$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $j = \overline{1, m}$ .  $F^{RDM}$  и  $F^{ADM}$  определяются формулами:

$$F^{RDM} = \bigcup_{i=1}^n f_i^{RDM}, \quad F^{ADM} = \bigcup_{i=1}^n f_i^{ADM},$$

где  $ER_i$ ,  $EA_j$  — элементы (программные модули) в подсистемах регистрации и анализа данных соответственно. Возможна ситуация, когда при добавлении  $(n+1)$ -го элемента он привнесет новые функции  $f$ , тогда  $f_{n+1}^{RDM} - f_i^{RDM} = \{f \mid f \in f_{n+1}^{RDM}, f \notin f_i^{RDM}\}$ .

Соответственно,  $F^{(RDM)^*} - F_i^{RDM} = \{f \mid f \in F^{(RDM)^*}, f \notin F^{RDM}\}$ , где

$F^{(RDM)^*}$  — множество функций, необходимых для реализации заданного условия работы подсистемы регистрации данных мониторинга с добавлением  $(n+1)$ -го элемента. Если количество функций с привнесенным элементом больше исходного количества функций  $\left| f_{n+1}^{RDM} \right| \geq \left| f_i^{RDM} \right|$  и они переходят в область подсистемы анализа данных мониторинга (рисунок б), необходима реструктуризация ИСЭМ.



Рис. 6. Переход функций из подсистемы регистрации данных мониторинга в подсистему анализа данных мониторинга

В таком случае, рассматривается ИСЭМ с максимальной функциональностью (рисунок 6).

Исходя из средней оценки (степени) значимости функций элементов ИСЭМ с максимальной функциональностью (рисунок 6), в таблице 2 приведены весовые коэффициенты  $b_{ij}$  элементов (11), определяющие их важность в формировании требуемого варианта ИСЭМ.

Таблица 2. Экспертные оценки и весовые коэффициенты элементов ИСЭМ с максимальной функциональностью

Е Оценка	Е <sub>дат</sub> $g^1$	Е <sub>псд</sub> $g^2$	Е <sub>пси</sub> $g^3$	Е <sub>од</sub> $g^4$	Е <sub>кпд</sub> $g^5$	Е <sub>фп</sub> $g^6$	Е <sub>сд</sub> $g^7$	Е <sub>ск</sub> $g^8$	Е <sub>ли</sub> $g^9$	Е <sub>уи</sub> $g^{10}$	Е <sub>кк</sub> $g^{11}$	Е <sub>оп</sub> $g^{12}$	Е <sub>хр</sub> $g^{13}$	Е <sub>пр</sub> $g^{14}$
I эксперт	0,88	0,13	0,75	0,74	0,50	0,66	0,65	0,38	0,58	0,56	0,83	0,74	0,91	0,41
II эксперт	0,83	0,21	0,81	0,79	0,49	0,67	0,64	0,36	0,56	0,54	0,79	0,74	0,89	0,44
III эксперт	0,82	0,17	0,82	0,73	0,42	0,65	0,69	0,40	0,54	0,58	0,85	0,68	0,90	0,46
Вес элемента в система $w_{ij}$	0,84	0,17	0,79	0,75	0,47	0,66	0,66	0,38	0,56	0,56	0,82	0,72	0,90	0,44
Весовой коэфф. $b_{ij}$	0,10	0,02	0,09	0,09	0,05	0,08	0,08	0,04	0,06	0,06	0,09	0,08	0,10	0,05

На основе аддитивного критерия определяется ИСЭМ с искомой функциональностью:

$$E^F = 0,1(g_1 + g_{13}) + 0,09(g_3 + g_4 + g_{11}) + 0,08(g_6 + g_8 + g_{12}) + 0,06(g_9 + g_{10}) + 0,05(g_5 + g_{14}) + 0,04g_7 + 0,02g_{12}.$$

С помощью приведенного критерия и  $F_{\min}$  (рисунок 5), получено множество допустимых вариантов системы с различной функциональной нагрузкой (рисунок 7).

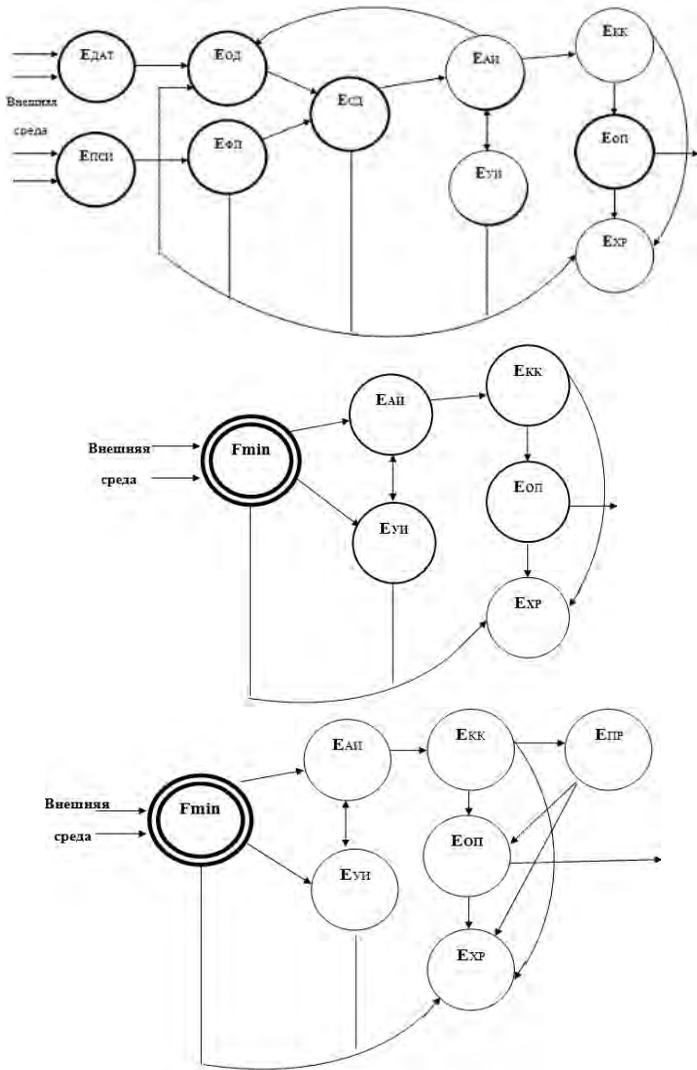


Рис. 7. Множество допустимых вариантов системы с учетом минимально необходимого множества функций

Коэффициент пересечения подмножеств функций в подсистемах регистрации и анализа данных мониторинга в области допустимых решений:

$$f_{n+1} \cap f_i = \{z \mid z \in f_{n+1}, z \in f_i\}, \quad \Pi_p = \frac{zV_p}{\sum_{i=1}^z V_i}, \quad (16)$$

$$F_{\min} = \min(\{f_1^{RDM}, f_2^{RDM} \dots f_n^{RDM}\} \cap \{f_1^{ADM}, f_2^{ADM} \dots f_m^{ADM}\}),$$

где  $\Pi_p$  — совокупный коэффициент пересечения,  $V_p$  — множество совокупных областей пересекающихся признаков подсистем,  $z$  — число пересекающихся информационных признаков (функций элементов подсистем варианта ИСЭМ),  $V_i$  — множество совокупных областей пересекающихся признаков в вариантах ИСЭМ при

$$F^{RDM} \cap F^{ADM} = F_{\min}, \quad (17)$$

где  $F_{\min}$  — конечное множество, имеющее систему подмножеств  $F_j \subset F_{\min}$ , причем такую, что  $\bigcup_{j=1}^k F_j = F_{\min}$  и  $f_k \in F_j$  ( $f_k$  — совокупный набор функций  $f_i^{RDM}$  и  $f_j^{ADM}$  в подмножестве  $F_j$ ). Каждому из подмножеств  $F_j$  поставлен в соответствие коэффициент  $\Pi_p$  и число пересекающихся информационных признаков —  $z$  (данные параметры определяются экспертами и проверяются на тестовых наборах).

По данным значениям получены варианты пересечения функциональных признаков в подсистемах регистрации и анализа данных мониторинга в виде графиков функций  $F^{RDM}$  и  $F^{ADM}$  (рисунок 8), некоторые из которых имеют области Парето-оптимальных решений, значит, условие (17) выполняется.

Для нахождения единственного варианта решения в области  $D'$  строятся структурные матрицы мер сходства и включения вариантов ИСЭМ (13,14), с учетом установленного ЛПР функционального ограничения  $\Delta = W_{\max} = 0.91$ .

Рассчитанные для пары вариантов S1 и S2 меры включения имеют следующие значения:  $W(S1; S2) = 1$ ,  $W(S2; S1) = 0,64$ . Мера включения первого описания во второе (0,64) показывает, что первый объект "оригинальнее" второго, т.е. описание первого варианта содержит больше специфических признаков, чем описание второго. С помощью (4,5,7) выбран и построен единственный вариант ИСЭМ с учетом  $F_{\min}$  (рисунок 9).

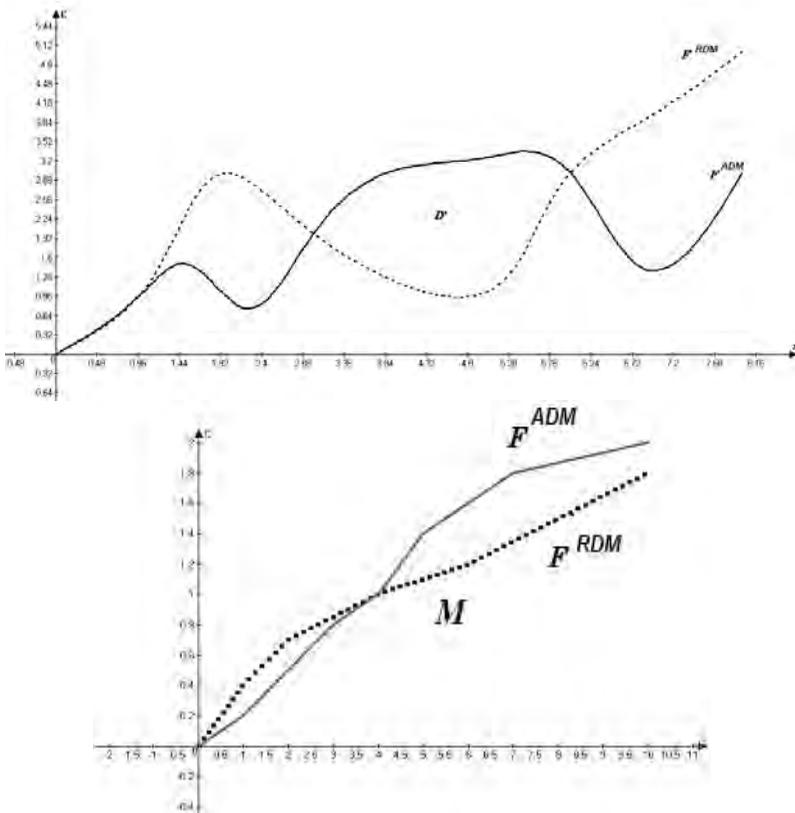


Рис. 8. Варианты пересечения функциональных признаков в подсистемах регистрации и анализа данных мониторинга

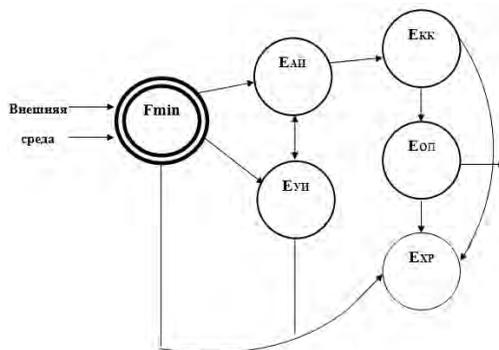


Рис. 9. Вариант ИСЭМ с учетом минимально-необходимого множества функций

Значения критериев эффективности и комплексные (аналитическая и качественная) оценки системы (10) приведены в таблице 3. ИСЭМ работает в режиме реального времени, что обеспечивает высокую степень ее оперативности. Данные мониторинга выдаются в минимальных временных интервалах (1-3 с.) и удобных для пользователя форматах. Полученные значения подтверждают результативность используемого метода, поскольку значительно сокращают сроки внедрения и адаптации системы, а также время выполнения задач в условиях своевременной реализации требований к ИСЭМ. При этом используются не все возможности ИС, что позволяет избежать избыточности данных при их обработке и повысить качество информации для оперативного принятия решений.

Таблица 3. Комплексные оценки значимости системы

Критерии эффективности ИСЭМ	Значения критериев эффективности ИСЭМ	Значения критериев эффективности варианта ИСЭМ
Достоверность информации	0,5	0,8
Своевременность	0,45	0,95
Надежность	0,625	0,8
Окупаемость	0,7	0,98
<i>Аналитическая оценка</i>	0,485	0,36
<i>Качественная оценка</i>	удовлетворительно	хорошо
<i>Временные интервалы и форматы выдачи данных ИС</i>		
<i>Исходная ИСЭМ</i>	15-30 мин.	.txt, .doc, .docx, .docm
<i>Вариант ИСЭМ</i>	1-3 с.	.txt, .doc, .docx, .docm, .pdf; .jpeg, .bmp; .mp3, .gif; .mp4, QuickTime (.mov, .qt)

**5. Заключение.** В процессе реализации предложенного метода построена система поддержки принятия решений для случаев оперативной реструктуризации систем экологического мониторинга общего назначения, что позволило решать задачи снижения мощности множества, гибко реагируя на требования данного типа. Благодаря матрицам сходства и включения определяется наиболее подходящий для решения задачи реструктуризации вариант системы с учетом условий относительно требуемых структуры и функциональности. После решения основной задачи определения состава и функций элементов в системе, получено множество решений, которое затем прореживается на основе вновь введенных требований к структуре  $G$  системы  $S$ , в том числе и по снижению функциональной избыточности. Дальнейшее направление исследований связано с построением оценок эффективности системы при условиях переменной цикличности требований, что характерно для задач оперативного анализа ситуационных процессов.

## Литература

1. *Рябовая В.О., Доронина Ю.В.* Повышение эффективности систем экологического мониторинга // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Вып. 4. № 6 (58). С. 41–44. Авторы 2012.
2. *Imboden D., Pfenninger S.* Introduction to Systems Analysis: Mathematically Modeling Natural Systems // Berlin, New York, Springer. 2013. vol. 8. pp. 235–252.
3. *Comella-Dorda S., Wallnau K., Seacord R.C., Robert J.* A Survey of Legacy System Modernization Approaches // Carnegie Mellon University. Tech. Note CMU/SEI-2000-TN-003. 2000. URL:<http://www.sei.cmu.edu/publications/documents/00.report/s/00tn003.html> (дата обращения: 16.01.2014).
4. *Доронина Ю.В.* Реинжиниринг мониторинговых информационных систем циклического типа // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Вып. 1. № 62 (55). С. 12–14.
5. *Kazman Rick, Carriere Jeromy S.* View Extraction and View Fusion in Architectural Understanding // Proceedings of the Fifth International Conference on Software Reuse (ICSR). 1998. pp. 7–13.
6. *Kazman R., O'Brein L., Verhoef Ch.* Architecture Reconstruction Guidelines (SEI CMU) // CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA SOFTWARE ENGINEERING INST. 2001. pp. 25–38.
7. *Терехов А.Н., Терехова А.А.* Автоматизированный реинжиниринг программ // Изд-во СПбГУ, 2000. 345 с.
8. Официальный сайт Института космических исследований РАН. URL: [www.d902.iki.rssi.ru/students/alekro/Dissertation/Papers/Reengineering/my\\_review.html](http://www.d902.iki.rssi.ru/students/alekro/Dissertation/Papers/Reengineering/my_review.html). (дата обращения: 16.01.2014).
9. *Доронина Ю.В., Рябовая В.О.* Метод структурно-функционального синтеза в задачах реструктуризации систем экологического мониторинга // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». 2013. №6. С. 79–89.
10. *Воронин А.Н.* Вложенные скалярные свертки векторного критерия // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». 2003. № 5. С. 10–21.
11. *Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.* Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов // М.: 2005. 291 с.
12. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений // М.: Мир. 1976. 165 с.

## References

1. *Ryabovaya V.O., Doronina J.V.* [Improving the efficiency of environmental monitoring systems]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovih tehnologij – East European Journal of advanced technologies*. 2012. vol. 4. no. 6(58). pp. 41–44. (In Russ.).
2. *Imboden D., Pfenninger S.* Introduction to Systems Analysis: Mathematically Modeling Natural Systems. *Springer Science & Business Media*. 2013. no. 8. pp. 235–252.
3. *Santiago C.-D., Wallnau K., Seacord R.C., Robert J.* A Survey of Legacy System Modernization Approaches. Carnegie Mellon University. Tech. Note CMU. SEI-2000-TN-003. 2000.
4. *Doronina J.V.* [Reengineering of information systems monitoring the cyclic type]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovih tehnologij. – East European Journal of advanced technologies*. 2012. vol. 1. no. 62 (55). pp. 12–14. (In Russ.).
5. *Kazman R., Carriere J.S.* View Extraction and View Fusion in Architectural Understanding. Proceedings of the Fifth International Conference on Software Reuse (ICSR). 1998. pp. 7–13.
6. *Kazman R., O'Brein L., Verhoef Ch.* Architecture Reconstruction Guidelines (SEI CMU). 2001. pp. 25–38.

7. Terehov A.N., Terehova A.A. *Avtomatizirovannyj reinzhiniring programm* [Automated re-engineering of program]. S.-Peterburg. 2000. 345 p. (In Russ.).
8. Oficial'nyj sajt Instituta kosmicheskikh issledovanij RAN. [Official web site of The Institute of Space Research]. Available at: [www.d902.iki.rssi.ru/students/alekro/Dissertation/Papers/Reengineering/my\\_review.html](http://www.d902.iki.rssi.ru/students/alekro/Dissertation/Papers/Reengineering/my_review.html). (accessed 16.01.2014). (In Russ.).
9. Doronina J.V., Rjabovaja V.O. [The method of structural and functional problems in the restructuring of environmental monitoring systems]. *Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal «Problemy upravlenija i informatiki» – International Scientific and Technical Journal "Problems of control and informatics"*. 2013. no 6. pp. 79–89. (In Russ.).
10. Voronin A.N. [Nesting scalar convolution of the vector criterion]. *Mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij zhurnal «Problemy upravlenija i informatiki» – International Scientific and Technical Journal "Problems of control and informatics"*. 2003. No 5. pp. 10–21. (In Russ.).
11. Ohtilev M.Ju., Sokolov B.V., Yusupov R.M. *Intellektual'nye tehnologii monitoringa sostojanija i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tehnicheskikh objektov* [Intelligent technology for monitoring the status and management of the structural dynamics of complex technical objects]. Moscow, 2005. 291 p. (In Russ.).
12. Zade L. *Ponjatie lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinjatiju priblizennyh reshenij* [The concept of linguistic variable and its application to decision-making close]. Moscow: Mir, 1976. 165 p. (In Russ.).

**Доронина Юлия Валентиновна** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных систем института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: совершенствование и реинжиниринг информационных систем, системная инженерия, технология СУБД, системы поддержки принятия решений. Число научных публикаций — 100. [juvado@yandex.ru](mailto:juvado@yandex.ru); ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053; п.т.: +7(8692)435-038.

**Doronina Julia Valentinovna** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of the information systems department of institute of information technologies and management in the technical systems, Sevastopol State University (SEVGU). Research interests: perfection and reengineering of the informations systems, systems engineering, technologies of databases, systems of support of making a decision. The number of publications — 100. [juvado@yandex.ru](mailto:juvado@yandex.ru); 33, Str. University, Sevastopol, 299053; office phone: +7(8692)435-038.

**Рябовая Валентина Олеговна** — старший преподаватель кафедры информационных систем института информационных технологий и управления в технических системах, Севастопольский государственный университет (СевГУ). Область научных интересов: системный анализ, теория вероятности и экспертных оценок, системы поддержки принятия решений, применение методов структурной оптимизации в системах мониторинга. Число научных публикаций — 35. [valentina\\_rb@mail.ru](mailto:valentina_rb@mail.ru); ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053; п.т.: +7(8692)435-038.

**Ryabovaya Valentina Olegovna** — senior lecturer of the information systems department of institute of information technologies and management in the technical systems, Sevastopol State University (SEVGU). Research interests: system analysis, probability theory and expertise, decision support systems, application of structural optimization in monitoring systems. The number of publications — 35. [valentina\\_rb@mail.ru](mailto:valentina_rb@mail.ru); 33, Str. University, Sevastopol, 299053; office phone: +7(8692)435-038.

## РЕФЕРАТ

### *Доронина Ю.В., Рябовая В.О.* **Метод модернизации информационных систем экологического мониторинга на основе анализа их функциональной нагрузки.**

Разработка и развитие методов поддержки принятия решений в системах экологического мониторинга осуществляется с целью повышения эффективности их функционирования. На основе информационной модели системы мониторинга с переменной структурой (СМ ПС) решены основные задачи поддержки принятия решений и разработан метод, повышающий эффективность ее функционирования. Представленный метод модернизации СМ основан на: генерации вариантов СМ ПС, позволяющей определить связанные между собой элементы, относящиеся к разным подсистемам; оценке структурной значимости элементов СМ ПС с учетом требований, возникших в процессе функционирования системы; выборе оптимальных структур и параметров СМ ПС в соответствии с множеством их функций. На примере подсистем регистрации и анализа данных создана информационная технология поддержки принятия решений в системах мониторинга, требующая минимальных затрат и улучшающая такие критерии эффективности как надежность системы, достоверность и своевременность информации. Разработанный метод сокращает время выполнения поставленных задач вдвое и обеспечивает своевременное информирование о параметрах СМ, изменивших свои значения.

## SUMMARY

### *Doronina J.V., Ryabovaya V.O.* **Method for Modernizing Information Systems for Environmental Monitoring Based on Their Functionality.**

Design and development of decision support methods for environmental monitoring systems is carried out to improve the efficiency of their operation. Based on the information model of a monitoring system with variable structure (MS VS), the main tasks of supporting decision-making are solved, and a method increasing the efficiency of system's functioning is developed. The presented method for modernization of a monitoring system is based on: MS VS options generation, allowing one to identify the interconnected elements belonging to different sub-systems; assessment of the significance of the structural elements of the MS VS to meet the requirements encountered in the functioning of the system; selection of the optimal structures and parameters of MS VS in accordance with a variety of functions. Using the example of data recording and analysis sub-systems, information technology is created to support decision-making processes in systems for monitoring, which requires minimal cost and improve the effectiveness of such criteria as the reliability of the system, the accuracy and timeliness of information. The developed method reduces tasks performance time in half and provides timely information on the MS settings, which have changed their values.

С.А. СОЛДАТЕНКО, Р.М. ЮСУПОВ  
**О ВЫБОРЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ  
МОДЕЛИРОВАНИИ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННОЙ  
МОДИФИКАЦИИ ПОГОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ**

---

*Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. О выборе управляющих параметров при моделировании целенаправленной модификации погодно-климатических процессов.*

**Аннотация.** Единая методология планирования и реализации проектов по модификации погоды и климата (геоинженерных проектов) может быть построена, по-видимому, только на основе идей и методов геофизической кибернетики, в которой климатическая система и протекающие в ней процессы являются объектами управления, а роль управляющей подсистемы отводится соответствующим общественным структурам и, в частности, операторам, в распоряжении которых находятся все необходимые силы и средства. В данной работе на примере моделей бароклинической неустойчивости исследуется влияние основных параметров, управляющих развитием бароклинической неустойчивости в атмосфере, на скорости роста амплитуд неустойчивых волн. Полученные аналитические выражения для абсолютных и относительных коэффициентов чувствительности позволяют оценить отклик модели на вариации управляющих параметров и на этой основе сделать выводы о гипотетической возможности управления крупномасштабной волновой динамикой атмосферы и океана. Выбор бароклинической неустойчивости в качестве предмета исследования обусловлен существенной ролью данного физического механизма в формировании общей циркуляции атмосферы и океана, а значит, и климата Земли.

**Ключевые слова:** геофизическая кибернетика, геоинженерия, глобальное потепление, оптимальное управление, теория чувствительности, бароклиническая неустойчивость.

*Soldatenko S.A., Yusupov R.M. Toward the Selection of Control Parameters in Models of the Purposeful Weather and Climate Modification.*

**Abstract.** A unified methodology for planning and implementation of weather and climate modification (geoengineering) can be apparently developed based on the ideas and methods of geophysical cybernetics in which the climate system and its processes represent a control object and the role of the controlling subsystem is given to the appropriate social structures and, in particular, to operators having the necessary resources. This problem can be solved based on the sensitivity theory of dynamical systems. In this paper, as an example, we study the impact of the main parameters that control the development of baroclinic instability in the atmosphere on the growth rate of unstable waves. Analytical expressions for the absolute and relative sensitivity coefficients are obtained, which allows estimating the model response to the control parameters and, therefore, drawing a conclusion about the hypothetical ability to control the large-scale wave dynamics in the atmosphere and ocean. Selecting the baroclinic instability as a subject of this study is due to the significant role of this physical mechanism in the formation of the general circulation of the atmosphere and ocean, and, consequently, the Earth's climate.

**Keywords:** geophysical cybernetics; geoengineering; global warming; optimal control; sensitivity theory; baroclinic instability.

---

**1. Введение.** Глобальные климатические изменения, происходящие с беспрецедентным ускорением на нашей планете в последние

несколько десятилетий, превратились в один из самых серьезных социальных, экологических и экономических вызовов XXI века. Сегодня скорость глобального потепления составляет около  $0,2^{\circ}\text{C}$  за декаду или  $2^{\circ}\text{C}$  в пересчете на сто лет, хотя еще полвека назад эта величина была меньше в три раза [1]. Изменения глобального климата сопровождаются многочисленными эффектами, последствия которых сегодня невозможно предугадать. Глобальное потепление послужило стимулом для многочисленных исследований, связанных с разработкой методов «сдерживания» климатических изменений. В рамках данного научно-технического направления, известного как геоинженерия, разработано достаточно большое число методов, позволяющих если не совсем устранить риск глобального потепления, то по крайней мере значительно его снизить [2-6]. Заметим, что примерно с середины прошлого столетия в различных странах реализуются проекты в области модификации атмосферных процессов и погодных условий [7], однако исследования в рамках геоинженерии до сих пор носят теоретический характер. Это связано с тем, что искусственные манипуляции с таким сложным и глобальным объектом, как земная климатическая система (ЗКС), требуют принятия политических решений самого высокого уровня.

Применимость различных методов и технических средств для нивелирования последствий глобальных климатических изменений теоретически изучается и оценивается на основе математического моделирования [4]. С этой целью разрабатываются различные более-менее реалистичные сценарии антропогенного воздействия на ЗКС, и задача оценки последствий и выбора наиболее приемлемой стратегии манипулирования климатической системой решается путем сравнения результатов моделирования, полученных с использованием этих сценариев. Данный подход, известный как метод прямого моделирования, несомненно, очень полезен. Однако ЗКС характеризуется наличием многочисленных прямых и обратных связей, которые до конца не исследованы. Процессы, протекающие в ЗКС, нелинейны, а при некоторых условиях — хаотичны. В итоге даже относительно малые изменения, вносимые в сценарии воздействия на ЗКС, могут приводить к существенно отличным друг от друга результатам, что затрудняет их интерпретацию. В сущности, основная задача геоинженерии — управление ЗКС. Однако данная задача, как это ни странно, рассматривается вне рамок теории управления, т.е. без строгой математической формулировки целей и методов их достижения. На наш взгляд, с позиций кибернетики вполне возможно построить единую методологию планирования и осуществления геоинженерных проек-

тов и проектов по модификации гидрометеорологических процессов (ГМП), что было предложено еще в конце 1970-х годов одним из авторов данной работы, Р.М. Юсуповым [8]. Выделив из окружающих природных явлений геофизическую среду как совокупность неживых объектов и протекающих в них процессов, он ввел понятие геофизической кибернетики как науки об управлении процессами в геофизической среде. В рамках данного подхода ЗКС представляет собой объект управления, а роль управляющей подсистемы отводится соответствующим общественным структурам и, в частности, специально подготовленным и наделенным необходимыми полномочиями операторам, в распоряжении которых находятся все требующиеся силы и средства. Геофизическая кибернетика как новое междисциплинарное научное направление развивается на основе идей и методов наук о Земле, математической теории оптимального управления, технической кибернетики, теории динамических систем, экономики и других наук.

Задача управления ЗКС является чрезвычайно сложной [4, 9-13], поскольку ЗКС как уникальный физический объект обладает рядом специфических особенностей, существенно ограничивающих применение лабораторного моделирования для его изучения. Поэтому основным методом исследования как самой ЗКС, так и проблемы управления ею служит математическое моделирование. Перечислим некоторые особенности ЗКС как физического объекта [14, 15]:

- ЗКС — комплексная интерактивная физическая система с многочисленными положительными и отрицательными обратными связями, компоненты которой — атмосфера, гидросфера, литосфера и криосфера, — имеют характерные физические и иные свойства. ЗКС — система открытая, однако ее воздействие на внешнюю среду пренебрежимо мало;

- временные масштабы физических процессов, протекающих в ЗКС, изменяются в очень широком диапазоне — от секунд (турбулентные флуктуации) до десятков, сотен и даже тысяч лет. Однако характерные временные масштабы энергетически значимых физических процессов определяются соотношением временных масштабов исследуемых процессов и временем установления равновесного состояния ЗКС, т.е. зависят от рассматриваемой задачи;

- пространственный спектр движений ЗКС, в силу ее глобальности, охватывает диапазон от молекулярного уровня до планетарного;

- колебательные процессы в ЗКС обусловлены как внутренними процессами (собственные колебания), так и внешними воздействиями (вынужденные колебания). Собственные колебания являются следствием внутренней неустойчивости ЗКС относительно случайных воз-

мущений. Антропогенные воздействия на ЗКС (преднамеренные и непреднамеренные) относятся к категории внешних возмущений;

- динамические процессы, протекающие в ЗКС и ее компонентах, нелинейны и хаотичны;

- энергетика процессов, протекающих в ЗКС, колоссальна.

Применение разработанных в других областях кибернетических подходов и методов наталкивается на определенные ограничения, поскольку:

- ЗКС и протекающие в ней процессы недостаточно идентифицированы как объекты управления, а их математические модели остаются далекими от совершенства и не всегда обладают необходимой степенью адекватности;

- ЗКС относится к классу систем с распределенными параметрами, описываемых дифференциальными уравнениями (ДУ) в частных производных [16, 17]. Анализ и синтез систем управления такими объектами требует развития теории управления, разработанной главным образом для объектов с сосредоточенными параметрами;

- методы управления ЗКС должны быть, с одной стороны, физически обоснованными, а с другой — технически реализуемыми. Современное понимание причинно-следственных связей в ЗКС и законов, которым она подчиняется, позволяет идентифицировать основные физические механизмы, которые могут рассматриваться в качестве основы для разработки методов управления. Поскольку механизмы управления ЗКС описываются в математических моделях параметрически [9-12], изучение чувствительности математических моделей ЗКС к вариациям управляющих параметров становится необходимым для того, чтобы оценить отклик ЗКС на управляющие воздействия.

Постановка задачи управления состоянием ЗКС включает в себя математическую модель системы, описывающую ее поведение под влиянием управляющих воздействий и внешних возмущений, формулировку цели управления, модель управляющих воздействий и ограничения, накладываемые на управляющие воздействия и состояние ЗКС. Задача управления ЗКС и крупномасштабными атмосферными процессами была сформулирована нами в [9-13], где также были рассмотрены методические вопросы, связанные с проблемой управления ЗКС. В частности, было отмечено следующее важное обстоятельство. В математических моделях ЗКС, в силу их дискретной пространственно-временной структуры, физические механизмы, ответственные за энергетические преобразования и которые, следовательно, могут рассматриваться как потенциальные каналы управления, описываются параметрически. Существует научное направление, связанное с разработкой методов параметризации так называемых подсеточных физиче-

ских процессов. В результате разработка физически обоснованных методов управления ЗКС может быть сведена к задаче исследования чувствительности математических моделей ЗКС к вариациям параметров, рассматриваемых нами в качестве управлений. Инструментом решения этого класса задач является теория динамических систем и теория чувствительности систем управления [18-22]. Методы теории чувствительности позволяют получить количественные оценки отклика ЗКС на управляющие воздействия. Придавая некоторым компонентам вектора параметров модели ЗКС смысл управлений, мы получаем формальную возможность исследовать поведение модели ЗКС под влиянием управляющих воздействий и таким образом сделать заключение о физической обоснованности рассматриваемого метода управления. Реакция системы на управляющие воздействия может быть оценена с помощью абсолютных функций (коэффициентов) чувствительности, а ранжирование методов управления с точки зрения их реализуемости — посредством относительных (нормированных) функций (коэффициентов) чувствительности.

Как отмечалось выше, процессы, протекающие в ЗКС, обладают колоссальными запасами энергии, что делает невозможной задачу реализации управляющих воздействий соизмеримых по своим энергетическим возможностям с энергетикой реальных физических процессов. В связи с этим актуальной является проблема поиска чувствительных точек физических процессов, сравнительно небольшие воздействия на которые позволили бы качественно изменить динамику процесса и, таким образом, управлять им при сравнительно малых энергозатратах. Многие геофизические процессы в реальных условиях находятся в метастабильном состоянии, и их стабильность может быть легко нарушена благодаря сколь угодно малым возмущениям. К примеру, крупномасштабные атмосферные потоки, как правило, бароклинно и баротропно неустойчивы. Мезомасштабным процессам зачастую присуща конвективная неустойчивость. Поэтому изучение различных видов неустойчивости геофизических процессов, несомненно, является важным с точки зрения разработки методов управления ими. Неустойчивость геофизических процессов исследуется обычно как задача нахождения необходимых условий роста инфинитезимальных (бесконечно малых) возмущений в зависимости от значений ряда ключевых (управляющих) параметров. В этом аспекте оценить влияние управляющих параметров на возникновение неустойчивости позволяют методы теории чувствительности. Однако существующие методы исследования чувствительности ЗКС [19-23] имеют ограниченные возможности при рассмотрении процессов, которым свойственно явление детерминированного хаоса [14]. В этом

случае функции чувствительности оказываются малоинформативными [24-26], и для оценки чувствительности модели к вариациям параметров необходимо использовать специальные подходы, основанные, например, на свойстве отслеживания псевдотраекторий [27, 28]. В работах [29, 30] на примере простой совместной модели системы атмосфера-океан мы показали эффективность данного подхода.

В данной работе рассматривается приложение теории чувствительности для исследования отклика математических моделей бароклинной неустойчивости атмосферных потоков к вариациям параметров. Информация, получаемая на основе рассчитанных коэффициентов чувствительности, является очень полезной с точки зрения оценки физической обоснованности методов управления крупномасштабными волновыми процессами в атмосфере и построения оптимальных систем управления погодно-климатическими процессами.

**2. Анализ чувствительности модели бароклинной неустойчивости на  $f$ -плоскости.** Отправной точкой для построения теоретических моделей крупномасштабных атмосферных процессов служит система полных (в зарубежной литературе именуемых примитивными) уравнений гидротермодинамики, которая в изобарической системе координат имеет следующий вид (для определенности полагаем, что горизонтальные координаты  $x$  и  $y$  направлены соответственно на восток и на север) [31]:

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla + \omega \frac{\partial}{\partial p} \right) \mathbf{u} + f \mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\nabla \Phi, \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \right) T - S_p \omega = \frac{Q}{c_p}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial p} = -\frac{RT}{p}, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0. \quad (4)$$

Здесь  $\mathbf{u} = i\mathbf{u} + j\mathbf{v}$  — вектор горизонтальной скорости,  $\omega \equiv dp/dt$  — вертикальная скорость в  $p$ -системе координат,  $p$  — давление,  $\Phi$  — геопотенциал,  $T$  — температура,  $Q$  — скорость притока тепла к единице массы воздуха,  $R$  — газовая постоянная,  $S_p$  — мера статической устойчивости атмосферы,  $\mathbf{k}$  — единичный вектор вертикальной оси,  $f$  — параметр Кориолиса,  $c_p$  — теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Необходимые условия неустойчивости могут быть получены на основе анализа уравнений (1)-(4), линеаризованных относительно стационарного невозмущенного состояния  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{\omega}$ ,  $\bar{T}$ ,  $\bar{\Phi}$ , представляющего собой зональный поток:

$$\bar{u} = -\frac{1}{f} \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial y}, \quad \bar{v} = 0, \quad \bar{\omega} = 0, \quad \frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial p} = -\frac{R\bar{T}}{p}, \quad (5)$$

где  $\bar{T} = \bar{T}(y, p)$ . Бароклинная неустойчивость является одним из видов гидродинамической неустойчивости атмосферных потоков, развивающаяся за счет существования меридионального градиента температуры  $\partial \bar{T} / \partial y$ , благодаря которому в потоке создается вертикальный сдвиг скорости ветра (термический ветер):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial p} = \frac{R}{f_0 p} \frac{\partial \bar{T}}{\partial y}. \quad (6)$$

Задача на устойчивость стационарного состояния (5) рассматривается относительно инфинитезимальных возмущений в адиабатическом приближении ( $Q=0$ ) при постоянном параметре Кориолиса  $f = f_0$ , т.е. на  $f$ -плоскости. Представим переменные модели в виде суммы невозмущенного состояния и отклонения от него:

$$\psi(x, p, t) = \bar{\psi}(p) + \psi'(x, p, t), \quad \psi = (u, v, \omega, T, \Phi)^T,$$

где верхний индекс  $T$  означает операцию транспонирования вектора. Линеаризуем уравнения (1)-(4) относительно состояния (5) и будем затем искать решение в виде нормальных мод:

$$\psi'(x, p, t) = \hat{\psi}(p) e^{ik(x-ct)},$$

где  $\hat{\psi}(p)$  — амплитуда возмущений,  $k$  — волновое число,  $c$  — комплексная фазовая скорость. В итоге задача нахождения необходимых условий неустойчивости сводится к проблеме собственных значений [32]:

$$(\bar{u} - c) \left[ 1 - \frac{k^2}{f_0^2} (\bar{u} - c)(\bar{u} - c) \right] \frac{\partial^2 \hat{\omega}}{\partial p^2} + 2\Lambda \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial p} - \sigma \frac{k^2}{f_0^2} (\bar{u} - c) \hat{\omega} = 0, \quad (7)$$

при заданных граничных условиях для  $\hat{\omega}$ :

$$\hat{\omega} = 0, \quad p = 0, \quad P_0. \quad (8)$$

Здесь  $\sigma = (R^2T/gp^2)(\gamma_d - \gamma)$  — параметр статической устойчивости,  $\gamma_d$  — сухоадиабатический градиент,  $\gamma = -\partial T/\partial z$  — вертикальный градиент температуры,  $P_0 = 1000$  гПа — давление на нижней границе атмосферы. Решение задачи (7)-(8) имеет вид [32, 33]:

$$c_{1,2} = \frac{\Lambda}{2} \left[ 1 \pm \sqrt{1 - 4\eta^{-2}(\eta \coth \eta - 1)} \right],$$

где  $\eta = P_0 \sqrt{\sigma} (k/f_0)$ ,  $\Lambda = -P_0 (\partial \bar{u} / \partial p)$ . Если мнимая часть фазовой скорости  $c_i$  отлична от нуля, то поток неустойчив и скорость роста неустойчивой волны с волновым числом  $k$  вычисляется как  $\chi_k = kc_i$ :

$$\chi_k = \frac{\Lambda f_0}{2P_0 \sqrt{\sigma}} \sqrt{\eta^2 - 4(\eta \coth(\eta) - 1)}. \quad (9)$$

Условие неустойчивости  $\eta < \eta_c \approx 2.3994$  вытекает из анализа дискриминантов (9). Таким образом, неустойчивость волны с волновым числом  $k$  определяется параметром статической устойчивости. Однако скорость роста волны  $\chi_k$ , являющаяся основным показателем развития неустойчивости (вихревой динамики), зависит не только от  $\sigma$ , но и от параметра  $\Lambda$ , т.е. от величины термического ветра, характеризующего меридиональный градиент температуры. Таким образом, в рамках изложенной постановки задачи развитие бароклинной неустойчивости управляется двумя параметрами —  $\sigma$  и  $\Lambda$ . Для оценки влияния этих параметров на развитие неустойчивости введем следующие коэффициенты чувствительности:

$$S_\sigma = \frac{\partial \chi_k}{\partial \sigma}, \quad S_\Lambda = \frac{\partial \chi_k}{\partial \Lambda}. \quad (10)$$

Аналитические выражения для  $S_\sigma$  и  $S_\Lambda$  получаются в результате дифференцирования (9) по параметрам  $\sigma$  и  $\Lambda$  соответственно [32]:

$$S_\sigma = \frac{\chi_k}{2\sigma} \left( P_0 \sqrt{\sigma} \frac{k}{f_0} \frac{\eta - 2 \coth(\eta) + 2\eta \operatorname{csch}^2(\eta)}{\eta^2 - 4(\eta \coth(\eta) - 1)} - 1 \right), \quad (11)$$

$$S_{\Lambda} = \frac{f_0}{2P_0\sqrt{\sigma}} \sqrt{\left| \eta^2 - 4(\eta \coth(\eta) - 1) \right|}. \quad (12)$$

Коэффициенты  $S_{\sigma}$  и  $S_{\Lambda}$  вычисляются в окрестности некоторых базовых значений параметров  $\sigma^*$  и  $\Lambda^*$ , зависящих от погодноклиматических условий. Если  $\delta\sigma$  и  $\delta\Lambda$  — управляющие воздействия, такие что  $\delta\sigma \ll \sigma^*$  и  $\delta\Lambda \ll \Lambda^*$ , тогда изменения скорости роста неустойчивых волн  $\delta\chi_k$ , обусловленные управлениями  $\delta\sigma$  и  $\delta\Lambda$ , оцениваются следующим образом:

$$\delta\chi_k(\delta\sigma) \equiv \chi_k(\sigma^* + \delta\sigma) - \chi_k(\sigma^*) \approx \delta\sigma \times S_{\sigma}|_{\sigma=\sigma^*}, \quad (13)$$

$$\delta\chi_k(\delta\Lambda) \equiv \chi_k(\Lambda^* + \delta\Lambda) - \chi_k(\Lambda^*) \approx \delta\Lambda \times S_{\Lambda}|_{\Lambda=\Lambda^*}. \quad (14)$$

Коэффициенты чувствительности  $S_{\sigma}$ , рассчитанные для различных  $\sigma^*$ , изображены на рисунке 1. Как следует из анализа этого рисунка, увеличение  $\sigma^*$  приводит к сдвигу спектра неустойчивости в длинноволновую область. При фиксированном  $\sigma^*$  наблюдается экспоненциальный рост чувствительности скорости роста неустойчивых волн к параметру статической устойчивости по мере увеличения волнового числа. Пусть  $\sigma^* = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [31]. Полагая, что управление  $\delta\sigma$  составляет -5% от величины базового значения, оценим влияние  $\delta\sigma$  на скорость роста неустойчивых возмущений, используя соотношение (13). Отметим, что уменьшение  $\sigma^*$  на 5% соответствует увеличению вертикального градиента температуры  $\gamma$  на  $0,2 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$ , тогда как стандартное значение  $\gamma$  составляет  $6,5 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$ . В таблице 1 показаны изменения скоростей роста волн различной длины, обусловленные  $\delta\sigma$ . Наиболее интересный результат состоит в том, что волна с длиной 3300 км демонстрирует феноменальный рост — почти 120% относительно невозмущенного значения. Скорость ее роста, таким образом, достигает значений  $0,35 \text{ суг}^{-1}$ . С увеличением длины волны неустойчивых возмущений влияние  $\delta\sigma$  на их рост значительно уменьшается. Изменение  $\gamma$  на  $0,2 \text{ К} \cdot \text{км}^{-1}$  может быть достигнуто различными способами, например, за счет изменения альbedo подстилающей поверхности. В природе имеется аналог данного механизма управления: под влиянием глобальных климатических измене-

ний огромные площади в Арктике оказались непокрытыми льдом, в результате чего значительно участилось образование так называемых полярных депрессий — мезомасштабных интенсивных полярных штормов. Хотя, конечно, на их формирование оказывают определенное влияние конвективные процессы (например, условная неустойчивость второго рода).

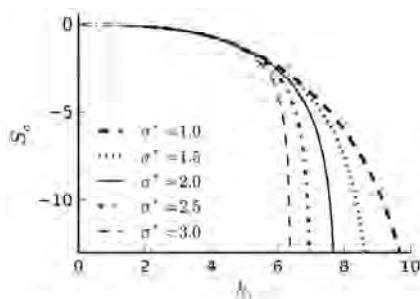


Рис. 1. Коэффициенты чувствительности  $S_\sigma$  при различных  $\sigma^* \times 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  ( $k_z$  — зональное волновое число)

Коэффициенты чувствительности  $S_\Lambda$ , рассчитанные для различных  $\sigma^*$ , представлены на рисунке 2. График  $S_\Lambda$  подобен графику зависимостей скоростей роста волн  $\chi_k$  от волнового числа, что вытекает из сопоставления соотношений (9) и (12). Следовательно, наиболее чувствительна к параметру  $\Lambda$  волна, имеющая при заданных  $\sigma^*$  и  $\Lambda^*$  максимальную скорость роста. Если  $\sigma^* = 2 \times 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  и  $\Lambda^* = 30 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , максимальную скорость роста  $0,59 \text{ сут}^{-1}$  демонстрирует волна  $L_x = 5370 \text{ км}$ , для которой  $S_\Lambda \approx 2,86 \times 10^{-7}$ . Вертикальный сдвиг скорости ветра при заданном значении  $\Lambda^*$  составляет  $0,03 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{гПа}^{-1}$ . Согласно (6), этот сдвиг скорости ветра генерируется меридиональным градиентом температуры, равным  $5,2^\circ \text{ С}$  на  $10^3 \text{ км}$ . Пусть управление  $\delta\Lambda$  составляет 5% величины  $\Lambda^*$ , что обеспечивается увеличением меридионального температурного градиента на величину  $0,26^\circ \text{ С}$  на  $10^3 \text{ км}$ . Скорость роста наиболее неустойчивой волны при этом увеличивается незначительно:  $\delta\chi \approx 2,93 \times 10^{-5} \text{ сут}^{-1}$ . Реакция более длинных и более коротких волн на изменение параметра  $\Lambda$  проявляется еще в меньшей степени.

Таблица 1. Изменение скорости роста волн различной длины при

$$\delta\sigma^* = -0,05 \times \sigma^*$$

$L_w, \text{км}$	6500	5100	4300	3700	3300
$\chi_k, \text{сут}^{-1}$	0,54	0,58	0,57	0,45	0,16
$S_\sigma$	-0,72	-1,42	-2,62	-5,20	-22,05
$\delta\chi_k, \text{сут}^{-1}$	0,01	0,01	0,02	0,05	0,19
$(\delta\chi/\chi) \times 100\%$	2	2	4	11	119

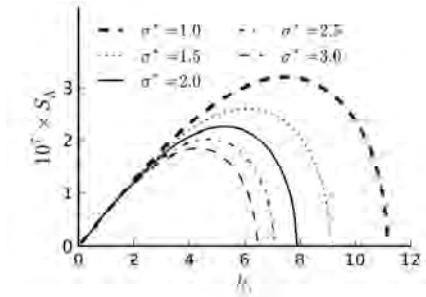


Рис. 2. Коэффициенты чувствительности  $S_\Lambda$  при различных  $\sigma^* \times 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Поскольку управляющие параметры  $\sigma$  и  $\Lambda$  имеют различную размерность и различный класс эквивалентности, для сравнения их относительной роли в изменении  $\chi_k$  используются относительные (нормированные) коэффициенты чувствительности:

$$S_\sigma^R = S_\sigma \frac{\sigma}{\chi_k}, \quad S_\Lambda^R = S_\Lambda \frac{\Lambda}{\chi_k}. \quad (15)$$

Графики коэффициентов  $S_\sigma^R$  для различных базовых значений  $\sigma^*$  представлены на рисунке 3, из которого следует, что по мере уменьшения длины волны коэффициенты  $S_\sigma^R$  по абсолютной величине увеличиваются. В то же время относительный коэффициент чувствительности  $S_\Lambda^R$  от волнового числа не зависит и для всех неустойчивых волн равен единице:  $S_\Lambda^R = 1$ . Отсюда следует очень важный вывод: для тех неустойчивых волн, для которых справедливо неравенство  $|S_\sigma^R| > 1$ , влияние изменений параметра  $\sigma$  на изменение скорости роста  $\chi_k$  пре-

восходит влияние изменений параметра  $\Lambda$ . Данное неравенство справедливо для волн, находящихся в коротковолновой части спектра.

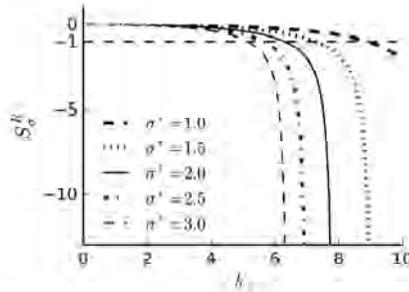


Рис. 3. Нормированные коэффициенты чувствительности  $S_{\sigma}^R$  при различных  $\sigma^* \times 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Учитывая то, что длинные волны очень слабо реагируют на малые вариации параметров  $\sigma$  и  $\Lambda$ , мы приходим к выводу, что при построении систем управления крупномасштабной вихревой динамикой атмосферы основным управляющим параметром является параметр статической устойчивости (т.е. атмосферная стратификация).

**3. Исследование чувствительности модели бароклинической неустойчивости на  $\beta$  –плоскости.** Рассмотренная в предыдущем параграфе модель (так называемая модель Иди [31]) является наиболее простой моделью бароклинической неустойчивости. В этом параграфе мы рассмотрим более содержательную по физическому смыслу многоуровневую модель данного физического явления, учитывающую бета – эффект. Полагая, что движение в атмосфере является квазигеострофическим и адиабатическим, система уравнений (1)-(4) путем несложных преобразований может быть сведена к двум уравнениям [31]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \nabla^2 \psi + J(\psi, \nabla \psi) + \beta \frac{\partial \psi}{\partial p} = f_0 \frac{\partial \omega}{\partial p}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \psi}{\partial p} \right) + J \left( \psi, \frac{\partial \psi}{\partial p} \right) + \frac{\sigma}{f_0} \omega = 0. \quad (17)$$

Здесь  $\psi = \Phi / f_0$  — геострофическая функция тока,  $\beta = \partial f / \partial y$  — параметр Россби,  $J(a, b) = (\partial a / \partial x)(\partial b / \partial y) - (\partial a / \partial y)(\partial b / \partial x)$  — якобиан.

Основное (невозмущенное) состояние атмосферы — стационарный зональный поток:

$$\bar{u} = -\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial y}, \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} = -\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial p} \right), \quad \bar{v} = -\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial x} = 0, \quad \bar{\omega} = 0. \quad (18)$$

Для получения необходимых условий неустойчивости основного потока линеаризуем уравнения (16) и (17) относительно невозмущенного состояния (18). Пусть  $\psi = \bar{\psi} + \psi'$ ,  $\omega = \bar{\omega} + \omega'$ , где  $\psi'$  и  $\omega'$  — малые возмущения. Решение линеаризованных уравнений будем искать в виде гармонических волн:

$$\begin{aligned} \psi(x, y, p, t) &= -\bar{u}(p)y + \hat{\psi}(p, t)e^{i(kx+ny)}, \\ \omega(x, y, p, t) &= \hat{\omega}(p, t)e^{i(kx+ny)}, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\hat{\psi}$  и  $\hat{\omega}$  — комплексные амплитуды малых возмущений функции тока и вертикальной скорости,  $k$  и  $n$  — зональное и меридиональное волновые числа. Подставляя (19) в (16) и (17), мы получим систему обыкновенных линейных ДУ относительно амплитуд  $\hat{\psi}$  и  $\hat{\omega}$ :

$$\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial t} = -ik\bar{u}\hat{\psi} + \frac{1}{k^2 + n^2} \left( ik\beta\hat{\psi} - f_0 \frac{\partial \hat{\omega}}{\partial p} \right), \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial p} \right) = ik \left( \frac{d\bar{u}}{dp} \hat{\psi} - \bar{u} \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial p} \right) - \frac{\sigma}{f_0} \hat{\omega} = 0. \quad (21)$$

Дифференцируя (20) по  $p$  и вычитая затем полученное выражение из (21), мы приходим к диагностическому уравнению для  $\hat{\omega}$ :

$$\frac{\partial^2 \hat{\omega}}{\partial p^2} - (k^2 + n^2) \frac{\sigma}{f_0^2} \hat{\omega} = \frac{i}{f_0} \left[ k\beta \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial p} - 2\hat{\psi}k(k^2 + n^2) \frac{d\bar{u}}{dp} \right]. \quad (22)$$

Система двух уравнений (20) и (22) содержит два неизвестных  $\hat{\psi}$  и  $\hat{\omega}$ , являющихся функциями  $p$  и  $t$ . Если модель атмосферы имеет  $N$  уровней по вертикали (рисунок 4), то, аппроксимируя конечными разностями уравнение (20) на основных уровнях, а уравнение (22) — на промежуточных уровнях, мы получим систему  $2N-1$  алгебраических уравнений с  $2N-1$  неизвестными, которая может быть решена численно, если заданы начальные и граничные условия.

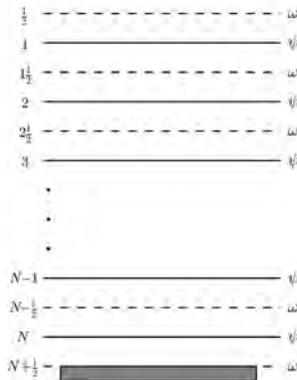


Рис. 4. Вертикальная структура модели

Аналитическое решение может быть получено для  $N=2$ . Примем в качестве граничных условий отсутствия потока массы на верхней границе атмосферы и отсутствие орографии и трения на ее нижней границе:

$$\widehat{\omega}_{1/2} = \widehat{\omega}_2/2 = 0. \quad (23)$$

Подставляя конечно-разностный аналог уравнения (22) в соответствующий аналог уравнения (20), мы приходим к системе двух обыкновенных ДУ для определения  $\widehat{\psi}_1$  и  $\widehat{\psi}_2$ :

$$\dot{\widehat{\psi}}_1 = a_1 \widehat{\psi}_1 + a_2 \widehat{\psi}_2, \quad \dot{\widehat{\psi}}_2 = a_3 \widehat{\psi}_2 + a_4 \widehat{\psi}_1. \quad (24)$$

Здесь:

$$a_1 = -ik \left[ u_2 + (\eta + 1)(u_1 - c_\beta) \right] (\eta + 2)^{-1}, \quad (25a)$$

$$a_2 = ik (2u_T + c_\beta) (\eta + 2)^{-1},$$

$$a_3 = -ik \left[ u_1 + (\eta + 1)(u_2 - c_\beta) \right] (\eta + 2)^{-1}, \quad (25b)$$

$$a_4 = -ik (2u_T - c_\beta) (\eta + 2)^{-1},$$

где  $u_T = (u_2 - u_1)/2$ ,  $c_\beta = \beta / (k^2 + n^2)$ ,  $\eta = (k^2 + n^2) (\sigma_1 / f_0^2) (\Delta p)^2$ .

Как известно, общее решение уравнений (24) имеет вид:

$$\widehat{\psi}_1(t) = C_1 e^{V_1 t} + C_2 e^{V_2 t}, \quad \widehat{\psi}_2(t) = C_3 e^{V_1 t} + C_4 e^{V_2 t}, \quad (26)$$

где  $C_1, C_2, C_3, C_4$  — комплексные коэффициенты,  $\nu_1$  и  $\nu_2$  — циклические частоты, являющиеся корнями характеристического уравнения, соответствующего системе (24):

$$\nu_{1,2} = \frac{1}{2}(a_1 + a_3) \pm \sqrt{\frac{1}{4}(a_1 + a_3)^2 - (a_1 a_3 - a_2 a_4)}. \quad (27)$$

Решение неустойчиво, если частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$  — комплексные: их мнимые части определяют экспоненциальный рост амплитуды возмущений. Подстановка соотношений (25) в подкоренное выражение (27) позволяет получить условие неустойчивости:

$$D^2 \equiv 4 \left[ u_T^2 (\eta^2 - 4) + c_\beta^2 \right] < 0. \quad (28)$$

Из (28) следует, что неустойчивость решения зависит от параметра статической устойчивости, вертикального сдвига скорости ветра,  $\beta$ -эффекта и волновых чисел  $m$  и  $n$ . Если  $\tilde{\psi}_1(0) = \tilde{\psi}_1^0$  и  $\tilde{\psi}_2(0) = \tilde{\psi}_2^0$  — начальные условия, то решение уравнений (24) имеет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_1(t) = & \frac{e^{\nu_1 t}}{2D} \left[ \tilde{\psi}_1^0 (D + 2\eta u_T) - 2\tilde{\psi}_2^0 (2u_T + c_\beta) \right] + \\ & + \frac{e^{\nu_2 t}}{2D} \left[ \tilde{\psi}_1^0 (D - 2\eta u_T) + 2\tilde{\psi}_2^0 (2u_T + c_\beta) \right], \end{aligned} \quad (29a)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_2(t) = & \frac{e^{\nu_1 t}}{2D} \left[ \tilde{\psi}_2^0 (D - 2\eta u_T) - 2\tilde{\psi}_1^0 (2u_T + c_\beta) \right] + \\ & + \frac{e^{\nu_2 t}}{2D} \left[ \tilde{\psi}_2^0 (D + 2\eta u_T) + 2\tilde{\psi}_1^0 (2u_T + c_\beta) \right]. \end{aligned} \quad (29b)$$

Зададим начальные условия в виде гармонических волн:

$$\tilde{\psi}_1^0 = A_1^0 e^{i\theta_1^0} e^{i(kx + ny)}, \quad \tilde{\psi}_2^0 = A_2^0 e^{i\theta_2^0} e^{i(kx + ny)},$$

где  $A_1^0 = A_1(0)$  и  $A_2^0 = A_2(0)$  — амплитуды, а  $\theta_1^0 = \theta_1(0)$  и  $\theta_2^0 = \theta_2(0)$  — фазы колебаний в начальный момент времени. Тогда амплитуды неустойчивых мод в произвольный момент времени  $t$  рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}
A_1(t) &= (A_1^0)^2 \operatorname{ch}^2(\tilde{\nu}t) + 4D^{-2} \operatorname{sh}^2(\tilde{\nu}t) \left[ (A_1^0 u_T \eta)^2 + (A_2^0)^2 (2u_T + c_\beta)^2 - 2A_1^0 A_2^0 u_T \eta \times \right. \\
&\quad \left. \times (2u_T + c_\beta) \operatorname{ch}(\theta_2^0 - \theta_1^0) \right] - 2A_1^0 A_2^0 D^{-1} (2u_T + c_\beta) \operatorname{sh}(2\tilde{\nu}t) \operatorname{sh}(\theta_2^0 - \theta_1^0), \\
A_2(t) &= (A_2^0)^2 \operatorname{ch}^2(\tilde{\nu}t) + 4D^{-2} \operatorname{sh}^2(\tilde{\nu}t) \left[ (A_2^0 u_T \eta)^2 - (A_1^0)^2 (2u_T - c_\beta)^2 - 2A_1^0 A_2^0 u_T \eta \times \right. \\
&\quad \left. \times (2u_T - c_\beta) \operatorname{ch}(\theta_2^0 - \theta_1^0) \right] - 2A_1^0 A_2^0 D^{-1} (2u_T - c_\beta) \operatorname{sh}(2\tilde{\nu}t) \operatorname{sh}(\theta_2^0 - \theta_1^0),
\end{aligned}$$

где  $\tilde{\nu} = (\nu_2 - \nu_1)/2$ . Если рассматривается исключительно бароклини-  
ный механизм роста неустойчивых возмущений, то тогда скорость  
основного потока не зависит от  $y$  ( $n = 0$ ), и задача определения частот  
 $\nu_1$  и  $\nu_2$  становится задачей на собственные значения, решение кото-  
рой записывается следующим образом:

$$c_{1,2} \equiv \frac{\nu_{1,2}}{k} = u_m - \frac{\beta}{k^2} \frac{k^2 + \lambda^2}{k^2 + 2\lambda^2} \pm \sqrt{\frac{\beta^2 \lambda^4}{k^4 (k^2 + 2\lambda^2)^2} + u_T^2 \frac{k^2 - 2\lambda^2}{k^2 + 2\lambda^2}}, \quad (30)$$

где  $u_m = (u_1 + u_2)/2$ ,  $\lambda^2 = f_0^2 / [\sigma(\Delta p)^2]$ ,  $c$  — комплексная фазовая  
скорость. Из (30) следует условие неустойчивости:

$$\frac{\beta^2 \lambda^4}{k^4 (k^2 + 2\lambda^2)^2} + u_T^2 \frac{k^2 - 2\lambda^2}{k^2 + 2\lambda^2} < 0. \quad (31)$$

При выполнении условия (31) фазовая скорость  $c$  имеет мни-  
мую часть  $c_i$  и скорость роста неустойчивой волны  $\chi_k$  с волновым  
числом  $k$  вычисляется по формуле:

$$\chi_k = \frac{\sqrt{|\beta^2 \lambda^4 + u_T^2 k^4 (k^4 - 4\lambda^4)|}}{k(k^2 + 2\lambda^2)}. \quad (32)$$

Таким образом, инкремент растущих возмущений  $\chi_k$  зависит  
от сдвига ветра по вертикали  $u_T$ , характеризующего горизонталь-  
ный температурный градиент, переменной  $\lambda$ , являющейся функци-

ей параметра статической устойчивости,  $\beta$  - эффекта и длины неустойчивой волны.

При  $N = 2$  изложенная выше модель становится, по сути, моделью Филлипа [31]. Рассмотрим некоторые ее свойства. Равенство нулю дискриминанта в выражении (32) позволяет построить нейтральную кривую, разделяющую области устойчивости и неустойчивости:

$$u_T^2 = \frac{\beta^2 \lambda^4}{k^4 (4\lambda^4 - k^4)}. \quad (33)$$

Нейтральная кривая показана на рисунок 5. В данной модели короткие и длинные волны всегда устойчивы и имеют место так называемые коротковолновое  $L_{SC}$  и длинноволновое  $L_{LC}$  отсечения. Волна будет неустойчивой, если ее длина удовлетворяет двойному неравенству  $L_{SC} < L_x < L_{LC}$ . Диапазон неустойчивых волн может быть найден из выражения (33):

$$k^4 = 2\lambda^4 \pm \left( 4\lambda^8 - \frac{\beta^2 \lambda^4}{u_T^2} \right)^{1/2}.$$

Дисперсионное соотношение (30) позволяет построить зависимость фазовой скорости волн от их длины (рисунок 6). Устойчивым волнам соответствуют два значения фазовой скорости, тогда как неустойчивым волнам — одно значение. На рисунке 6, для сравнения, показана также фазовая скорость квазибаротропных волн Россби.

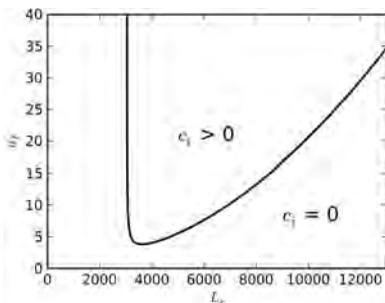


Рис. 5. Нейтральная кривая, разделяющая области устойчивости ( $c_i=0$ ) и неустойчивости ( $c_i>0$ )

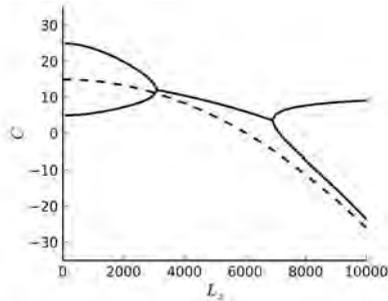


Рис. 6. Зависимость фазовой скорости бароклинных волн от их длины при  $u_m=15\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$  и  $\sigma^*=2\cdot 10^{-6}\text{ м}^2\cdot\text{Па}^{-2}\cdot\text{с}^{-2}$  (штриховой линией показана фазовая скорость баротропных волн Россби)

Скорости роста неустойчивых волн  $\chi_k$  для нескольких значений  $\sigma^*$  изображены на рисунке 7. Уменьшение  $\sigma^*$  (т.е. рост  $\gamma$ ) приводит к увеличению  $\chi_k$  и расширению спектрального диапазона неустойчивости. Представление о влиянии вертикального сдвига ветра (т.е. меридионального температурного градиента) на  $\chi_k$  дает рисунок 8. Дифференцируя выражение (33) по  $k$ , можно получить критерий неустойчивости (критерий Филлипса): развитие бароклинной неустойчивости происходит в том случае, если  $|u_T| > \beta / (2\lambda^2)$  [31].

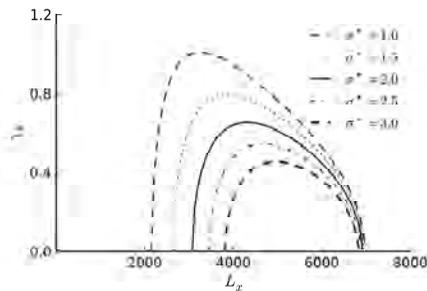


Рис. 7. Скорость роста неустойчивых волн в зависимости от их длины для различных значений  $\sigma^*$  при  $u_T^*=7,5\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$

В рассматриваемой модели параметр статической устойчивости  $\sigma$  и вертикальный сдвиг скорости ветра  $u_T$  являются управляющими параметрами. Для исследования влияния этих параметров на развитие бароклинной неустойчивости будем использовать коэффи-

циенты чувствительности  $S_\sigma$  и  $S_{u_T}$ . Выражения для этих коэффициентов можно получить путем дифференцирования уравнения (30) по  $\sigma$  и  $u_T$  соответственно:

$$S_\sigma = -\frac{k\lambda^2}{\sigma(k^2 + 2\lambda^2)^2} \frac{2u_T^2 k^4 (k^4 + 2\lambda^2) - \beta^2 \lambda^2}{u_T^2 k^4 (k^4 - 4\lambda^4) + \beta^2 \lambda^4} \times \quad (34)$$

$$\times \sqrt{u_T^2 k^4 (k^4 - 4\lambda^4) + \beta^2 \lambda^4},$$

$$S_{u_T} = -u_T k^3 (k^2 - 2\lambda^2) \frac{\sqrt{\beta^2 \lambda^4 + u_T^2 k^4 (k^4 - 4\lambda^4)}}{\beta^2 \lambda^4 + u_T^2 k^4 (k^4 - 4\lambda^4)}. \quad (35)$$

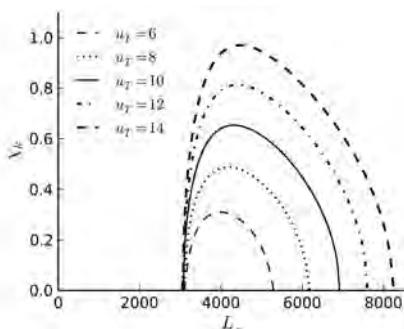


Рис. 8. Скорость роста неустойчивых волн в зависимости от их длины для различных значений  $u_T^*$  при  $\sigma^* = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-2}$

Коэффициенты  $S_\sigma$  и  $S_{u_T}$  вычисляются в окрестности базовых значений параметра статической устойчивости  $\sigma^*$  и скорости термического ветра  $u_T^*$ , зависящих от погодно-климатических условий. Графики коэффициентов  $S_\sigma$  и  $S_{u_T}$  приведены на рисунке 9 и 10 соответственно.

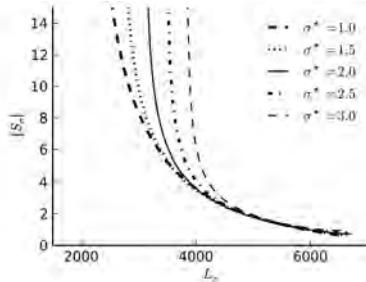


Рис. 9. Модуль коэффициентов чувствительности  $S_\sigma$  для различных значений  $\sigma^*$  при  $u_T^* = 7,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

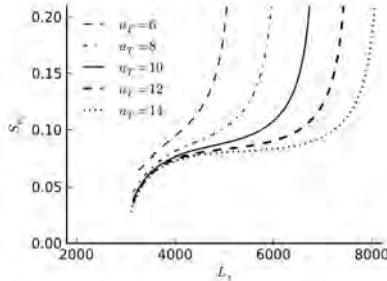


Рис. 10. Коэффициенты чувствительности  $S_{u_T}$  для различных значений  $u_T^*$  при  $\sigma^* = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-2}$

Как и в модели, рассмотренной в предыдущем параграфе, высокая чувствительность к статической устойчивости атмосферы свойственна коротким волнам, тогда как длинные неустойчивые волны, напротив, более чувствительны к вертикальному сдвигу скорости ветра  $u_T$ . Существенное отличие данной модели от модели Иди состоит в том, что влияние параметра  $u_T$  на скорость роста неустойчивых волн усиливается по мере увеличения их длины. Рассмотрим влияние управляющих воздействий  $\delta\sigma$  и  $\delta u_T$  на развитие бароклинной неустойчивости. Как и ранее, будем полагать, что величина управляющих воздействий составляет 5% от базового значения соответствующего параметра. Таблица 2 иллюстрирует изменения скоростей роста неустойчивых волн различной длины, обусловленные  $\delta\sigma$ , а в таблице 3 показаны соответствующие изменения, обусловленные управляющим воздействием  $\delta u_T$ . Результаты расчетов подтверждают вывод о том,

что изменение вертикальной стратификации атмосферы — наиболее приемлемый механизм управления бароклинной неустойчивостью.

Таблица 2. Изменение скорости роста волн различной длины при  $\delta\sigma^* = -0,05 \times \sigma^*$

$L_x, \text{км}$	5000	4000	3500	3200	3150
$\chi, \text{сут}^{-1}$	0,37	0,44	0,37	0,21	0,15
$S_\sigma$	-1,34	-2,77	-4,85	-10,60	-15,31
$\delta\chi, \text{сут}^{-1}$	0,01	0,02	0,04	0,09	0,13
$(\delta\chi/\chi) \times 100\%$	3	5	11	44	87

Таблица 3. Изменение скорости роста волн различной длины при  $\delta u_T = 0.05 \times u_T^*$

$L_x, \text{км}$	5000	4000	3500	3200	3150
$S_u$	0,11	0,08	0,07	0,05	0,05
$\delta\chi, \text{сут}^{-1}$	0,04	0,03	0,03	0,02	0,12
$(\delta\chi/\chi) \times 100\%$	11	7	7	9	80

Очень важный вывод позволяет сделать анализ относительных коэффициентов чувствительности (рисунок 11): существует критическое значение длины волны  $L_x^{cr}$ , которое делит спектр неустойчивых волн на две части. При  $L_x < L_x^{cr}$  преобладающее влияние на развитие бароклинной неустойчивости имеет параметр статической устойчивости, при  $L_x > L_x^{cr}$  преобладающая роль принадлежит вертикальному сдвигу скорости ветра, а значит, меридиональному градиенту температуры. Для  $\sigma^* = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-2}$  и  $u_T^* = 7,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$  имеем  $L_x^{cr} \approx 3800 \text{ км}$ .

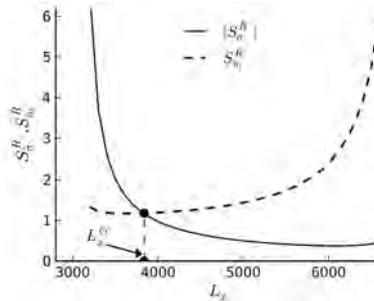


Рис. 11. Относительные коэффициенты чувствительности  $S_\sigma^R$  и  $S_{u_T}^R$  при

$$\sigma^* = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{Па}^{-2} \cdot \text{с}^{-2} \text{ и } u_T^* = 7,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$$

**4. Заключение.** Задачи манипулирования климатом (геоинженерия) и модификации гидрометеорологических процессов до сих пор рассматриваются вне рамок теории управления. В то же время геофизическая кибернетика как методологическая основа построения оптимальных систем управления погодно-климатическими процессами позволяет математически корректно сформулировать проблему управления ЗКС и процессами, протекающими в ее различных компонентах. В математических моделях, используемых для решения задач управления погодно-климатическими процессами, управляющие воздействия описываются параметрически. Выбор управляющих параметров предполагает исследование отклика модели рассматриваемого процесса на управляющие воздействия, что может быть реализовано с помощью методов теории чувствительности динамических систем. В данной статье, имея в виду задачу управления крупномасштабной вихревой динамикой атмосферы, нами исследуется чувствительность математических моделей бароклининой неустойчивости к основным параметрам, определяющим ее развитие — параметру статической устойчивости и меридиональному градиенту температуры. Нами получены аналитические выражения для коэффициентов чувствительности и на этой основе проанализирован отклик скорости роста неустойчивых волновых возмущений на вариации управляющих параметров. Показано, что бароклинные волны, находящиеся в коротковолновой части спектра неустойчивости, т.е. волны, длина которых  $L_x < 3000$  км ( $k_x < 7$ ), демонстрируют высокую чувствительность к статической устойчивости (вертикальной температурной стратификации) атмосферы. Увеличение вертикального градиента температуры на  $0,2$  К·км<sup>-1</sup> при стандартном его значении  $6,5$  К·км<sup>-1</sup> приводит к удвоению скоростей роста неустойчивых волн. Влияние на бароклинную неустойчивость меридионального градиента температуры как управляющего параметра менее значимо, о чем свидетельствуют рассчитанные относительные коэффициенты чувствительности.

Подход, изложенный в настоящей работе, в дальнейшем предполагается использовать для исследования чувствительности моделей ЗКС и различных геофизических процессов с целью оценки возможности гипотетического управления ими.

#### Литература

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis // Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by: Stocker T.F. et al., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1552 p.
2. Bengtsson L. Geo-engineering to confine climate change: is it at all feasible? // Climate Change. 2006. vol. 77. pp. 229–234.

3. *Crutzen P.J.* Albedo enhancement by stratospheric sulphur injections: a contribution to resolve a policy dilemma? // *Climate Change*. 2006. vol. 77. pp. 211–220.
4. *Kravitz B., Caldera K., Boucher O. et al.* Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP) // *Journal of Geophysical Research*. 2013. vol. 118. pp. 8320–8332.
5. *Ming Y., De Richter R., Liu W., Caillol S.* Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. vol. 31. pp. 792–834.
6. *Wigley T.M.* A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization // *Science*. 2006. vol. 314. pp. 452–454.
7. *Hoffman R.N.* Controlling the global weather // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. vol. 87. pp. 41–248.
8. Введение в геофизическую кибернетику и экологический мониторинг / По ред. Р.М. Юсупова // СПб: СПбГУВК. 1998. 165 с.
9. *Soldatenko S., Yusupov R.* On the possible use of geophysical cybernetics in climate manipulation (geoengineering) and weather modification // *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2015. vol. 11. pp. 116–125.
10. *Soldatenko S., Yusupov R.* An optimal control problem formulation for the atmospheric large-scale wave dynamics // *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. no. 18. pp. 875–884.
11. *Soldatenko S., Yusupov R.* Sensitivity analysis in optimal control of the Earth's climate system. In: *Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics*. A. Bulucea (Ed) // *Proceedings of the 2015 International Conference on Energy, Environment, Development and Economics (EEDe 2015)*, Greece. 2015. pp. 6–12.
12. *Soldatenko S., Yusupov R.* On the control of the geophysical system: problem formulation. In: *Mathematical Methods in Science and Mechanics // Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods, Computational Techniques and Intelligent Systems (MAMECTIS '14)*, Portugal. 2014. pp. 102–108.
13. *Soldatenko S.A.* Some applications of the theory of optimal control of distributed parameter systems to weather numerical modeling // *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. Switzerland: WMO. 1999. vol. 28. pp. 7.29–7.30.
14. *Lorenz E.N.* Deterministic non periodic flow // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. vol. 20. pp. 130–141.
15. *Marshall J., Plumb R.A.* Atmosphere, ocean and climate dynamics: An introductory text // London: Elsevier. 2007. 344 p.
16. *Lions J.L.* Optimal control of systems governed by partial differential equations // Berlin: Springer; Heidelberg: Verlag. 1971. 400 p.
17. *Lurie K.A.* Applied optimal control theory of distributed systems // New York: Springer–Verlag. 1993. 499 p.
18. *Katok A., Hasselblatt B.* Introduction to the modern theory of dynamical systems // New York: Cambridge University Press. 1997. 824 p.
19. *Розенwasser Е.Н., Юсупов Р.М.* Чувствительность систем управления // М.: Наука. 1981. 464 с.
20. *Rosenwasser E., Yusupov R.* Sensitivity of automatic control // Boca Raton: CRC Press. 2000. 436 p.
21. *Cacuci D.G.* Sensitivity and uncertainty analysis // Volume I: Theory. Boca Raton: CRC. 2003. 304 p.
22. *Cacuci D.G., Ionescu-Bujor M., Navon I.M.* Sensitivity and uncertainty analysis // Volume II: Applications to large-scale systems. Boca Raton: CRC. 2005. 368 p.
23. *Leith C.E.* Climate response and fluctuation dissipation // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1975. vol. 32. pp. 2022–2026.

24. *Lea D.J., Allen M.R., Haine W.N.* Sensitivity analysis of the climate of a chaotic system // *Tellus*. 2000. vol. 52. no. 5. pp. 523–532.
25. *Wang Q.* Forward and adjoint sensitivity computation of chaotic dynamical systems // *Journal of Computational Physics*. 2013. vol. 235. no. 15. pp. 1–13.
26. *Wang Q., Hu R., Blonigan P.* Least squares shadowing sensitivity analysis of chaotic limit cycle oscillations // *Journal of Computational Physics*. 2014. vol. 267. pp. 210–224.
27. *Palmer K.J.* Shadowing in dynamical system: Theory and applications // Dordrecht: Kluwer. 2000. 300 p.
28. *Pilyugin S.Yu.* Shadowing in dynamical systems // *Lecture notes in mathematics*. vol. 1706. Berlin: Springer–Verlag. 1999. 276 p.
29. *Soldatenko S., Yusupov R.* Sensitivity analysis of coupled chaotic dynamical systems with the pseudo-orbit tracing property // *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. no. 18. pp. 885–893.
30. *Soldatenko S., Yusupov R.* Shadowing property of coupled nonlinear dynamical system // *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. no. 50. pp. 2459–2466.
31. *Holton J.R.* Introduction to dynamic meteorology. 4<sup>th</sup> edition // London: Elsevier. 2004. 507 p.
32. *Солдатенко С.А.* Влияние статической устойчивости атмосферы и меридионального температурного градиента на рост амплитуды неустойчивых волн синоптического масштаба // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Вып. 50. № 6. С. 554–561.
33. *Soldatenko S., Tingwell C.* The sensitivity of characteristics of large-scale baroclinic unstable waves in southern hemisphere to the underlying climate // *Advances in Meteorology*. 2013.

## References

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by: Stocker T.F. et al., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1552 p.
2. Bengtsson L. Geo-engineering to confine climate change: is it at all feasible?. *Climate Change*. 2006. vol. 77. pp. 229–234.
3. Crutzen P.J. Albedo enhancement by stratospheric sulphur injections: a contribution to resolve a policy dilemma?. *Climate Change*. 2006. vol. 77. pp. 211–220.
4. Kravitz B., Caldera K., Boucher O. et al. Climate model response from the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP). *Journal of Geophysical Research*. 2013. vol. 118. pp. 8320–8332.
5. Ming Y., De Richter R., Liu W., Caillol S. Fighting global warming by climate engineering: Is the Earth radiation management and the solar radiation management any option for fighting climate change? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. vol. 31. pp. 792–834.
6. Wigley T.M. A combined mitigation/geoengineering approach to climate stabilization. *Science*. 2006. vol. 314. pp. 452–454.
7. Hoffman R.N. Controlling the global weather. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2002. vol. 87. pp. 241–248.
8. *Vvedenie v geofizicheskuyu kibernetiku i jeologicheskij monitoring* [Introduction to the geophysical cybernetics and environmental monitoring]. Yusupov R.M. (Ed.). SPb: State University. 1998. 165 p. (In Russ.).
9. Soldatenko S., Yusupov R. On the possible use of geophysical cybernetics in climate manipulation (geoengineering) and weather modification. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2015. vol. 11. pp. 116–125.

10. Soldatenko S., Yusupov R. An optimal control problem formulation for the atmospheric large-scale wave dynamics. *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. no. 18. pp. 875–884.
11. Soldatenko S., Yusupov R. Sensitivity analysis in optimal control of the Earth's climate system. Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics. A. Bulucea (Ed.). Proceedings of the 2015 International Conference on Energy, Environment, Development and Economics (EEDE 2015). Greece. 2015. pp. 6–12.
12. Soldatenko S., Yusupov R. On the control of the geophysical system: problem formulation. *Mathematical Methods in Science and Mechanics*. Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods, Computational Techniques and Intelligent Systems (MAMECTIS '14), Portugal. 2014. pp. 102–108.
13. Soldatenko S.A. Some applications of the theory of optimal control of distributed parameter systems to weather numerical modeling. *Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*. Switzerland: WMO. 1999. vol. 28. pp. 7.29–7.30.
14. Lorenz E.N. Deterministic non periodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. vol. 20. pp. 130–141.
15. Marshall J., Plumb R.A. Atmosphere, ocean and climate dynamics: An introductory text. London: Elsevier. 2007. 344 p.
16. Lions J.L. Optimal control of systems governed by partial differential equations. Berlin: Springer; Heidelberg: Verlag. 1971. 400 p.
17. Lurie K.A. Applied optimal control theory of distributed systems. New York: Springer–Verlag. 1993. 499 p.
18. Katok A., Hasselblatt B. Introduction to the modern theory of dynamical systems. New York: Cambridge University Press. 1997. 824 p.
19. Rozenwasser E.N., Yusupov R.M. *Chuvstvitel'nost' sistem upravleniya* [Sensitivity of control systems]. M.: Nauka. 1981. 464 p. (In Russ.).
20. Rosenwasser E., Yusupov R. Sensitivity of automatic control. Boca Raton: CRC Press. 2000. 436 p.
21. Cacuci D.G. Sensitivity and uncertainty analysis. Volume I: Theory. Boca Raton: CRC. 2003. 304 p.
22. Cacuci D.G., Ionescu-Bujor M., Navon I.M. Sensitivity and uncertainty analysis. Volume II: Applications to large-scale systems. Boca Raton: CRC. 2005. 368 p.
23. Leith C.E. Climate response and fluctuation dissipation. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1975. vol. 32. pp. 2022–2026.
24. Lea D.J., Allen M.R., Haine W.N. Sensitivity analysis of the climate of a chaotic system. *Tellus*. 2000. vol. 52. no. 5. pp. 523–532.
25. Wang Q. Forward and adjoint sensitivity computation of chaotic dynamical systems. *Journal of Computational Physics*. 2013. vol. 235. no. 15. pp. 1–13.
26. Wang Q., Hu R., Blonigan P. Least squares shadowing sensitivity analysis of chaotic limit cycle oscillations. *Journal of Computational Physics*. 2014. vol. 267. pp. 210–224.
27. Palmer K.J. Shadowing in dynamical system: Theory and applications. Dordrecht: Kluwer. 2000. 300 p.
28. Pilyugin S. Yu. Shadowing in dynamical systems. Lecture notes in mathematics. vol. 1706. Berlin: Springer–Verlag. 1999. 276 p.
29. Soldatenko S., Yusupov R. Sensitivity analysis of coupled chaotic dynamical systems with the pseudo-orbit tracing property. *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. no. 18. pp. 885–893.
30. Soldatenko S., Yusupov R. Shadowing property of coupled nonlinear dynamical system. *Applied Mathematical Sciences*. 2015. vol. 9. no. 50. pp. 2459–2466.
31. Holton J.R. Introduction to dynamic meteorology. 4<sup>th</sup> edition. London: Elsevier. 2004. 507 p.

32. Soldatenko S.A. [Influence of static stability and meridional temperature gradient on the growth in amplitude of synoptic-scale unstable waves]. *Izv. RAN. Atmospheric and oceanic physics – Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. vol. 50. no. 6. pp. 554–561. (In Russ.).
33. Soldatenko S., Tingwell C. The sensitivity of characteristics of large-scale baroclinic unstable waves in southern hemisphere to the underlying climate. *Advances in Meteorology*. 2013.

**Солдатенко Сергей Анатольевич** — д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории прикладной информатики и проблем информатизации общества, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: математическое моделирование геофизических процессов, усвоение информации, оценка и моделирование рисков. Число научных публикаций — 150. soldatenko@ias.spb.su; 199178, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург; р.т. +7(812)328-3411.

**Soldatenko Sergei Anatolievich** — Dr. Sci., professor, principal scientist of laboratory of applied informatics and society informatization problems, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: mathematical modeling of geophysical processes, data assimilation, risk assessment and modeling. The number of publications — 150. soldatenko@ias.spb.su; 39, 14-th Line, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-3411.

**Юсупов Рафаэль Мидхатович** — д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), президент, НП Национальное общество имитационного моделирования («НОИМ»). Область научных интересов: теория управления, информатика, теоретические основы информатизации и информационного общества, информационная безопасность. Число научных публикаций — 390. spiiran@ias.spb.su; 199178, 14-я линия В.О., д. 39, г. Санкт-Петербург; р.т. +7(812)328-3337.

**Yusupov Rafael Midhatovich** — Dr. Sci., professor, Corr. Member of RAS, director, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), president of NP National Simulation Society (“NSS”). Research interests: control theory, informatics, theoretic basics of informatization and information society, information security. The number of publications — 390. spiiran@ias.spb.su; ru; 39, 14-th Line, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)328-3311.

## РЕФЕРАТ

**Солдатенко С.А., Юсупов Р.М. О выборе управляющих параметров при моделировании целенаправленной модификации погодноклиматических процессов.**

Изменения глобального климата, наблюдаемые в настоящее время на нашей планете, стимулируют разработку методов «сдерживания» этих изменений. В рамках научно-технического направления, известного как геоинженерия, предложено достаточно большое число технологий и способов, с помощью которых вполне возможно значительно уменьшить интенсивность глобального потепления. По сути, основная задача геоинженерии – это управление земной климатической системой. Однако данная задача до сих пор рассматривается вне рамок теории управления. В то же время с позиций кибернетики представляется вполне возможным построить единую методологию планирования и осуществления геоинженерных проектов и проектов по модификации гидрометеорологических процессов. В рамках данного подхода климатическая система представляет собой объект управления, а роль управляющей подсистемы отводится соответствующим общественным структурам и, в частности, специально подготовленным и наделенным необходимыми полномочиями операторам, в распоряжении которых находятся все необходимые силы и средства.

Разработка физически обоснованных методов управления климатом может быть сведена к задаче исследования чувствительности математических моделей климата к вариациям параметров, рассматриваемых в качестве управлений. Инструментом решения этого класса задач служит теория динамических систем и теория чувствительности систем управления. Методы теории чувствительности позволяют получить количественные оценки отклика климатической системы на управляющие воздействия. Придавая некоторым компонентам вектора параметров модели климата смысл управлений, мы получаем формальную возможность исследовать поведение климатической системы под влиянием управляющих воздействий и, таким образом, сделать заключение о физической обоснованности рассматриваемого метода управления. В статье рассмотрено приложение теории чувствительности для исследования отклика математических моделей бароклининой неустойчивости атмосферных потоков к вариациям управляющих параметров. Информация, получаемая на основе рассчитанных коэффициентов чувствительности, является очень полезной с точки зрения оценки физической обоснованности методов управления крупномасштабными волновыми процессами в атмосфере и построения оптимальных систем управления погодноклиматическими процессами.

## SUMMARY

### *Soldatenko S.A., Yusupov R.M. Toward the Selection of Control Parameters in Models of the Purposeful Weather and Climate Modification.*

Observed climate change induces the development of methods to restrain it. Within the framework of the research area, known as geoengineering, a large number of techniques has been proposed to reduce significantly the intensity of global warming. In fact, the main objective of geoengineering is the control of the earth's climate system. However, geoengineering is still examined outside of the control theory framework. Meanwhile, a unified methodology for planning and implementation of geoengineering projects and weather modification can be developed on the basis of cybernetics. Under this approach, the climate system represents a control object, and the role of controller is given to the appropriate social structures and, in particular, specially trained operators.

The development of physically feasible methods for climate control can be reduced to the study of climate model sensitivity with respect to parameters taken as controls. The theory of dynamical systems and the theory of sensitivity of control systems represent a main instrument to solve this class of problems. Methods of the sensitivity theory allow us to obtain quantitative estimates of the climate system response to controls. Let some model parameters be considered as controls, and then we formally can study the behavior of the climate system under the influence of control actions and draw a conclusion about physical feasibility of the control method.

In the paper, as an example, the application of the sensitivity theory is discussed to study the response of mathematical models of atmospheric baroclinic instability to variations in control parameters. The information obtained via calculated sensitivity coefficients is very beneficial for assessing the physical feasibility of methods for controlling the large-scale wave dynamics in the atmosphere, as well as for designing optimal control systems for climatic processes.

Ю.А. КОТОВ  
**ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ БУКВЕННЫХ  
БИГРАММ В РУССКОЯЗЫЧНОМ ТЕКСТЕ**

---

*Котов Ю.А. Детерминированная идентификация буквенных биграмм в русскоязычном тексте.*

**Аннотация.** В статье рассмотрена задача идентификации символов текстов на естественном языке по числовым характеристикам этих текстов. На основе правил языка и частот биграмм предложено решение данной задачи для русских текстов. Решение представляет собой систему идентифицирующих функций для каждого символа алфавита и детерминированную последовательность их применения. Указаны ограничения для полученного решения, область его эффективного применения и возможности расширения.

**Ключевые слова:** идентификация, символ, биграмма, русский язык, простая замена.

*Kotov Yu.A. Determinate Identification of Russian Text Letter Bigrams.*

**Abstract.** A problem of symbols identification of natural language texts on numerical characteristics of these texts is considered. The proposed solution for the Russian texts is based on the language rules and bigram frequency. The solution is a system of identifying functions for each character of the alphabet and a deterministic sequence of their application. The limitations, efficiency and extension options of the proposed solution are shown.

**Keywords:** identification; character; bigram; the Russian language; one-to-one substitution.

---

**1. Введение.** Как известно, алфавит любого языка представляет собой множество упорядоченных кодов символов, обозначающих буквы этого языка. Буквы языка однозначно связаны с их порядковым номером в исходном алфавите, но могут быть представлены разными — в том числе неизвестными — знаками, и в то же время одинаковые знаки в разных текстах могут обозначать одну и ту же, но, возможно, неизвестную букву. Далее под символом будем понимать букву языка, код (значение) которой в исходном алфавите нам может быть заранее неизвестен.

Идентифицировать символ в произвольном тексте на некотором языке — значит приписать ему такие числовые характеристики, получаемые из данного текста, которые позволяют определить номер символа в исходном алфавите этого языка и, соответственно, букву, которую данный символ представляет. Такая задача имеет не единственное решение, а его специфическая сложность заключается в том, что каждый текст обладает собственным упорядоченным множеством используемых в нем символов.

В общем случае текст может быть представлен не только в исходной, но и в произвольной, в том числе неизвестной, кодировке символов алфавита. Поэтому традиционно задача идентификации симво-

лов таких текстов трактуется как криптографическая, связанная с шифром простой замены [1-8]. Этот шифр не считается криптографически стойким, и специальных методов криптоанализа для него нет. В [1-8] указаны возможные подходы к решению данной задачи, основанные на методах:

- 1) перебора;
- 2) частотного упорядочивания;
- 3) вычисления энтропии;
- 4) марковских цепей;
- 5) статистической проверки гипотез;
- 6) генетических алгоритмов.

Метод перебора является универсальным методом решения дискретных задач. Однако, помимо известной комбинаторной сложности, для его практического применения необходимы начальные данные в виде образцов открытого текста [2], либо известных частотных характеристик [1].

Методами частотного упорядочивания будем называть методы вскрытия шифра простой замены путем прямого сопоставления частотных характеристик появления фиксированного символа или сочетания символов с эталонными частотами букв или их сочетаний [3]. Для успешного применения данных методов требуется значительный объем текста [3], и в основном они используются для получения некоторого начального приближения. Чаще всего используется частотное упорядочивание букв [1, 3-5], в [4] применяется частотное упорядочение буквенных биграмм — но для вскрытия шифра перестановки, а не замены.

Генетические алгоритмы, применяемые при вскрытии шифров, используют частотное упорядочивание для организации направленного ограниченного поиска решения — «ключа», например [6]. Они объединяют методы перебора и частотного упорядочивания в целях сокращения числа возможных переборов в пространстве поиска. Для вскрытия шифра простой замены предложен генетический алгоритм [7], использующий частотные распределения буквенных биграмм и триграмм. В основе [7] лежит сравнение формы частотного распределения элементов текста — эталонного и обрабатываемого, выделения и объединения совпадающих фрагментов таких распределений. Как и другие алгоритмы сравнения формы, [7] в значительной степени зависит от эталона, объема анализируемого текста, совпадающих и пропущенных значений; как метод перебора — от формального условия останова, и дополнительно — от значительного числа неформальных факторов (подбора фитнес-функции, кроссовера, мутаций и т.д.),

влияющих на его эффективность. Основное значение [7] — в демонстрации применения подхода (6) к решению задачи простой замены.

Формальные методы анализа текста (3-5) используют вероятностную модель текста [4-5] и связаны с методами прикладного статистического анализа. В [1] и [5] приведены примеры подходов к решению задачи простой замены на основе методов (3) и (5). Рассмотрение этих примеров показывает сложность соответствующего анализа текстов даже при наличии существенных допущений и ограничений. Известные практические алгоритмы для решения задачи простой замены основаны на методе (4), например [8]. Но они предназначены для вскрытия более сложных шифров, чем простая замена, то есть обладают избыточной алгоритмической и вычислительной сложностью относительно данной задачи.

Ни один из двух существующих алгоритмов [7-8] и трех описанных подходов [1-3,5] не дает удовлетворительного решения рассматриваемой задачи. При этом основной характеристикой так называемой «рабочей функции» [1] должна быть ее вычислительная простота, а числовые характеристики текста в различных кодировках (при простой замене символов алфавита) сохраняются [1]. Следовательно, решение задачи числовой идентификации символов языка по тексту является инвариантным относительно любых кодировок алфавита языка. Другими словами, такое решение позволяет приводить множество текстов на данном языке, но использующих различные кодировки символов алфавита, к одной исходной кодировке букв языка. Постулируем следующий подход к решению рассматриваемой задачи.

В первую очередь необходимо определить идентифицирующие числовые свойства символов для произвольного текста заданного языка. Например, для выделения символов (О, Е, А, И) из множества всех символов текста можно определить для них свойство: «разность сумм значений определенных биграмм меньше нуля», или другое свойство: «суммарное количество биграмм больше, чем у других символов», или то и другое вместе, и т.д.

Числовые свойства, идентифицирующие некоторый символ, для конкретного естественного языка могут быть выделены в результате прямого анализа (на основе правил языка) известных данных о частотных характеристиках текстов этого языка, например [5,10]. Далее будем называть такие данные образцами или эталонами.

Тогда, в отличие от вероятностной модели, текст может рассматриваться как закономерная последовательность упорядоченных по правилам языка символов его алфавита, а эталоны частотных характеристик текстов — как числовая аппроксимация этих закономерностей. Такой подход позволяет не только выделить множество идентифици-

рующих числовых признаков для каждого символа языка, но и частично решить проблему индивидуального упорядочения символов для каждого текста, так как сама идентификация проходит в фиксированной системе координат идентифицирующих признаков.

На втором шаге для множества идентифицирующих признаков каждого символа необходимо определить идентифицирующую функцию, формализующую некоторое свойство, отделяющее данный символ от множества других символов текста.

Качество полученного решения определяется его безошибочностью и инвариантностью относительно содержания и объема текстов и должно оцениваться экспериментально.

**2. Определения и обозначения.** Рассмотрим решение задачи идентификации символов русского текста на основе частот встречаемости пар символов — буквенных биграмм [5,10] и предложенного выше подхода. Идентификацию биграмм и символов текста будем понимать как один процесс, так как для идентификации символов нам требуется выделить определенные биграммы, а уже идентифицированные символы в свою очередь идентифицируют соответствующие им биграммы.

Над таблицей биграмм  $\mathbf{B}$ , полученной для некоторого текста  $t$ , сформируем поле идентифицирующих признаков  $\mathbf{W}(\mathbf{B})$ . На  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{W}(\mathbf{B})$  определим множество функций, имеющих экстремум при соответствии идентифицируемого символа эталонному. Значения признаков в поле  $\mathbf{W}(\mathbf{B})$  зависят не только от значений исходных биграмм, но и от их взаимного расположения. С учетом этого определим фиксированную последовательность применения идентифицирующих функций — вектор  $\mathbf{F}$ , переупорядочения  $\mathbf{B}$  и пересчета  $\mathbf{W}(\mathbf{B})$ , которые образуют алгоритм детерминированной последовательной идентификации символов текста  $t$ .

В соответствии с данным алгоритмом применение функций осуществляется в порядке их определения. Идентификация отдельного символа проводится однократно, т.е. множество не идентифицированных символов последовательно сокращается на один элемент после каждого применения идентифицирующей функции. Ранее идентифицированные символы в явном виде могут использоваться при идентификации последующих символов. При существовании одинаковых экстремумов для идентифицирующих функций выбирается только один из них, как правило, первый по порядку.

По завершении выделения или идентификации некоторой последовательной группы символов из  $\mathbf{F}$  выполняется переупорядочение таблицы биграмм  $\mathbf{B}$  в соответствии с эталоном, и затем пересчет поля признаков  $\mathbf{W}(\mathbf{B})$ .

Основой для определения множеств **W** и **F** и последовательности идентификации послужили правила русского языка и таблицы биграмм [5,10]. Идентифицирующие функции **F** фактически являются алгебраической интерпретацией логических функций, что позволяет распространить логическую меру сравнения на некоторую область колебаний значений идентифицирующих признаков и упорядоченности символов текстов. Вероятностная мера и ее статистические аналоги в системе **F** не применяются. В силу этого рассматриваемая в данной работе идентификация не является статистической, и соответствующая терминология [9] не используется.

Входной информацией для алгоритма идентификации является таблица биграмм **B** некоторого текста *t* без учета пробела. Считается, что текст *t* представляет собой обычный, цельный и связный последовательный русский текст, в котором используются все символы (без учета пробела) русского алфавита или любая их простая замена.

Нижняя граница по объему входного текста в таком случае может составить примерно 200 символов (без учета пробелов), но более вероятно: 1000-1200 символов. На верхнюю границу устанавливается ограничение в 10000 символов (также без учета пробелов).

При превышении текстом верхней границы из него может быть выделен любым образом (в том числе и случайным) последовательный фрагмент, отвечающий ограничениям, либо проведена его нормировка или логарифмирование системы функций **F**.

Считается, что русский алфавит содержит 31 символ («Ь» — «Ъ, Ъ», «Е» — «Е, Ё»). Вводится эталонная упорядоченность символов **Z** = (О, Е, А, И, Н, Т, С, В, Р, Л, П, К, Д, М, З, Г, Б, Ч, Х, Ш, Ж, Ц, Щ, Ф, У, Я, Ю, Э, Ё, Ы, Ь). Номер символа в данной последовательности является его идентификатором.

Перед началом идентификации входная таблица биграмм **B** симметрично упорядочивается по частоте появления символов в тексте. Из **B** выделяются в отдельный вектор **D** диагональные значения, а в **B** они обнуляются. Осуществляется первоначальный расчет значений множества признаков **W(B)**. Они вычисляются для каждого символа  $i \in \mathbf{B}$  и обозначаются следующим образом:

$$q_{1,i}^L = \sum_{j=1}^{31} b_j^L, \quad b_j^L = b_{i,j}, \text{ если } L = C, \quad b_j^L = b_{j,i}, \text{ если } L = T; \quad b_{i,j} \in \mathbf{B}$$

$$q_{2,i}^L = \sum_{j=1}^{31} 1(\text{если } b_j^L > 0) \quad q_{3,i}^L = \sum_{j=1}^4 1(b_j^L > 0) \quad q_{4,i}^L = \sum_{j=5}^{14} 1(b_j^L > 0)$$

$$q_{5,i}^L = \max(b_j^L), \quad i, j = \overline{1,4} \quad q_{6,i}^L = \max(b_j^L), \quad i, j = \overline{5,14}$$

$$q_{7,i}^L - \max(b_j^L), \quad i, j = \overline{1,31}$$

$$r_{1,i}^L = \sum_{j=1}^4 b_j^L \quad r_{2,i}^L = \sum_{j=5}^{14} b_j^L \quad r_{3,i}^L = r_{1,i}^L - \sum_{j=5}^7 b_j^L$$

$$r_{4,i}^L = 2 \cdot r_{1,i}^L - q_{1,i}^L \quad r_{5,i}^L = 2 \times (r_{1,i}^L + \sum_{j=5}^7 b_j^L) - q_{1,i}^L.$$

Признаки  $q_{1,i}^L, q_{7,i}^L, r_{1,i}^L - r_{5,i}^L$  образуют векторы  $\mathbf{V}_i^C, \mathbf{V}_i^T$ :  
 $\mathbf{V}_i^C = \mathbf{Q}_i^C \|\mathbf{R}_i^C$  и  $\mathbf{V}_i^T = \mathbf{Q}_i^T \|\mathbf{R}_i^T$ , где  $\mathbf{Q} \|\mathbf{R}$  — конкатенация  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}$ .

Следующие признаки являются общими для символа  $i$ :

$$u_{1,i} = q_{2,i}^C + q_{2,i}^T \quad u_{2,i} = q_{2,i}^C - q_{2,i}^T \quad u_{3,i} = r_{2,i}^C + r_{2,i}^T$$

$$u_{4,i} = \sum_{j=5}^{16} b_{i,j} - \sum_{j=5}^{16} b_{j,i}$$

$$u_{5,i} = r_{1,i}^C - r_{1,i}^T \quad d_i = b_{i,i}.$$

За исключением  $d_i$ , они образуют вектор  $\mathbf{U}_i$ . При переупорядочении  $\mathbf{B}$  поле векторов  $\mathbf{W}(\mathbf{B}) = \langle \mathbf{V}^C, \mathbf{V}^T, \mathbf{U} \rangle$  не переупорядочивается, а только пересчитывается по завершении перестановки.

Вектор диагональных элементов  $\mathbf{D}$  является структурным расширением  $\mathbf{B}$  и всегда переупорядочивается одновременно с ней.

При описании идентифицирующих функций используются следующие обозначения:

$$S = \max_G \{ f_s(\mathbf{X}_i^S) \} - \text{определение идентифицирующей функции } S,$$

$$S \in \mathbf{Z}, \quad \mathbf{X}_i^S \in \mathbf{B} \cup \mathbf{D} \cup \mathbf{W}(\mathbf{B}), \quad i \in G, G = \overline{m, n}.$$

Значением  $S$  является значение индекса  $i=k$ , при котором  $f_s(\mathbf{X}_i^S)$  достигает максимума (или минимума, если определено «min») на множестве идентифицируемых символов  $G$  текущей таблицы биграмм:  $i \in G, G = \overline{m, n}$ .

До идентификации  $i=0$ , после нее устанавливается однозначное соответствие между идентифицированным символом  $k$  и идентификатором символа  $S$ .

Использование функции  $S$  может осуществляться только после ее определения как указанием биграмм ранее идентифицированного символа  $S$ , связывающих его (по строке или столбцу) с текущим сим-

волом  $i: S_i^C$  или  $S_i^T$ , так и указанием значения идентификатора  $i=S$  для признака из  $\mathbf{W}(\mathbf{B})$ .

Все вычисления  $f_S(\mathbf{X}_i^S)$  выполняются на множестве действительных чисел.

**3. Система идентифицирующих функций.** Определение идентифицирующих функций (1.1)-(7.10) и их нумерация, а также последовательность применения следуют вектору  $\mathbf{F}$ :

$$\mathbf{F} = ((O, E, A, И)_1, (Й, Ы, Ь)_2, (Т, С, Н, Р, У, Я, Ю, Э)_3, (Л, П, В)_4, \\ (O, E, A, И)_5, (К, Д, М)_6, (З, Б, Ч, Х, Ж, Щ, Ц, Ш, Г, Ф)_7),$$

где каждой группе соответствует свой вектор  $\mathbf{F}_j, j = \overline{1, 7}$ .

Перед началом идентификации значение идентифицирующих функций, кроме (6.3), устанавливается равным нулю для всех не идентифицированных символов. Начальное значение для функции (6.3) равно 1000.

По завершении идентификации (выделения) каждой группы символов из  $\mathbf{F}$  производится переупорядочение  $\mathbf{B}$  в соответствии с  $\mathbf{Z}$  и пересчет  $\mathbf{W}(\mathbf{B})$ . При любом переупорядочивании  $\mathbf{B}$  идентифицированные символы упорядочиваются в соответствии с эталоном, не идентифицированные символы сохраняют первоначальное взаимное упорядочение по частоте.

Для выборки не идентифицированных символов из текущей таблицы  $\mathbf{B}$  используются следующие последовательные поля таблицы.

$$G_1 = \overline{1, 4} \quad G_2 = \overline{5, 31} \quad G_3 = \overline{5, 14} \quad G_4 = \overline{12, 31} \quad G_5 = \overline{15, 31} \quad G_6 = \overline{31, 5}$$

Если все функции группы используют одно и то же поле  $G$ , то оно указывается только в заголовке группы.

Выделение групп  $\mathbf{F}_j, j = \overline{1, 7}$  имеет не случайный характер. Каждую группу образуют символы, имеющие некоторые общие свойства. Например, в  $\mathbf{F}_1$  входят наиболее часто встречающиеся гласные языка, проявляющие его слоговую структуру и представляющие примерно 35% объема текста и 40% биграмм, в  $\mathbf{F}_2$  — символы  $(Й, Ы, Ь)$ , два последних из которых никогда (для «Ы» — практически никогда) не встречаются после гласных, а первый — «Й» — после согласных букв. Группу  $\mathbf{F}_3$  образуют наиболее часто встречающиеся согласные и остальные гласные, которые вместе с группами  $\mathbf{F}_1$  и  $\mathbf{F}_2$  охватывают уже 70% объема и 82% биграмм текста.

В группу  $\mathbf{F}_4$  включены согласные  $(Л, П, В)$ , имеющие следующие особенности. Символ «Л» устойчиво образует биграмму «ЛЬ» с ранее идентифицированным символом «Б»; символ «П» имеет ярко выраженную асимметрию по числу биграмм в сторону начала слов и

биграмм «ПР» (эффект частого использования приставок, начинающихся с «П»); символ «В» часто встречается в сочетаниях с ранее идентифицированными символами ( $T, C$ ).

Группы  $F_5$  и  $F_6$  образуют символы, начинающие ( $O, E, A, И$ ) и завершающие ( $K, Д, М$ ) первую половину наиболее часто используемых символов языка. В силу этого они обладают наиболее средними (во всех смыслах) характеристиками, и для их идентификации требуются многие ранее идентифицированные символы. Особенно сложно идентифицируются символы ( $K, Д, М$ ) — группа функций  $F_6$ , с привлечением большого числа ранее идентифицированных символов. И ранее сделанные ошибки идентификации могут накапливаться в этой группе.

Последнюю группу  $F_7$  образуют относительно редко встречающиеся согласные, имеющие в основном индивидуальные особенности.

*F1. Выделение символов «О, Е, А, И».* Из первых 10 символов  $B$  выделяются четыре символа (вектор  $S4$ ) по первым четырем наибольшим значениям признака  $u_{1,i}$ , если для них  $r_{5,i}^C < 0$  или  $r_{5,i}^T < 0$ . При переупорядочении выделенные символы переносятся в начало  $B$ . Взаимное расположение этих символов сохраняется.

$$S4 = \max \{ u_{1,i} (\text{если } r_{5,i}^C < 0 \vee r_{5,i}^T < 0) \}. \quad (1.1)$$

*F2. Идентификация символов «Й, Ы, Ь» на множестве G2.*

$$Й = \max \left\{ \text{если } u_{2,i} > 0 \text{ то } - \frac{u_{2,i} \times u_{5,i}}{q_{1,i}^C \times u_{1,i}} \right\}. \quad (2.1)$$

Затем выбираются первые два не идентифицированных элемента  $B$ , для которых  $r_{1,i}^C = 0$ .

$$B = \max \left\{ \frac{q_{7,i}^T}{(q_{5,i}^C + 1) \times (q_{2,i}^T + 1)^2} \right\} \text{ из выбранных двух элементов,} \quad (2.2)$$

$$B1 = \text{оставшийся символ.} \quad (2.3)$$

*F3. Идентификация символов «Т, С, Н, Р, У, Я, Ю, Э».* Из  $B$ , начиная с пятого диагонального элемента, выделяется подматрица  $SB$   $15 \times 15$ . Формируется матрица  $DB = SB + SB^T$ , где  $SB^T$  — транспонированная  $SB$ . Для симметричной матрицы  $DB$  определяется первый элемент, для которого:

$$CT = \max \left\{ db_{i,j} \times (r_{2,j}^C - q_{6,i}^C + 1) \right\}, \quad db_{i,j} \in DB, \quad i, j = 1 \dots 15$$

$$C = \text{первый индекс большего слагаемого выбранной суммы} \quad db_{CT} \quad (3.1)$$

$$T = \text{первый индекс меньшего слагаемого выбранной суммы} \quad db_{CT} \quad (3.2)$$

$$H = \max_{G2} \{ (q_{1,i}^C - u_{3,i} - B_i^T + d_i) \times u_{1,i} \} \quad (3.3)$$

$$P = \min_{G3} \{ \text{если } PP_i < 0 \text{ то } PP_i \times \text{abs}(PP_i) \times PPP_i \\ \text{иначе если } PP_i = 0 \text{ то } - (C_i^T + 1)^2 \times PPP_i \text{ иначе } 0 \}, \quad (3.4)$$

$$\text{где } PP_i = u_{4,i} + B_i^T, \quad PPP_i = q_{4,i}^C \times q_{4,i}^T \times r_{4,i}^C$$

$$Y = \max_{G2} \{ \text{если } r_{4,i}^C < 0 \wedge r_{4,i}^T < 0 \wedge (B_i^T + B_i^T) = 0 \wedge \\ \wedge (r_{3,i}^C \leq 0 \vee r_{3,i}^T \leq 0) \text{ то } (P_i^C + 1) \times q_{2,i}^T \} \quad (3.5)$$

$$Я = \max_{G2} \{ \text{если } q_{1,i}^C \neq 0 \wedge r_{4,i}^C < 0 \wedge (B_i^T + B_i^T) = 0 \wedge r_{1,i}^C > 0 \\ \text{то } \frac{\text{abs}(r_{4,i}^C) \times (T_i^T + 1) \times (C_i^C + 1) \times q_{2,i}^C}{q_{1,i}^C} \}. \quad (3.6)$$

Идентификация символов «Ю» и «Э» проводится по столбцу идентифицированного символа «Т». Выделяются два символа S1 и S2.

$$S1 = \max_{G4} \{ \text{если } q_{1,i}^C \neq 0 \wedge r_{4,i}^C < 0 \wedge (B_i^T + B_i^T) = 0 \text{ то } ЮЭ_i \} \quad (3.7)$$

$$S2 = \max_{G4} \{ \text{если } q_{1,i}^C \neq 0 \text{ то } \frac{ЮЭ_i}{(r_{1,i}^C + 1) \times q_{1,i}^C \times q_{2,i}^C} \} \quad (3.8)$$

$$\text{где } ЮЭ_i = \frac{h_i \times \text{abs}(r_{4,i}^C)}{B_i^C + 1}, \quad h_i = \text{если } r_{1,i}^C = 0, \text{ то } T_i^T + 1 \text{ иначе } T_i^T.$$

Если  $r_{1,S1}^C > r_{1,S2}^C$ , то  $\{ M_3 = 2, M_4 = 1 \}$  иначе,

если  $r_{1,S1}^C < r_{1,S2}^C$ , то  $\{ M_3 = 1, M_4 = 2 \}$

иначе  $\{ M_3 = \max\{b_{S1,j}\}, M_4 = \max\{b_{S2,j}\} \}$ ,  $b_{S1,j}, b_{S2,j} \in B$ ,  $j = \overline{14, 31}$ ,

Если  $M_3 \geq M_4$ , то  $Ю = S1$ ,  $Э = S2$  иначе  $Ю = S2$ ,  $Э = S1$ .

#### F4. Идентификация символов «Л, П, В».

$$Л = \max_{G6} \{ B_i^T \} \quad (4.1)$$

$$П = \max_{G2} \{ \text{если } u_{2,i} < 0 \wedge (r_{1,i}^C - q_{5,i}^C) \neq 0 \text{ то} \\ \frac{(P_i^T + 1) \times (T_i^C + C_i^C + 1) \times q_{6,i}^C \times (q_{5,i}^C \cdot q_{3,i}^C - r_{1,i}^C)}{(q_{3,i}^C - 1)^2} \} \quad (4.2)$$

$$B = \max_{G3} \{ (T_i^C + C_i^C + C_i^T + 1) \times q_{5,i}^T \}. \quad (4.3)$$

F5. Идентификация символов «О, Е, А, И» на множестве G1.

$$O = \max \{ B_i^T \} \quad (5.1)$$

$$I = \max \{ (H_i^C - \Pi_i^C) \times q_{2,i}^T \} \quad (5.2)$$

$$E = \max \{ \text{если } EE_i > 0, \text{ то } EE_i, \\ \text{иначе если } P_i^C < P_i^T, \text{ то } (H_i^T - H_i^C + C_i^C) \times h_i \\ \text{иначе если } H_i^C < H_i^T, \text{ то } (P_i^T - P_i^C + C_i^C) \times h_i \\ \text{иначе } (C_i^C + 1) \times h_i \}, \quad (5.3)$$

$$\text{где } EE_i = (H_i^T + P_i^T + C_i^C - H_i^C - P_i^C) \times h_i, \quad h_i = \frac{q_{2,i}^T}{q_{1,i}^T}$$

$$A = \text{оставшийся символ множества } \{O, E, A, I\}. \quad (5.4)$$

F6. Идентификация символов «К, Д, М» на множестве G4.

$$K = \max \{ \text{если } O_i^T - E_i^T > 0, \text{ то} \\ \frac{(P_i^T + 1) \times (C_i^C + 1) \times (T_i^T + 1) \times (O_i^T - E_i^T)^2 \times q_{3,i}^C \times u_{1,i}}{(B_i^T + 1) \times q_{1,i}^C} \} \quad (6.1)$$

$$D = \max \{ D3_i \times q_{3,i}^C \times q_{2,i}^T \times q_{2,i}^C \},$$

$$\text{где } D3_i = \text{если } B_i^C \leq 0, \text{ то } \frac{D1_i \times D2_i \times (2 \cdot H_i^T + 1)}{h + 1} \\ \text{иначе } \frac{D1_i \times D2_i \times (2 \cdot H_i^T + 1) \times (J_i^T + 1)}{(B_i^C + 1) \times (B_i^T + 1) \times (K_i^T + 1)}, \quad h = \frac{q_{1,B_i}^T}{q_{2,B_i}^T} \quad (6.2)$$

$$D1_i = \text{если } O_i^C + Y_i^C - I_i^C > 0 \text{ то } q_{5,i}^T - I_i^C + 1 \text{ иначе } 1,$$

$$D2_i = \text{если } E_i^T + Y_i^T - I_i^T > 0, \text{ то}$$

$$(q_{6,i}^C + 1) \times (Y_i^T + 1) \times (E_i^T + A_i^T - I_i^T + 1) \text{ иначе } E_i^T + A_i^T + 1$$

$$M = \min \{ \text{если } q_{3,i}^C = 0, \text{ то } 1000 \text{ иначе } \frac{h_i}{u_{1,i} \times q_{3,i}^C \times q_{3,i}^T} \}, \quad (6.3)$$

$$\text{где } h_i = \text{если } r_{1,i}^C = 0, \text{ то } 1000 \text{ иначе } 1 + \frac{4 \cdot q_{5,i}^C - r_{1,i}^C}{r_{1,i}^C}.$$

7.7. Идентификация символов «З, Б, Ч, Х, Ж, Щ, Ц, Ш, Г, Ф» на множестве **G5**.

$$З = \max \left\{ \frac{A_i^C \times A_i^T \times A_i^T \times (q_{3,i}^T + 1) \times q_{2,i}^T}{(B_i^C + 1) \times (T_i^T + 1)^2} \right\}; \quad (7.1)$$

$$Б = \max \left\{ \frac{(h_i + 1) \times B_{2,i} \times (q_{5,i}^C + O_i^C + 1) \times q_{2,i}^C \times q_{2,i}^T}{A_i^T + 1} \right\};$$

где  $B_{2,i}$  = если  $B_i^C = 0 \wedge B_i^T = 0 \wedge B_i^C = 0 \wedge B_i^T = 0$ , то

$$\text{если } N=1, \text{ то } \frac{Y_i^C + 1}{(P_i^T + 1) \times (H_i^T + 1)}, \text{ иначе } \frac{Y_i^C + 1}{P_i^T + 1}, \quad (7.2)$$

иначе если  $N=1$  то  $([B_i^T]^2 + 1) \times ([B_i^T]^2 + 1) \times ([B_i^T]^3 + 1)$ ,  
иначе  $([B_i^T]^2 + 1) \times ([B_i^T]^2 + 1)$ .

$h_i$  — максимальная биграмма среди последних 10-ти (кроме «Й, Ы, Ь») биграмм строки текущего элемента,

$N$  — количество ненулевых биграмм по столбцу символа «Ы» в диапазоне от 15 символа до конца, за исключением «Й, Ы, Ь».

$$Ч = \max \left\{ \frac{(E_i^T + A_i^T + 1)^2 \times (T_i^T + 1)^3 \times q_{2,i}^C \times q_{2,i}^T}{(H_i^C + 1) \times (D_i^C + 1) \times (O_i^T + H_i^C + D_i^T + 1)} \right\}; \quad (7.3)$$

$$Х = \max \left\{ \frac{(O_i^T + 1) \times (H_i^C + 1) \times (B_i^C + 1) \times q_{2,i}^T}{q_{1,i}^C} \right\}; \quad (7.4)$$

$$Ж = \max \left\{ \frac{(O_i^C + 1) \times (E_i^T + A_i^T + 1) \times (H_i^T + Y_i^C + 1) \times q_{2,i}^C}{([O_i^T]^2 + 1) \times (abs(q_{2,i}^C - q_{2,i}^T) + 1) \times ([IO_i^C]^3 + 1) \times (B_i^C + 1) \times q_{1,i}^C} \right\}; \quad (7.5)$$

$$Щ = \max \left\{ \text{если } q_{2,i}^C = 1 \wedge CB_i = 1, \text{ то } 0, \text{ иначе } \frac{(E_i^T + I_i^T + 1) \times (CB_i + 1)^2}{u_{1,i} \times q_{2,i}^T \times q_{1,i}^C} \right\}, \quad (7.6)$$

где  $CB_i = (Y_i^C + 1) \times (Я_i^C + 1) \times (IO_i^C + 1) \times (B_i^C + 1)$ .

$Ц = \max \left\{ \text{если } q_{2,i}^C = 1 \wedge H_i^C = 0, \text{ то} \right.$

$$\left. \text{если } q_{1,i}^C = 1, \text{ то } 0, \text{ иначе } \frac{1}{(q_{1,i}^C)^3}, \text{ иначе } \frac{(E_i^T + [I_i^T]^3 + 1) \times (H_i^C + 1)}{(O_i^T + 1) \times q_{2,i}^C \times (q_{1,i}^C)^2} \right\} \quad (7.7)$$

$$\begin{aligned} \Pi = \max \{ \text{если } q_{2,i}^C \neq 1 \wedge q_{2,i}^T \neq 1, \\ \text{то } \frac{(E_i^T + H_i^T + Y_i^C + \mathcal{A}_i^C + I O_i^C + B I_i^C + 1)}{(O_i^T + 1) \times (H_i^C + 1) \times (B I_i^T + 1) \times (Y_i^C + 1) \times (I O_i^C + 1) \times q_{1,i}^C} \}; \end{aligned} \quad (7.8)$$

$$\Gamma = \max \left\{ \frac{([O_i^T]^2 + 1) \times (M_i^T + 1) \times q_{2,i}^T \times r_{1,i}^T}{(r_{1,i}^C - O_i^T + B I_i^T + 1) \times q_{1,i}^C} \right\}; \quad (7.9)$$

$$\Phi = \text{оставшийся символ.} \quad (7.10)$$

**4. Экспериментальная проверка.** Экспериментальная проверка предложенной системы идентификации (1.1-7.10) была проведена на текстах двух типов: тип 1 — научно-популярные и художественные тексты; тип 2 — тексты учебных пособий для вузов. Для каждого типа были случайным образом выбраны тексты различных авторов и жанров, для типа 2 — тексты из различных областей знаний: математика, информатика, материаловедение, химия, экономика, юриспруденция и т.д. Всего в вычислительном эксперименте участвовало 200 текстов, по 100 текстов каждого типа.

Из этих текстов случайным образом были выбраны последовательные фрагменты различной длины (здесь и далее длина фрагментов определяется без учета пробелов). Они распределены по двум группам (для каждого типа): группа 1 — фрагменты длиной от 200 до 2000 символов, с шагом 200; группа 2 — фрагменты от 2000 до 10000 символов, с шагом 2000. Всего 2194 фрагмента, тип 1 — 1065 (группа 1 — 591, группа 2 — 474), тип 2 — 1129 (группа 1 — 641, группа 2 — 488). При этом в каждом из фрагментов использовались все буквы русского алфавита множества **Z**.

В эксперименте определялось три вида ошибок: O1 — ошибка полной идентификации, как количество ошибочных фрагментов, содержащих хотя бы один неправильно идентифицированный символ; O2 — ошибка идентификации символов, как среднее количество неправильно идентифицированных символов в ошибочных фрагментах данной длины; O3 — средний объем ошибочного текста, связанного с неправильно идентифицированными символами. Для ошибок O2 и O3 дополнительно определялись минимальное и максимальное значение и стандартное отклонение.

Результаты эксперимента приведены в таблице 1. В ней столбец *N* содержит значения длин текстов в символах (без учета пробела), *K* — количество текстов; столбцы O1, O2, O3 — абсолютные значения ошибок; столбцы *min*, *max*, *S.D.* — минимальные, максимальные значения и стандартное отклонение соответствующих ошибок. Для наглядного представления о динамике ошибок кусочно-

линейная аппроксимация их нормированного значения представлена на соответствующих графиках рисунок 1.

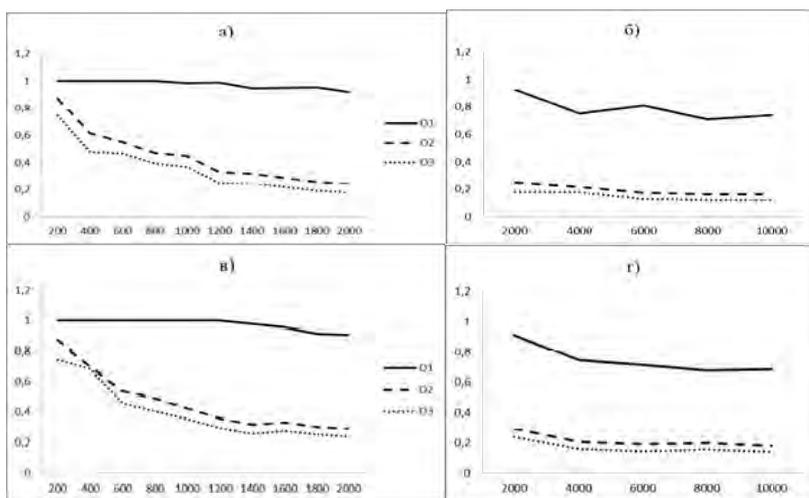


Рис. 1. Графики значений нормированных ошибок O1, O2, O3 текста типа 1: а) группа 1; б) группа 2; текста типа 2: в) группа 1; г) группа 2

Из данных эксперимента можно сделать следующие выводы:

1) в диапазоне длин фрагментов от 1000-1400 до 2000 символов точность полной идентификации меняется от 0.01 до 0.08 для текстов 1-го типа, и от 0.02 до 0.09 для текстов 2-го типа. При этом во всем диапазоне длин фрагментов от 200 до 2000 символов точность идентификации символов изменяется от 0.13 до 0.76 для текстов 1-го типа, и от 0.13 до 0.71 для текстов 2-го типа;

2) в диапазоне длин от 2000 до 10000 символов точность полной идентификации меняется от 0.08 до 0.29 для текстов 1-го типа, и от 0.09 до 0.32 для текстов 2-го типа. Точность идентификации символов изменяется от 0.76 до 0.84 для текстов 1-го типа, и от 0.71 до 0.81 для текстов 2-го типа;

3) стандартное отклонение показывает, что распределение ошибок O2 и O3 смещено в сторону минимальной ошибки;

4) во всех случаях ошибка O3 коррелирует с O2 и заметно ниже нее, что указывает в первую очередь на ошибочную идентификацию символов, имеющих малую частоту появления в тексте.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Ошибка O1			Ошибка O2				Ошибка O3			
<i>N</i>	<i>K</i>	<i>O1</i>	<i>O2</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>S.D.</i>	<i>O3</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>S.D.</i>
Тексты 1-го типа, группа 1										
200	1	1	27.000	27	27	0.00	149.00	149	149	0.00
400	14	14	19.071	14	27	3.75	191.86	97	364	79.39
600	34	34	17.059	8	29	4.01	279.56	90	538	100.26
800	53	53	14.660	4	30	5.85	315.75	21	777	180.34
1000	71	70	13.971	3	30	5.37	369.81	21	974	208.26
1200	79	78	10.321	2	20	4.88	303.54	8	859	213.69
1400	79	75	9.960	2	25	5.47	341.68	10	1049	264.60
1600	83	79	8.975	2	21	5.22	347.95	11	1156	295.06
1800	88	84	8.024	2	20	4.35	348.57	13	1274	289.67
2000	89	82	7.585	2	20	4.62	356.32	14	1423	321.65
Всего:	591									
Тексты 1-го типа, группа 2										
2000	89	82	7.585	2	20	4.62	356.32	14	1423	321.65
4000	93	70	6.657	2	19	6.18	707.69	18	2610	849.12
6000	99	80	5.363	2	18	4.51	755.74	33	3564	868.27
8000	97	69	4.986	2	13	4.32	951.77	37	3187	1070.40
10000	96	71	4.958	2	14	4.21	1195.97	44	5358	1336.44
Всего:	474									
Тексты 2-го типа, группа 1										
200	1	1	27.000	27	27	0.00	149.00	149	149	0.00
400	12	12	21.667	15	28	4.42	273.00	148	347	54.02
600	44	44	16.568	4	27	4.91	277.27	22	539	128.94
800	62	62	15.242	4	25	3.95	323.90	48	629	129.91
1000	77	77	13.143	4	25	4.57	354.30	45	913	200.73
1200	82	82	11.110	2	26	5.11	351.68	9	1040	232.78
1400	87	85	9.788	2	28	5.87	359.08	11	1224	302.60
1600	87	83	10.241	2	27	5.90	438.16	13	1382	340.39
1800	93	85	9.388	2	27	5.64	455.93	14	1553	352.30
2000	96	87	9.011	2	26	6.17	475.29	13	1810	425.39
Всего:	641									
Тексты 2-го типа, группа 2										
2000	96	87	9.011	2	26	6.17	475.29	13	1810	425.39
4000	98	73	6.425	2	18	5.43	650.14	29	2407	711.54
6000	98	70	5.900	2	18	5.36	890.50	16	3146	1027.14
8000	97	66	6.136	2	18	5.69	1250.33	48	5387	1431.87
10000	99	68	5.588	2	18	5.02	1425.07	31	6077	1595.10
Всего:	488									

При углубленном анализе полученных ошибок для 2-й группы текстов 1-го типа выявлено, что ошибки идентификации для различных групп символов различны. Для групп символов (О,Е,А,И), (Н,Т,С,), (В,Р,Л,П), (К,Д,М), (Й,Ы,Ь), (У,Я,Ю,Э), (З,Г,Б,Ч,Х), (Ш,Ж,Ц,Щ,Ф) ошибки идентификации появлялись в 12%, 0.8%, 22%, 32%, 9%, 7%, 63% и 89% всех случаев ошибок идентификации в текстах соответственно. Как видно из этого распределения, в наиболее значимых для идентификации группах символов ошибки встречаются реже. Поэтому даже при наличии ошибок в большинстве случаев после идентификации получается так называемый «читаемый» текст.

**5. Заключение.** Для предложенной системы идентификации (1.1-7.10) экспериментально установлены максимальный коэффициент полной идентификации, равный 0.3, и максимальный коэффициент идентификации символов — 0.82 при объеме анализируемого текста около 10000 символов. Важно отметить медленное нарастание ошибки идентификации символов при уменьшении объема анализируемого текста.

Система имеет потенциал прямого улучшения за счет модификации некоторых функций групп  $F_4$ - $F_6$ . Но вряд ли какие либо модификации функций  $F_7$  позволят улучшить идентификацию символов (З, Г, Б, Ч, Х, Ш, Ж, Ц, Щ, Ф), обладающих большой информационной изменчивостью относительно частотных характеристик биграмм и дающих наибольший процент ошибок идентификации. Точность системы идентификации (1.1-7.10) и диапазон ее применения могут быть расширены применением других методов, в частности, методов прикладного статистического анализа [9].

Первичная актуальность системы (1.1-7.10) заключается в установлении функциональной связи между синтаксическими правилам русского языка и некоторыми частотными характеристиками текстов на этом языке. Прикладная актуальность, по мнению автора, не ограничивается только вскрытием шифров простой замены.

### Литература

1. Шеннон К. Теория связи в секретных системах // Работы по теории информации и кибернетике. М.:ИЛ. 1963. С. 333–369.
2. Бабенко Л.К., Лицкова Е.А. Анализ симметричных криптосистем // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. Вып. 137. № 12. С. 136–147.
3. Минеев М.П., Чубариков В.Н. Лекции по арифметическим вопросам криптографии // М.: Изд-во «Попечительский совет Механико-математического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова». 2010. 186 с.
4. Бабаш А.В., Баранова Е.К. Криптографические методы и средства информационной безопасности // М.:РГСУ. 2010. 65 с.
5. Жданов О.Н., Куденкова И.А. Криптоанализ классических шифров // Красноярск: Изд-во Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М.Ф. Решетнева. 2008. 107 с.

6. *Морозенко В.В., Пleshkova И.Ю.* О применении генетического алгоритма для криптоанализа шифра Тритемия-Белазо-Виженера // Современные проблемы науки и образования: электронный научный журнал. 2014. №2. С. 1–11.
7. *Brownbridge J.* Decrypting Substitution Ciphers with Genetic Algorithms // Department of Computer Science. University of Cape Town. 2007. 12 p.
8. *Chen J., Rosenthal J. S.* Decrypting classical cipher text using Markov Chain Monte Carlo // *Statistics and Computing*. 2011. vol. 22. no. 2. pp. 397–413.
9. *Губарев В.В.* Введение в теоретическую информатику // Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2014. 420 с.
10. *Ляшевская О.Н., Шаров С.А.* Частотный словарь современного русского языка (на материале Национального корпуса русского языка) // М.: Азбуковник. 2009. 923 с.

## References

1. Shannon K. *Raboty po teorii informacii i kibernetike* [Works on the theory of information and cybernetics]. M.: IL. 1963. 832 p. (In Russ.).
2. Babenko L.K., Ishhukova E.A. *Analiz simmetrichnyh kriptosistem* [Analysis of symmetric cryptosystems]. Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki. 2012. vol. 137. no. 12. pp. 136–147. (In Russ.).
3. Mineev M.P., Chubarikov V.N. *Lekcii po arifmeticheskim voprosam kriptografii* [Lectures on arithmetic cryptography]. M.: Izd-vo "Popechitel'skij sovet Mehaniko-matematicheskogo fakul'teta MGU im. M. V. Lomonosova". 2010. 186 p. (In Russ.).
4. Babash A.V., Baranova E.K. *Kriptograficheskie metody i sredstva informacionnoj bezopasnosti* [Cryptographic methods and means of information security]. M.: RGSU, 2010. 65 p. (In Russ.).
5. Zhdanov O.N., Kudenkova I.A. *Kriptoanaliz klassicheskikh shifrov* [Cryptanalysis of classical ciphers]. Krasnojarsk: Izd-vo Sib. gos. ajerokosm. un-ta im. akad. M.F. Reshetneva. 2008. 107 p. (In Russ.).
6. Morozenko V.V., Pleshkova I.Ju. [On the application of a genetic algorithm for cryptanalysis of the cipher Triteria-Belazo-Vigenère]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovanija: jelektronnyj nauchnyj zhurnal – Modern problems of science and education: electronic scientific journal*. 2014. no. 2. pp. 1–11. (In Russ.).
7. Brownbridge J. Decrypting Substitution Ciphers with Genetic Algorithms. Department of Computer Science. University of Cape Town. 2007. 12 p.
8. Chen J., Rosenthal J.S. Decrypting classical cipher text using Markov Chain Monte Carlo. *Statistics and Computing*. 2011. vol. 22. no. 2. pp. 397–413.
9. Gubarev V.V. *Vvedenie v teoreticheskiju informatiku* [Introduction to theoretical informatics]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU. 2014. 420 p. (In Russ.).
10. *Ljashevskaja O.N., Sharov S.A.* Chastotnyj slovar' sovremenno go russkogo jazyka (na material Nacional'nogo korpusa russkogo jazyka) [The frequency word book of modern Russian (on material of the National case of Russian)]. M.: Azbukovnik. 2009. 923 p. (In Russ.).

**Котов Юрий Алексеевич** — доцент кафедры защиты информации факультета автоматизации и вычислительной техники, Новосибирский государственный технический университет (НГТУ). Область научных интересов: информационная и компьютерная безопасность, криптография и криптоанализ, математическое обеспечение вычислительных систем. Число научных публикаций — 21. kotov@corp.nstu.ru; пр. К.Маркса, 20, Новосибирск, 630073; р.т.: +7(383)346-04-92, Факс: +7(383)346-04-92.

**Kotov Yuri Alexeevich** — associate professor of information protection department of faculty of automation and computer engineering, Novosibirsk State Technical University (NSTU). Research interests: information and computer security, cryptography, software technologies and development of information systems. The number of publications — 21. kotov@corp.nstu.ru; 20, pr. K. Marksa, Novosibirsk, 630073; office phone: +7(383)346-04-92, Fax: +7(383)346-04-92.

## РЕФЕРАТ

### *Котов Ю.А.* **Детерминированная идентификация буквенных биграмм в русскоязычном тексте.**

Задача числовой идентификации символов текста на некотором языке имеет не единственное решение. Сложность его заключается в том, что каждый текст имеет собственное упорядочение множества используемых в нем символов, если считать их неизвестными, что по существу эквивалентное простой замене символов относительно исходного алфавита.

С другой стороны, известны правила языка и некоторые совокупные данные по частотным характеристикам текстов на этом языке. Рассматривая текст как закономерную последовательность упорядоченных по правилам языка символов его алфавита, совокупные частотные характеристики — как числовую аппроксимацию этих закономерностей, методом прямого анализа можно получить систему идентифицирующих признаков и функций, позволяющих решить исходную задачу.

В работе предложена такая система для решения задачи идентификации символов русского текста на основе частот встречаемости пар символов — биграмм. Функции системы фактически являются алгебраической интерпретацией логических функций, вероятностная мера и её статистические аналоги в рассмотрение не вводятся. Система применима для широкого круга текстов, содержащих все символы алфавита, и особенно эффективна для объемов текста от 2000 символов и выше (без учета пробела). Диапазон применения системы может быть расширен разными способами, в том числе за счет использования статистических и логико-вероятностных методов.

## SUMMARY

### *Kotov Yu.A.* **Determinate Identification of Russian Text Letter Bigrams.**

The task of numerical identification of text characters in some language have more than one unique solution. Its complexity lies in the fact that each text has its own ordering of the character set, assuming that the characters in such a set are unknown. Such assumption is equivalent to the one-to-one substitution of symbols with respect to the original alphabet. However, the rules of the language and some aggregate data on the frequency characteristics of the texts in this language are known. If we consider a text to be a logical sequence of characters of the alphabet, ordered by the rules of the language, and the aggregate frequency response — to be the numerical approximation of these laws, then by a direct analysis we can obtain an identification system of attributes and functions that allow us to solve the original problem.

In this paper, a system to solve the problem of identifying symbols of the Russian text based on occurrence frequency of characters pairs, bigrams, is proposed. The system functions are actually an algebraic interpretation of logic functions; a probability measure and its analogues are not considered. The system is applicable to a wide variety of texts, which contain all the characters of the alphabet, and is particularly effective for the text corpus starting from 2000 characters and above (excluding the gap). The application range of the system may be expanded in various ways, including using statistical and logical-probabilistic methods.

С.В. МИКОНИ

## АКСИОМАТИКА МЕТОДОВ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ НА КОНЕЧНОМ МНОЖЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВ

---

*Микони С.В. Аксиоматика методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив.*

**Аннотация.** Сформулированы аксиомы, позволившие выделить теорию многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив из общей теории принятия решений. Теория, объединившая все известные методы многокритериального выбора в систему, положена в основу учебника «Теория принятия управленческих решений».

**Ключевые слова:** аксиома, предпочтение, критерий, шкала, целевое значение признака, критерий оптимизации, функция полезности.

*Mikoni S.V. Axioms of Multicriteria Optimization Methods on a Finite Set of Alternatives.*

**Abstract.** The axioms of the theory of multi-criteria selection on a finite set of alternatives are formulated. They identified the theory from the general theory of decision-making. The theory united all the known methods of multi-criteria selection in the system. It is the basis of the textbook "The theory of administrative decision making".

**Keywords:** axiom, preference, criterion, scale, a target value of attribute, optimization criterion, utility function.

---

**1. Введение.** Логика развития научного направления предполагает его последовательную детализацию, стимулируемую потребностями практики. Эта тенденция характерна и для теории принятия решений. Зародившись в рамках исследования операций, она выделилась в самостоятельную дисциплину, востребованную развитием автоматизированных систем управления (АСУ) в последней трети XX-го века. Развитие сетевых технологий сопровождалось децентрализацией управления. На смену информационно-советующим системам, входившим в АСУ, пришли системы поддержки принятия решений (СППР), ориентированные на конкретные звенья управления. Разработка моделей выбора, реализующих предпочтение лица, принимающего решение (ЛПР), повлекла персонализацию управления [1].

В учебной литературе эти тенденции развития теории принятия решений отражались по-разному. Одни авторы учебников придерживались принципа накопления знаний, совмещая модели и методы, реализующие разные технологии принятия решений. Наряду с новыми моделями и методами в учебники включались классические методы оптимизации [2] и [3]. Другие авторы ориентировались на одну группу методов в применении к конкретной области, например, применение метода анализа иерархий (МАИ) в экономических задачах [4]. К третьей группе относятся учебные пособия, рассматривающие применение

любых математических моделей для принятия управленческих решений в рыночной экономике [5].

Каждой из этих категорий учебников присущи свои недостатки. Первая категория в силу разноплановости методов не рассчитана на практическое применение в конкретных управленческих задачах. Учебные пособия второй группы рассчитаны на усвоение ограниченного количества методов. Учебные пособия по методам принятия управленческих решений ориентированы на широкий класс задач предпринимательской деятельности, понимаемой как менеджмент [6-9].

Между тем, не все управленцы являются предпринимателями, а круг решаемых ими задач не ограничивается получением прибыли. Но всех их объединяет стремление к увеличению эффективности функционирования своих организаций. Этой цели служат разнообразные методы оптимизации, изучаемые в рамках исследования операций и дочерних по отношению к нему дисциплинах.

Независимо от решаемой задачи общей для всех методов оптимизации является модель *целевой функции* в области *допустимых значений*  $D$ :

$$f(\mathbf{x}) \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in D}, \quad f(\mathbf{x}) \rightarrow \max_{\mathbf{x} \in D} \quad (1)$$

Область допустимых значений  $D$  определяется системой линейных или нелинейных ограничений, накладываемых на компоненты вектора  $\mathbf{x}$ :

$$D = \{ \mathbf{x} \mid q_j(x) \leq q_j^0, \quad j = \overline{1, n} \}. \quad (2)$$

Общий характер модели оптимизации и является теоретической предпосылкой изложения в учебных пособиях в области принятия решений всех методов оптимизации, начиная от математического программирования до многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив [10].

Под многокритериальной оптимизацией на конечном множестве альтернатив (МКО КМА) будем понимать *упорядочение* объектов на основе предпочтений ЛПР. Под упорядочением альтернатив (объектов) будем понимать последовательную (итеративную) процедуру нахождения лучшего среди оставшихся объектов с целью определения их рейтинга. Вместе с методами многокритериальной классификации методы МКО КМА образуют методы многокритериального выбора на конечном множестве альтернатив (МКВ КМА).

Эта группа методов в основном и востребована в оперативном управлении. Их особенностью является необходимость непосредственного участия ЛПР в проектировании модели оптимизации.

Предпочтения ЛПР должны быть учтены как при формулировании частных целей в процессе построения дерева целей, так и при задании их важности. По этой причине объём участия ЛПР в проектировании модели выбора целесообразно принять за признак, выделяющий организационные управленческие решения от других задач принятия решений в сфере управления. Отсюда возникает задача теоретического обоснования многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив, положенной в основу принятия оперативных решений. Решению этой проблемы посвящена данная работа.

**2. Условия реализации методов МКО КМА.** В основе любого метода оптимизации лежат две аксиомы, характеризующие *отношение предпочтения*:

$$1. (A \succ B) \Leftrightarrow f(A) > f(B) \vee (B \succ A) \Leftrightarrow f(B) > f(A) \vee (A \equiv B) \Leftrightarrow f(A) = f(B).$$

$$2. f(A) \succ f(B) \wedge f(B) \succ f(C) \Rightarrow f(A) \succ f(C).$$

Первая аксиома утверждает, что, либо одна альтернатива *предпочтительнее* другой, либо они *равноценны*, и эти отношения могут быть определены по характеризующему их свойству  $f$ .

Вторая аксиома устанавливает транзитивность отношений предпочтения, в том числе относительно свойства  $f$ .

Наряду с методами многокритериального выбора этим аксиомам удовлетворяют любые методы оптимизации и методы последовательного поиска. Например, на каждом шаге последовательного логического вывода ЛПР выражает предпочтение на множестве двух ответов на вопрос экспертной системы. Заключение экспертной системы отвечает всей совокупности предпочтений ЛПР и в этом смысле является для него оптимальным.

Заметим, что оптимальность варианта на конечном множестве альтернатив не может рассматриваться с позиций классической задачи оптимизации, имеющей, как правило, однозначное оптимальное решение для экстремального значения целевой функции. При многокритериальном выборе *любая* альтернатива из конечного множества недоминируемых альтернатив может претендовать на наилучший вариант при соответствующих предпочтениях ЛПР. Он является оптимальным в смысле заданных предпочтений ЛПР. Для исключения путаницы с классическими задачами оптимизации такой вариант называют *наилучшим* или *предпочтительным*.

Две базовые аксиомы достаточны для создания моделей таких простейших методов векторной оптимизации как Парето-доминирование и лексикографическая оптимизация, характеризующихся минимальным объёмом предпочтений ЛПР. Однако от простых методов трудно ожидать полноценных результатов. Парето-доминирование

ограничивается получением *частичного порядка* на множестве альтернатив, а метод лексикографической оптимизации, *линейно* упорядочивающий альтернативы по убыванию приоритета критериев, не гарантирует использование *всех* критериев [10].

Увеличение объёма предпочтений, привлекаемых для сопоставления альтернатив, позволяет уменьшить число несравнимых альтернатив, но не гарантирует его обнуления. Иными словами, увеличивается число уровней графа доминирования, но не достигается линейного порядка. Этими свойствами обладают такие методы векторной оптимизации, как ЭЛЕКТРА и вербальный анализ решений (ВАР). В одном из методов ВАР увеличению порядка на множестве альтернатив способствует такая мера, как создание объединённой порядковой шкалы на множестве значений всех критериев, названной единой шкалой изменения качества (ЕШИК).

Применение большого объёма предпочтений влечёт необходимость выявления их несогласованности, характеризуемой нетранзитивностью предпочтений. Решение этой проблемы основывается на аксиоме транзитивности предпочтений.

Ограниченные возможности методов векторной оптимизации применительно к получению линейного порядка на множестве альтернатив с участием всех критериев, объясняются использованием только порядковой шкалы и двоичной логики. Для получения гарантированного линейного порядка на основе всех критериев требуется привлечение метрики. А это уже *количественная* категория, связанная с *числовой* шкалой и *вычислительными* процедурами. Их применение выходит за область действия двух базовых аксиом предпочтений.

Возможность установления линейного порядка на основе ЕШИК с применением опорных ситуаций (идеального и антиидеального объектов) показана в [11] на примере ранжирования квартир. За базу сравнения квартир была принята 1-я опорная ситуация. Ей соответствует идеальная квартира, которая заняла бы первое место по всем пяти принятым в примере критериям, т.е. (1, 1, 1, 1, 1). Ранги градаций изменений качества рассматриваются как отклонение оценок критериев от оценок, присущих идеальному объекту, Это даёт возможность использовать линейную метрику Хэмминга для оценивания степени приближения каждого объекта к 1-й опорной ситуации как к идеальному объекту (цели). Результирующие ранги объектов формируются на основе предпочтения, заданного в количественной шкале, а именно, *минимизации отклонения* их рангов от рангов идеального объекта.

Предпосылкой для такого подхода является равная важность критериев. Степень приближения (отклонения) объекта к (от) идеаль-

ной цели измеряется в балльной (количественной) шкале, что и позволяет исключить несравнимые объекты. Здесь важно заметить, что привлечение дополнительных средств решения проблемы линейного порядка не заменяет результаты, полученные логическим путём, а *углубляет* их.

Приведённый пример показывает достаточность использования порядковой шкалы для создания модели критериального выбора и её недостаточность для решения проблемы линейного порядка. Для решения этой проблемы логический анализ модели должен быть дополнен вычислениями, требующими привлечения числовой шкалы.

Вычисление расстояния до идеального объекта по метрике Хэмминга, по существу, означает сопоставление числа вектору, т.е. его скаляризацию. А это означает, что описанный в примере метод упорядочения альтернатив является *смешанным*. На начальном этапе он использует логические, а на заключительном этапе — вычислительные процедуры. По *используемой модели* метод линейного упорядочения относится к методам критериального выбора (векторной оптимизации), а по *способу сопоставления векторных оценок альтернатив* — к методам функционального выбора (скалярной оптимизации) [12].

В моделях количественного оценивания альтернатив численные шкалы привлекаются и для создания модели выбора. В общем случае предполагается измерение критериев в *разных* шкалах. Разными считаются численные шкалы, различающиеся не только единицами измерения, но и различными диапазонами их значений.

Согласно [13] величина, измеренная в физической шкале, представляет собой не математическое, а именованное число. Арифметические операции возможны только над именованными числами, измеренными в одной шкале. Для выполнения арифметических операций над числами, измеренными в разных шкалах, необходимо избавиться от их именованности. Это достигается переводом абсолютных значений переменных в относительные значения, выражаемые долями единицы.

Включение в модель оптимизации шкал признаков не только выделяет методы оптимизации по многим признакам из общей совокупности методов оптимизации, но и позволяет различать их между собой.

Само по себе название метода *многокритериальной* оптимизации предполагает применение не одной, а нескольких целевых функций. Они задаются на шкале каждого признака. Функции  $f(x) \rightarrow \min$  соответствует принятие в качестве целевого значения нижней границы шкалы признака, а функции  $f(x) \rightarrow \max$  — принятие в качестве целевого значения верхней границы его шкалы. Поскольку граничные значе-

ния шкалы признака достижимы не для всех оцениваемых объектов, в [10] было предложено называть их *идеальными* целями.

В обобщённой модели оптимизации (1) границы области допустимых значений  $D$  задаются системой ограничений. Применительно к модели оптимизации по многим признакам эти ограничения задаются на их шкалах, причём не на граничных значениях, как целевые функции, а на промежуточных значениях шкалы. В [10] было предложено называть эти значения шкалы *реальными* целями.

*Частная цель*, идеальная или реальная, задаваемая на шкале признака, принимается в качестве базы сравнения (точки отсчёта) для оценивания объекта  $x \in X$  по этому признаку. Для сопоставления объектов важен не только факт достижения или не достижения цели, но и степень приближения к ней или отклонения от неё.

Количественная мера приближения к *общей цели* или отклонения от неё требует преобразования шкал признаков в общую шкалу с целью выполнения арифметических операций над значениями признаков, измеренных в разных шкалах. Проблема перехода к общей шкале решается применением *функций*, отражающих предпочтения ЛПР на шкале каждого признака.

В тех случаях, когда ЛПР задаёт предпочтения на парах значений признака, необходимо учитывать меру *согласованности* частных предпочтений. Учёт меры согласованности касается и предпочтений, задаваемых разными экспертами при групповой экспертизе.

Для обобщения значений признаков, измеренных в общей шкале, применяются *обобщающие* (синтезирующие) функции.

Рассмотренные условия формирования моделей многокритериальной оптимизации сформулируем в виде аксиом, как основополагающих положений общей теории для всех методов МКО КМА.

**3. Аксиомы методов МКО КМА.** Приведём аксиомы, формализующие изложенные выше условия реализации методов МКО КМА.

3.1. *Аксиома шкалирования признаков.* Каждый оцениваемый методом МКО КМА  $j$ -й признак имеет в общем случае *свою шкалу*, представленную кортежем  $\langle X, Y_j, f_j \rangle$ ,  $j \neq k$ ,  $j, k = \overline{1, n}$ .

Кортеж  $\langle X, Y_j, f_j \rangle$  определяет знаковую систему  $Y_j$  и отображение  $f_j$ , ставящее в соответствие объектам из некоторого множества  $X$  тот или иной элемент знаковой системы  $Y_j$ :  $f_j: X \rightarrow Y_j$ .

Шкалы делятся на *качественные* и *числовые*. Знаковая система  $Y_j$  качественной шкалы представляет собой список слов, порядок которых определяется их смыслом. Числовая шкала  $j$ -го признака  $p_j$ ,  $j = \overline{1, n}$ , представляется диапазоном упорядоченных по возрастанию

чисел  $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$ , где  $y_{j,\min}$  — нижняя граница, а  $y_{j,\max}$  — верхняя граница шкалы, т.е.  $y_{j,\min} = \inf_{x \in X} f_j(x)$  и  $y_{j,\max} = \sup_{x \in X} f_j(x)$ .

3.2. *Аксиома целевого значения.* Целевое значение  $c_j$  на шкале  $j$ -го признака,  $j = \overline{1, n}$ , может быть произвольным  $y_{j,\min} \leq c_j \leq y_{j,\max}$ , не обязательно совпадающим с одной из границ шкалы  $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$ :  $c_j = y_{j,\min}$  ( $c_j = y_{j,\max}$ ) трактуется как идеальная цель, а  $y_{j,\min} < c_j < y_{j,\max}$  — как реальная цель.

3.3. *Аксиома предпочтений на шкале признака.* Любое предпочтение на шкале  $j$ -го признака представимо двухместным бесконечнозначным предикатом:

$$Pr_{\geq}(f_j(x), c_j),$$

здесь:  $Pr_{\geq}$  — предикат предпочтения  $f_j(x)$  по отношению к  $c_j$ ;  
 $f_j(x)$  — оцениваемое значение  $j$ -го признака объекта  $x$ ;  
 $c_j$  — целевое значение  $j$ -го признака в роли базы сравнения.

Предикат предпочтения представляется оценочной функцией:

$$p_j: Y_j \times C \rightarrow [0, 1]$$

с областью значений  $[0, 1]$ . В частном случае  $Pr_{\geq}$  имеет двоичную область значений  $\{0, 1\}$ .

Двухместное отношение предпочтения описывается предикатом превосходства  $\succ (f_j(x_i), f_j(x_k))$  с  $f_j(x_k)$  в роли базы сравнения. Здесь  $y_i = f_j(x_i)$ ,  $y_k = f_j(x_k)$  — значения признака для объектов  $x_i$  и  $x_k$ . *Объём предпочтений* на шкале признака определяется числом делений шкалы, использованных в качестве баз сравнения.

Предпочтение  $\succ (y_{j,\min}, c_j)$  называется критерием оптимизации на шкале  $j$ -го признака, *целевым* — при  $c_j = y_{j,\min}$  ( $c_j = y_{j,\max}$ ) и *ограничительным* — при  $y_{j,\min} < c_j < y_{j,\max}$ .

Предикат *предпочтения*  $Pr_{\geq}(f_j(x), c_j)$  делится на предикаты:

- *превосходства* ( $Pr_{>}(f_j(x), c_j)$ ,  $Pr_{<}(f_j(x), c_j)$ );
- *соответствия* ( $Pr_{=}(f_j(x), c_j)$ ,  $Pr_{\parallel}(f_j(x), c_{j,\text{н}}, c_{j,\text{в}})$ ).

Для критерия превосходства должно выполняться условие монотонного роста (убывания) предпочтительности объекта при увеличении значений  $j$ -го показателя  $y_j$  при фиксированных значениях остальных  $n-1$  показателей,  $k \neq j$ .

3.4. *Аксиома способа оценивания.* Альтернатива (объект) оценивается либо по степени *достижения* объектом  $x$  целевого значения  $c_j$   $j$ -го признака, либо по степени *отклонения* от него.

3.5. *Аксиома отображения в общую шкалу.* Для вычисления обобщённых оценок объектов по признакам, измеренным в разных шкалах, необходимо их приведение к общей шкале.

В качестве общей шкалы по отношению ко всем функциям, отображающим значения признака, используется биполярная шкала  $[-1, 0, +1]$  или её части:  $[0, +1]$  и  $[-1, 0]$ .

Для отображения значений признака в общую шкалу задаются функции достижения цели (ДЦ) и функции отклонения от цели (ОЦ). Любая функция достижения цели независимо от способа её создания трактуется как функция полезности [14, 15]:

$$u_j: Y_j \rightarrow [-1, 0, 1],$$

здесь  $Y_j$  — множество значений (домен)  $j$ -го признака.

Стопроцентная полезность объекта  $x$  по  $j$ -у признаку  $u_j(x)=1$  имеет место при полном достижении цели:  $f_j(x)=c_j$ . При  $u_j(x)<1$  имеет место *частичное достижение* цели. Отсутствию полезности объекта  $x$  по  $j$ -у признаку соответствует  $u_j(x)=0$ . Отрицательная полуось  $[-1, 0]$  применяется при необходимости отражения возможного ущерба.

Мера отклонения от целевого значения  $c_j$   $j$ -го признака объектом  $x$  определяется значением функции отклонения от цели:

$$\gamma_j: \Delta C_j \rightarrow [-1, 0, +1],$$

здесь  $\Delta C_j \subseteq Y_j$  — область отклонений от цели  $c_j$  на шкале  $j$ -го признака. Значению 0 соответствует совпадение значения  $j$ -го признака объекта  $x$  с целевым значением  $c_j$ . Одной из полуосей шкалы  $[-1, 0, +1]$  ставится в соответствие штраф за частичное достижение (не выполнение) цели, а другой полуоси — поощрение (бонус) за превышение цели. Отклонения по обе стороны от целевого значения немонотонной функции полезности отображаются только штрафами.

3.6. *Аксиома обобщения частных оценок.* Общая оценка объекта  $x$  по  $n$  признакам находится путём отображения  $n$  частных оценок в общую шкалу обобщающей функцией  $\varphi: Y \rightarrow S$ , здесь  $Y$  — множество частных оценок объекта  $x$  по  $n$  признакам, а  $S$  — общая шкала.

3.7. *Аксиома согласованности предпочтений ЛПП.* Мера согласованности предпочтений ЛПП не ограничивается наличием не транзитивных предпочтений.

Согласованность групповых предпочтений помимо транзитивности предпочтений учитывает ещё пять аксиом, невозможность одновременного выполнения которых доказана теоремой Эрроу.

Отметим обобщающий характер аксиом 1 и 7 по отношению к соответствующим базовым аксиомам предпочтений.

Поскольку изложенные аксиомы обобщают свойства конкретных методов МКО КМА, для представления их свойств используется правило подстановки.

**4. Применение аксиом к методам МКО КМА.** В разделе 2 была обоснована достаточность двух аксиом предпочтений для описания методов критериального выбора. Обоснуем необходимость и достаточность аксиом для представления любого метода МКО КМА.

*Теорема полноты.* Система аксиом 1–7 обладает полнотой для представления любого метода МКО КМА.

Учитывая обобщение базовых аксиом предпочтений аксиомами 1 и 7, эта теорема относится ко всем методам МКО КМА, но в доказательстве их необходимости нуждаются только методы функционального выбора. Доказательство теоремы проще всего представить таблично (см. таблица 1). Аксиома 7 не включена в таблицу, поскольку относится к не рассматриваемым в ней методам группового выбора.

Таблица 1. Свойства методов, отражаемые аксиомами МКО КМА

NN п/п	Метод	Аксиома					
		1	2	3	4	5	6
1	АИ	О	МПр	$k \cdot N(N-1)/2$	ДЦ	ФПр	УМ
2	ДИЦ	Р	ИЦ	1	ДЦ	НФ	ЛОФ
3	ДРЦ	Р	РЦ	2	ДЦ	НФ	ЛОФ
4	ВП	Р	ПЗ	$\geq 2$	ДЦ	НФ	ЛОФ
5	МАП	Р	МП	$5 \div \infty$	ДЦ	ФП	ЛОФ
6	ОЦ	Р	РЦ	2	ОЦ	ФОЦ	АС

Строки таблицы озаглавлены именами основных методов функционального выбора, а столбцы — порядковыми номерами аксиом. Имена основных методов функционального выбора имеют следующие обозначения:

- 1) АИ — анализа иерархий;
- 2) ДИЦ — достижения идеальной цели;
- 3) ДРЦ — достижения реальной цели;
- 4) ВП — выполнения плана;
- 5) МАП — многоатрибутной полезности;
- 6) ОЦ — отклонения от цели.

Столбец, соответствующий аксиоме 1, отражает различие (Р) шкал, в которых измеряются показатели, характеризующие объект. Однородность (О) относительной шкалы, в которой формируются предпочтения эксперта при заполнении матрицы парных сравнений, может рассматриваться как частный случай, предложенный Т. Саати.

В принципе могут использоваться матрицы и с другими типами предпочтений [10].

Столбец, соответствующий аксиоме 2, содержит виды целей, задаваемых на шкалах признаков:

- 1) ИЦ — идеальная цель;
- 2) РЦ — реальная цель;
- 3) ПЗ — плановое задание;
- 4) МП — максимальная полезность.

На относительной шкале, используемой в модели АИ, цель не указывается, а в результирующей шкале  $[0, 1]$  ею является максимальный приоритет (МПр).

Поскольку таблица 1 содержит только методы оптимизации, в них используются только предикаты типа  $\geq$  и  $\leq$ . Поэтому аксиома 3 представлена в таблице 1 количеством предпочтений (предикатов), задаваемых на шкале признака. Оно зависит от вида цели и меняется от одного предпочтения, достаточного для указания направления движения к идеальной цели, до бесконечного числа предпочтений, соответствующего непрерывной нелинейной функции полезности. Число сравнений, выполняемых в методе АИ, определяется числом заполняемых экспертом клеток треугольной матрицы и числом  $k$  матриц, формируемых в иерархии.

Согласно аксиоме 4 её столбец содержит только тип функций, отражающий способ оценивания альтернатив — по достижению цели (ДЦ) или отклонению от цели (ОЦ).

Аксиома 5 представлена функциями, отображающими значения признаков в общую шкалу. Для методов ДИЦ и ДРЦ общей является шкала  $[0, 1]$ , а для метода ВП — шкала  $[0, 100\%, 200\%]$ . Все эти методы используют нормирующие функции (НФ) критериев: в ДИЦ — на всей шкале, ДРЦ и ВП — на участках шкалы, разделённых целевым значением критерия. Значения показателей в методе АИ вычисляются с применением функции приоритетов ФПр. Метод многоатрибутной полезности использует функции полезности (ФП), создаваемые экспертом на шкале каждого признака. Согласно аксиоме 5 функции НФ и ФПр предлагается рассматривать как разновидности функции полезности [16-19].

Метод отклонения от цели использует функцию отклонения от цели (ФОЦ), формируемую относительно реальной цели на шкале каждого критерия. Монотонные функции отображают значение критерия в шкалу  $[-1, 0, +1]$ , а немонотонные функции — в шкалу  $[0, +1]$ , поскольку штрафуются отклонения от цели в любую сторону.

Согласно аксиоме 6 роль обобщающей функции (ОФ) в методе АИ выполняет умножение матрицы (УМ) приоритета альтернатив по всем критериям на вектор важности этих критериев. В качестве ОФ в

методах ДИЦ, ДРЦ, ВП и МП применяются любые усредняющие, либо максиминные функции (ЛОФ) [10]. Метод отклонения от цели использует в качестве ОФ алгебраическую средневзвешенную (АС) или минимаксную функцию. Шкала её значений  $[-1, 0, +1]$  может использоваться полностью или по частям:  $[0, +1]$  — для упорядочения объектов по штрафам, либо  $[-1, 0]$  — для упорядочения по бонусам.

Непустые столбцы таблицы 1 отражают востребованность всех аксиом для описания моделей МКО КМА, а различие столбцов показывает их избыточность. Различие строк характеризует полноту системы аксиом, позволяющую различать методы МКО КМА.

Обобщённые значения в столбцах показывают возможность дальнейшей дифференциации методов. Например, по виду усредняющей функции различают методы с аддитивной и мультипликативной средневзвешенной функцией. В свою очередь, различают 3 вида мультипликативной ОФ и т.д. Эта детализация иллюстрирует применение правила подстановки, применяемого для конкретизации метода.

Поскольку предложенные аксиомы полностью характеризуют известные методы МКО КМА и позволяют порождать их модификации, нетрудно предположить возможность их использования для систематизации этих методов.

**5. Систематизация методов на основе общей аксиоматики.** В работе [12] аксиомы частично использовались для классификации методов критериального выбора и классификации функций, используемых методами функционального выбора. Рассмотрим роль в систематизации методов МКО КМА каждой аксиомы в отдельности.

Аксиома *шкалирования признаков* (1) напрямую причастна к делению методов МКО КМА на самом верхнем уровне на методы критериального выбора и функционального выбора [12]. Согласно ей модели выбора первой группы методов используют для ранжирования альтернатив шкалы критериев, а модели второй группы — единую шкалу, обеспечивающую возможность объединения оценок по разным показателям. По типам данных (векторы и скаляры), используемых для упорядочения объектов, эти группы методов называются соответственно методами векторной и скалярной оптимизации.

Применение аксиомы 1 не ограничивается верхним уровнем классификации методов. На нижних уровнях классификации существенное влияние на свойства метода оказывают типы измеряемых переменных — числа (двоичные, целые, вещественные) или символы.

Разновидности целей, провозглашённых аксиомой *целевого значения* (2), использовались в [12] для классификации функций, используемых методами функционального выбора. Эта аксиома полезна и для деления методов оптимизации на методы достижения *идеальной* и

реальной цели. Методы первой группы оценивают степень приближения оцениваемого объекта к идеальному объекту. К идеальным целям на шкале признака относятся также максимальные полезность (МП) и приоритет (МПр) в таблице 1.

Методы второй группы оценивают степень приближения к реальному объекту как, в принципе, достижимому. Это позволяет оценивать не только степень достижения цели, но и её превышение. К реальным целям относятся также плановые задания (ПЗ). Их дополнительным свойством является индивидуализация целей. Объекты оцениваются по степени достижения *своих* целей, а не общей для всех цели.

Тип предиката, как один из факторов аксиомы *предпочтений на шкале признака* (3) разделяет методы МКО КМА на методы оптимизации и классификации. Первая группа методов использует предикаты  $\geq$  и  $\leq$ , нацеленные на установление порядка на множестве альтернатив.

Методы классификации используют предикаты  $=$  (равно) и  $]$  (интервал), нацеленные на установление преимущественной принадлежности объекта по нескольким признакам одному из заданных классов. В работе [20] показана возможность вычислять функцию полезности на основе функций принадлежности упорядоченным (с применением предиката  $\geq$ ) по качеству классам. Это позволило установить связь между методами многокритериальной оптимизации и классификации.

Поскольку таблица 1 содержит только методы оптимизации, её 3-й столбец характеризует другой фактор аксиомы 3, а именно, количество предпочтений, задаваемых на шкале признака. Несмотря на зависимость от аксиомы 2 (вида целевого значения), объём предпочтений также может применяться в роли системообразующего признака (основания деления методов).

Аксиома *способа оценивания* (4) обладает естественным системообразующим свойством, порождая противоположные по смыслу методы достижения цели и отклонения от неё.

Аксиома *отображения в общую шкалу* (5) делит методы по виду функций, отображающих значения признаков в общую шкалу. Согласно этой аксиоме все функции трактуются как модификации функции полезности.

Согласно аксиоме *обобщения частных оценок* (6) методы допускающие применение любой обобщающей функции (ЛОФ) различаются по виду принятой функции.

На рисунке 1 приведена классификация оптимизационных методов функционального выбора. Для выделения этой группы методов из общей совокупности методов МКВ КМА использованы аксиомы 1 и 3, объединяющие методы применением шкалы  $[-1, 0, +1]$  (или её частей) и отношения превосходства.

МФВ		Метод		
	<i>Достижение цели</i>	<i>Нормирующая</i>	<i>Идеальная</i>	
<u>Отношение к цели</u>	<u>Вид функции</u>	<u>Вид цели</u>	<i>Идеальная</i>	ДИЦ
			<i>Реальная</i>	ДРЦ
		<i>Плановая функция</i>	ВП	
		<i>Функция полезности</i>	МАП	
		<i>Функция приоритетов</i>	ЛИ	
	<i>Отклонение от цели</i>	<i>Отобранных</i>	УО	
	<u>Оценивание объектов</u>	<i>Всех</i>	ОЦ	

Рис.1. Классификация оптимизационных методов функционального выбора

Из остальных четырёх аксиом использованы аксиомы 4, 5 и 2 соответственно на первом, втором и третьем уровнях детализации методов. На рисунке 1 опущен четвёртый уровень классификации методов по виду обобщающих функций, на котором согласно аксиоме 6 методы, допускающие применение ЛОФ, могут различаться по виду обобщающей функции.

Дополнительно к методам, включённым в таблицу 1, на рисунке 1 представлен метод условной оптимизации (УО), использующий как целевые, так и ограничительные критерии. Являясь смешанным по виду критериев, он условно отнесён к методам отклонения от цели по исключению из оптимизации объектов, имеющих отклонения по не выполнению реальных целей. Оставшиеся объекты оцениваются по степени достижения идеальных целей и перевыполнения реальных целей. Этот метод является более жёстким по отношению к методу отклонения от цели, оценивающим все объекты независимо от выполнения ими реальных целей [21].

**6. Заключение.** Любая теория базируется на некоторой совокупности исходных положений — аксиом. И чем их меньше, тем сфера применения теории больше. Двух аксиом предпочтения вполне достаточно для включения в теорию принятия решений любых методов оптимизации, чья сфера применения безгранична.

Между тем, в оперативном управлении лицо, принимающее решение, преимущественно имеет дело с проблемой многокритериально-

го выбора на конечном множестве альтернатив (МКВ КМА). Для решения этой проблемы разработано несколько групп методов, различающихся исходными положениями (аксиомами). На основе исключения их специфических свойств предложены аксиомы, решившие проблему сходства *всех* методов МКВ КМА. Специфические свойства методов использованы для выявления различия методов МКВ КМА.

Из семи предложенных аксиом две обобщают аксиомы предпочтений. Доказана необходимость и достаточность предложенных аксиом для описания всех известных методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив (МКО КМА). Иллюстрация их применимости к методам многокритериальной классификации и группового выбора, относящимся к методам МКВ КМА осталась за пределами работы.

Предложенные аксиомы легли в основу изложения методов МКВ КМА в учебном пособии [22]. Благодаря суженной сфере их применения теорию принятия управленческих решений можно рассматривать как дочернюю дисциплину по отношению к общей теории принятия решений.

### Литература

1. *Трахтенгерц Э.А.* Компьютерные системы поддержки управленческих решений // Проблемы управления. 2003. № 4. С. 13–28.
2. *Черноруцкий И.Г.* Методы принятия решений. Учебное пособие // СПб: БХВ-Петербург. 2005. 408 с.
3. *Петровский А.Б.* Теория принятия решений. Университетский учебник // М.: ИЦ «Академия». 2009. 391 с.
4. *Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н.* Анализ, синтез, планирование решений в экономике // М.: Финансы и статистика. 2004. 464 с.
5. *Литвак Б.Г.* Управленческие решения. Практикум // М.: Московская Финансово-Промышленная Академия. 2012. 448 с.
6. *Yeh C. H., Xu Y.* Managing critical success strategies for an enterprise resource planning project // European Journal of Operational Research. 2013. vol. 230. no. 3. pp. 604–614.
7. *Liesiö J, Punkka A.* Baseline value specification and sensitivity analysis in multiattribute project portfolio selection // European Journal of Operational Research. 2014. vol. 237. no. 3. pp. 946–956.
8. *De Brucker K., Macharis C., Verbeke A.* Multi-criteria analysis and the resolution of sustainable development dilemmas: A stakeholder management approach // European Journal of Operational Research. 2013. vol. 224. no. 1. pp. 122–131.
9. *Mattila V., Virtanen K.* Ranking and selection for multiple performance measures using incomplete preference information // European Journal of Operational Research. 2015. vol. 242. no. 2. pp. 568–579.
10. *Микони С.В.* Многокритериальный выбор на конечном множестве альтернатив. Учебное пособие // СПб: Лань. 2009. 272 с.
11. *Ларичев О.И.* Вербальный анализ решений // М.: Наука. 2006. 181 с.
12. *Микони С.В.* Системный анализ методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив // Труды СПИИРАН. 2015. Вып. 4(41). С. 180–199.
13. *Волкова В.Н., Денисов А.А.* Теория систем: учебное пособие // М.: Высшая школа. 2006. 512 с.

14. Mikoni S.V. Ordering multiattribute optimization methods from the utility point of view // *International Journal Information Technologies & Knowledge*. 2013. vol. 7. no. 1. pp. 94–99.
15. Mikoni C.B. Оценивание альтернатив по полезности как завершающий этап их многокритериальной оптимизации // *Труды СПИИРАН*. 2013. Вып. 8(31). С. 6–19.
16. Mikoni S.V. Utility function design on the base of the paired comparison matrix // *Artificial Intelligence Methods and Techniques for Business and Engineering Applications*. ITHEA. Rzeszow – Sofia. 2012. pp. 325–333.
17. Mikoni S.V. Neural network approach to the formation models of multiattribute utility // *International Journal Information Models & Analyses*. Sofia. 2014. vol. 3. no. 1. pp. 3–9.
18. Korhonen P.J., Silvennoinen K., Wallenius J., Öörni A. Can a linear value function explain choices? An experimental study // *European Journal of Operational Research*. 2012. vol. 219. no. 2. pp. 360–367.
19. Podinovski V.V. Decision making under uncertainty with unknown utility function and rank-ordered probabilities // *European Journal of Operational Research*. 2014. vol. 239. no. 2. pp. 537–541.
20. Mikoni S.V., Garina M.I. Study relationship between utility function and membership function in the problem of object ranking // *Artificial Intelligence Driven Solutions to Business and Engineering Problems*. ITHEA. Rzeszow – Sofia. 2012. pp. 41–45.
21. Mikoni C.B. Мягкая условная оптимизация на дискретном множестве объектов // *Вестник Томского Политехнического университета*. 2011. №3. С. 39–44.
22. Mikoni C.B. Теория принятия управленческих решений. Учебное пособие // СПб: Лань. 2015. 448 с.

## References

1. Trahtengerc Je.A. [Computer systems support management decisions]. *Problemy upravlenija – Management problems*. 2003. vol. 4. pp. 13–28. (In Russ.).
2. Chernoruckij I.G. *Metody prinjatija reshenij. Uchebnoe posobie* [Methods of decision-making. Tutorial]. SPb. BHV-Peterburg. 2005. 408 p. (In Russ.).
3. Petrovskij A.B. *Teorija prinjatija reshenij. Universitetskij uchebnik* [Decision theory. University textbook]. M. IC «Akademija». 2009. 391 p. (In Russ.).
4. Andrejchikov A.V., Andrejchikova O.N. *Analiz, sintez, planirovanie reshenij v jekonomike* [Analysis, synthesis, planning decisions in the economy]. M.: Finansy i statistika. 2004. 464 p. (In Russ.).
5. Litvak B.G. *Upravlencheskie reshenija. Praktikum* [Management decisions. Workshop]. M.: Moskovskaja Finansovo-Promyshlennaja Akademija. 2012. 448 p. (In Russ.).
6. Yeh C. H., Xu Y. Managing critical success strategies for an enterprise resource planning project. *European Journal of Operational Research*. 2013. vol. 230. no. 3. pp. 604–614.
7. Liesjö J, Punkka A. Baseline value specification and sensitivity analysis in multiattribute project portfolio selection. *European Journal of Operational Research*. 2014. vol. 237. no. 3. pp. 946–956.
8. De Brucker K., Macharis C., Verbeke A. Multi-criteria analysis and the resolution of sustainable development dilemmas: A stakeholder management approach. *European Journal of Operational Research*. 2013. vol. 224. no. 1. pp. 122–131.
9. Mattila V., Virtanen K. Ranking and selection for multiple performance measures using incomplete preference information. *European Journal of Operational Research*. 2015. vol. 242. no. 2. pp. 568–579.
10. Mikoni S.V. *Mnogokriterial'nyi vybor na konechnom mnozhestve al'ternativ. Uchebnoe posobie* [Multicriteria choice on a final set of alternatives. Tutorial]. SPb.: Lan'. 2009. 272 p. (In Russ.).
11. Larichev O.I. *Verbal'nyj analiz reshenij* [Verbal Decision Analysis]. M.: Nauka. 2006. 181 p. (In Russ.).

12. Mikoni S.V. [System analysis of multi-criteria optimization methods on a finite set of alternatives]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2015. vol. 4(41). pp. 180–199. (In Russ.).
13. Volkova V.N., Denisov A.A. *Teoriya sistem: uchebnoe posobie* [Theory of systems: manual]. M.: Vysshaya shkola. 2006. 512 p. (In Russ.).
14. Mikoni S.V. Ordering multiattribute optimization methods from the utility point of view. *International Journal Information Technologies & Knowledge*. 2013. vol. 7. no. 1. pp. 94–99.
15. Mikoni S.V. [Estimation of alternatives on usefulness as the final stage of their multicriteria optimization]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2013. vol. 8(31). pp. 6–19. (In Russ.).
16. Mikoni S.V. Utility function design on the base of the paired comparison matrix. *Artificial Intelligence Methods and Techniques for Business and Engineering Applications*. ITHEA. Rzeszow – Sofia. 2012. pp. 325–333.
17. Mikoni S.V. Neural network approach to the formation models of multiattribute utility. *International Journal Information Models & Analyses*. Sofia. 2014. vol. 3. no. 1. pp. 3–9.
18. Korhonen P.J., Silvennoinen K., Wallenius J., Öörni A. Can a linear value function explain choices? An experimental study. *European Journal of Operational Research*. 2012. vol. 219. no. 2. pp. 360–367.
19. Podinovski V.V. Decision making under uncertainty with unknown utility function and rank-ordered probabilities. *European Journal of Operational Research*. 2014. vol. 239. no. 2. pp. 537–541.
20. Mikoni S.V., Garina M.I. Study relationship between utility function and membership function in the problem of object ranking. *Artificial Intelligence Driven Solutions to Business and Engineering Problems*. ITHEA. Rzeszow – Sofia. 2012. pp. 41–45.
21. Mikoni S.V. [Soft conditional optimization on a discrete set of objects] *Vestnik Tomskogo Politehnicheskogo universiteta – Bulletin of Tomsk Polytechnical University*. 2011. vol. 3. pp. 39–44. (In Russ.).
22. Mikoni S.V. *Teoriya prinjatija upravlencheskih reshenij. Uchebnoe posobie* [Theory of administrative decision-making. Tutorial]. SPb. Lan'. 2015. 448 p. (In Russ.).

**Микони Станислав Витальевич** — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры математики и моделирования, ФГБОУ ВПО Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, ведущий научный сотрудник лаборатории информационных технологий в системном анализе и моделировании, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). Область научных интересов: системный анализ, принятие решений, интеллектуальные технологии. Число научных публикаций — 254. svm@sm4265.spb.edu, <http://www.mcd-svir.ru>; Московский пр. 9, Санкт-Петербург, 190039; р.т.: +7(812) 436-9735.

**Mikoni Stanislav Vitalyevitch** — Ph.D., Dr. Sci., professor, professor of mathematics and modeling department, Petersburg State Transport University, leading researcher of information technologies in the system analysis and modeling laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences (SPIIRAS). Research interests: system analyses, decision making, intellect technologies. The number of publications — 254. svm@sm4265.spb.edu, <http://www.mcd-svir.ru>; 9, Moskovsky av., St. Petersburg, 190039, Russia; office phone: +7(812) 436-9735.

**Поддержка исследований.** Работа поддержана РФФИ (проект № 13-01-00912) и Программой фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект 2.11).

**Acknowledgements.** This research is supported by RFBR (grant 13-01-00912) and by ONITRAS (project 2.11).

## РЕФЕРАТ

### *Микони С.В.* **Аксиоматика методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив.**

Задачи организационного управления являются, как правило, многокритериальными, а область их определения не превышает нескольких десятков альтернатив. Главным отличием этих задач от задач, решаемых методами исследования операций, является необходимость непосредственного участия ЛПР в проектировании модели выбора. Именно объём участия ЛПР в проектировании модели выбора резонно принять за признак, выделяющий организационные управленческие решения от других задач принятия решений в сфере управления.

В основу теории принятия решений положены всего две аксиомы, отражающие отношение предпочтения. Это объясняет многообразие моделей и методов теории принятия решений. Сфера применения методов многокритериальной оптимизации на конечном множестве альтернатив ограничивается дополнительными аксиомами, касающимися шкал признаков и предпочтений на шкалах. Эти аксиомы различны для разных групп методов. На основе исключения из этих аксиом специфических свойств методов предложены аксиомы, применимые ко всем методам многокритериального выбора.

Предложенные аксиомы позволили создать общую теорию многокритериального выбора, увязав все методы в единую систему. Эта теория положена в основу учебника «Теория принятия управленческих решений».

## SUMMARY

### *Mikoni S.V.* **Axioms of Multicriteria Optimization Methods on a Finite Set of Alternatives.**

Organizational management tasks are usually multi-criteria ones, and the area of their determination does not exceed a few tens of alternatives. The main difference between these tasks and the problems solved by means of operations research methods is the need for the direct involvement of decision-makers in the design of the selection model. It is the amount of participation of the DM in the design of selection model, which is reasonable to take as a sign that distinguishes organizations managerial decisions from other tasks of decision-making in management.

The theory of decision-making is based on only two axioms reflecting preference of DM. This explains the variety of models and methods of decision theory. The scope of application of multi-criteria optimization on a finite set of alternatives is limited to the additional axioms concerning the scales of attributes and preferences of the scales. Based on excluding from these axioms specific properties of the methods, the axioms are proposed that apply to all methods of multi-criteria selection.

The proposed axioms allowed creating a general theory of multicriteria optimization, linking all the methods in a single system. This theory is the basis of the textbook "The theory of administrative decision making".

## РУКОВОДСТВО ДЛЯ АВТОРОВ

Взаимодействие автора с редакцией осуществляется через личный кабинет на сайте журнала «Труды СПИИРАН» <http://www.proceedings.spiiras.nw.ru>. При регистрации авторов рекомендуется заполнить все предложенные поля данных, так как это значительно ускорит процесс оформления метаданных к новым статьям.

Подготовка статьи ведется с помощью текстовых редакторов MS Word 2007 и выше. Объем основного текста – от 5 до 20 страниц включительно. Формат страницы документа – А5 (148 мм ширина, 210 мм высота); ориентация – портретная; все поля – 20 мм. Верхний и нижний колонтитулы страницы – пустые. Основной шрифт документа – Times New Roman, основной кегль (размер) шрифта – 10 pt. Переносы разрешены. Абзацный отступ устанавливается размером в 10 мм. Межстрочный интервал – одинарный. Номера страниц не проставляются.

Не допускается использования цветных шрифтов, цветовых выделений и цветных рисунков. Статьи должны быть полностью готовы к черно-белой печати.

Основная часть текста статьи разбивается на разделы, среди которых являются обязательными: введение, хотя бы один «содержательный» раздел и заключение. Допускается также мотивированное содержанием и структурой материала выделение подразделов.

В основную часть допускается помещать рисунки, таблицы, листинги и формулы. Правила их оформления подробно рассмотрены на нашем сайте в разделе «Руководство для авторов».



ISSN 2078-9181



9 772078 918785 >